№25
2026

Механики XXI веку

Научное периодическое издание

ББК 34

Научное периодическое издание по материалам XXV Всероссийской научно-технической конференции

Механики XXI веку

№ 25 2026г.

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Мамаев Л.А. – председатель конференции, д.т.н., профессор кафедры «Подъемно-транспортных, строительных, дорожных машин и оборудования» ФГБОУ ВО «БрГУ», г. Братск;
Огар П.М. **–** д.т.н., профессор кафедры «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные машины и оборудование» ФГБОУ ВО «БрГУ», г. Братск;
Зеньков С.А.- к.т.н., зав. кафедрой «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные машины и оборудование» ФГБОУ ВО «БрГУ», г. Братск
Архипов П.В. **–** к.т.н., доцент кафедры «Машиностроение и транспорт» ФГБОУ ВО «БрГУ», г. Братск;

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Мамаев Л.А. – председатель конференции, д.т.н., профессор кафедры «Подъемно-транспортных, строительных, дорожных машин и оборудования» ФГБОУ ВО «БрГУ», г. Братск

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Федоров В.С. **–** к.т.н., доцент кафедры «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные машины и оборудование» ФГБОУ ВО «БрГУ», г. Братск

Издается с 2004 года. Периодичность 1 номер в год

Журнал зарегистрирован в научной электронной библиотеке Elibrary.ru

Перепечатка материалов из журнала «Механики XXI веку» возможна при обязательном письменном согласовании с редакцией журнала; ссылка на журнал при перепечатке обязательна.

Адрес редакции: 665709, Российская Федерация, Иркутская область,
г. Братск, ул. Макаренко, 40,
Факультет транспортных систем и лесного комплекса,
кафедра «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные
машины и оборудования», тел: 8(3953)344-000 доб.365
E-mail: mechanics@brstu.ru Сайт: http://www.brstu.ru

Братск 2026

XXV Всероссийская научно-техническая конференция
"МЕХАНИКИ XXI ВЕКУ"
16 Апреля 2026 г.

ТЕМАТИКА КОНФЕРЕНЦИИ:

Эксплуатация и ремонт машин и оборудования;
Конструкции, технические и эксплуатационные свойства транспортных средств;
Современные технологии и автоматизация в машиностроении;
Материаловедение, динамика и прочность машин и механизмов.

ОРГАНИЗАТОРЫ КОНФЕРЕНЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Братский государственный университет», г. Братск, Россия

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

Мамаев Л.А. – председатель конференции, д.т.н., профессор кафедры «Подъемно-транспортных, строительных, дорожных машин и оборудования» ФГБОУ ВО «БрГУ», г. Братск; ***Архипов П.В.*** - к.т.н., доцент кафедры «Машиностроение и транспорт» ФГБОУ ВО «БрГУ», г. Братск; ***Огар П.М.*** - д.т.н., профессор кафедры «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные машины и оборудование» ФГБОУ ВО «БрГУ», г. Братск; ***Зеньков С.А.***- к.т.н., зав. кафедрой «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные машины и оборудование» ФГБОУ ВО «БрГУ», г. Братск ***Федоров В.С.*** - к.т.н., доцент кафедры «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные машины и оборудование» ФГБОУ БрГУ, г. Братск.

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

Федоров В.С. - к.т.н., доцент кафедры «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные машины и оборудование» БрГУ; ***Архипов П.В.*** - к.т.н., доцент кафедры «Машиностроение и транспорт» ФГБОУ БрГУ.

© Авторы публикаций, 2026
© ФГБОУ ВО «БрГУ», 2026

ЭКСПЛУАТАЦИЯ, РЕМОНТ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ

УДК 621.01-752

Фрикционные автоколебания в дисковых рабочих органах бетоноотделочных машин: актуальность, проблемы и перспективы исследований

Коголь Н.Н.[1,a], Герасимов С.Н.[1,b], Кашуба В.Б.[1,c], Аскеров Р.Т.[1,d]
[1]Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия
[a] nikitos350z@mail.ru, [b] sdm_gerasimov@rambler.ru, [c] kvb1964@yandex.ru

Ключевые слова: уплотнение бетона, фрикционные автоколебания, теория колебаний

Статья посвящена повышению эффективности финишной обработки бетонных поверхностей. Традиционные бетоноотделочные машины с дисковыми рабочими органами обладают недостатками: неравномерность уплотнения, высокая энергоёмкость, зависимость от свойств смеси, риск расслоения. В качестве инновационного решения предложено использование фрикционных автоколебаний, возникающих на контакте «диск–бетон» за счёт сил трения и энергии привода. Комбинированное воздействие позволяет снизить коэффициент трения, улучшить микроуплотнение и повысить адаптивность процесса.

Сформулирована научная проблема — отсутствие систематических данных о влиянии конструктивно-кинематических параметров диска на характеристики автоколебаний. Цель исследования — установление количественных зависимостей между массой, моментом инерции, жёсткостью подвески, скоростью вращения и параметрами колебаний. Комплексный подход включает теоретическое моделирование (нелинейная динамика), компьютерное моделирование (MATLAB Simulink, Ansys) и натурный эксперимент. Ожидаемые результаты: физико-математическая модель, инженерные методики расчёта и создание энергоэффективных машин нового поколения.

Актуальность исследования.

Современное гражданское и дорожное строительство предъявляет повышенные требования к качеству и долговечности бетонных покрытий: полов промышленных зданий, аэродромных плит, автомобильных дорог и мостовых сооружений. Финишная отделка — одна из наиболее ответственных технологических операций, определяющая ровность, прочность поверхностного слоя, его износостойкость и сопротивление ударным нагрузкам [4]. Традиционные бетоноотделочные машины (затирочные, выглаживающие), оснащенные вращающимися дисковыми или лопастными рабочими органами, имеют ряд существенных ограничений [3]:

1. Неравномерность уплотнения − статическое давление диска и стандартное вращение не всегда обеспечивают однородное уплотнение смеси, особенно при наличии мелких пустот и неоднородностей [4].
2. Высокая энергоемкость − для достижения требуемого качества часто необходимо многократное прохождение по одному участку, что увеличивает затраты времени и энергии.
3. Зависимость от свойств смеси − эффективность работы резко падает при отклонении реологических свойств бетонной смеси от оптимальных (например, при изменении влажности, подвижности).

4. Риск расслоения и нарушения структуры − чрезмерное или неправильное механическое воздействие может привести к водовыделению, расслоению смеси и образованию микротрещин.

В этом контексте внедрение фрикционных автоколебаний в работу дискового органа представляет собой инновационное и высокоактуальное направление. Использование колебательных процессов, инициируемых силами трения на контакте «диск-бетон», позволяет принципиально изменить характер взаимодействия рабочего органа с обрабатываемой средой [2, 8].

Суть инновационного подхода и научная проблема.

Идея заключается в том, чтобы заставить рабочий диск совершать не только основное вращательное, но и дополнительные возвратно-колебательные движения (автоколебания) в плоскости, перпендикулярной или касательной к обрабатываемой поверхности. Эти колебания возникают и поддерживаются за счет энергии самого привода и сил трения между диском и пластично-вязкой бетонной смесью (эффект фрикционного автогенератора) [1, 5, 7].

Такое комбинированное воздействие приводит к ряду положительных эффектов [2, 9]:

− колебания способствуют более эффективному заполнению пустот и выдавливанию пузырьков воздуха.

− за счет колебаний уменьшается сила сопротивления движению диска, что снижает нагрузку на привод и энергопотребление [6].

− однородное уплотнение достигается за меньшее количество проходов.

− правильно настроенная автоколебательная система может обладать свойством самонастройки под изменяющиеся свойства смеси.

Однако создание эффективной и надежной конструкции упирается в сложную научно-техническую проблему. Не существует систематических данных о том, как именно конструктивные параметры диска (диаметр, масса, момент инерции, жесткость крепления), параметры привода и режимы работы (скорость вращения, угол атаки) влияют на возникновение, стабильность и амплитудно-частотные характеристики фрикционных автоколебаний [8, 9]. Без точного знания этих зависимостей невозможно спроектировать рабочий орган, который будет генерировать колебания оптимальной интенсивности, не переходя в режим неконтролируемой вибрации или не заглохнув [1, 2].

Цель и методы исследования.

Целью исследования является установление количественных зависимостей между конструктивно-кинематическими параметрами дискового рабочего органа и характеристиками генерируемых им фрикционных автоколебаний, а также определение на этой основе их рациональных значений для оптимизации процесса отделки бетона.

Для достижения этой цели требуется комплексный подход, сочетающий:

− разработка математической модели системы «привод − упруго закрепленный диск − вязкоупругая бетонная среда» с учетом нелинейных сил трения [1, 5, 6]. Анализ модели методами теории колебаний и нелинейной динамики для выявления условий возникновения автоколебаний [2, 7].

− проведение виртуальных экспериментов с использованием программных комплексов (например, MATLAB Simulink, Ansys) для изучения влияния различных параметров на процесс.

− создание лабораторного образца бетоноотделочной машины с измерительным комплексом, регистрирующим силы, моменты, ускорения и параметры качества поверхности [8, 22]. Проведение серии экспериментов для верификации моделей и получения окончательных практических рекомендаций [9].

Ожидаемые научные и практические результаты:

- Научная новизна − будет разработана физико-математическая модель генерирования фрикционных автоколебаний в системе «диск-бетон», что внесет вклад в теорию контактного взаимодействия рабочих органов строительных машин с дисперсными средами [1, 5, 8].
- Практическая значимость − будут разработаны конкретные методики и номограммы для инженеров-конструкторов, позволяющие рассчитывать оптимальные параметры (массу, жесткость подвески, частоту вращения) дискового органа для заданных условий работы (марка бетона, требуемая гладкость) [3, 9].
- Технологический эффект − внедрение результатов работы позволит создать новое поколение энергоэффективных и высокопроизводительных бетоноотделочных машин, обеспечивающих стабильно высокое качество поверхности при снижении трудозатрат [8].

Заключение. Исследование рациональных параметров дискового рабочего органа с фрикционными автоколебаниями находится на стыке фундаментальной механики, теории колебаний и прикладного машиностроения для строительства [1, 2, 3]. Актуальность темы исследований обусловлена острой потребностью отрасли в повышении качества бетонных работ и ресурсосберегающих технологиях [4]. Решение поставленных задач позволит перейти от эмпирического проектирования к научно обоснованному созданию высокоэффективного отделочного оборудования, что соответствует стратегическим направлениям развития строительной индустрии и импортозамещения.

Литература:

1. Блехман, И.И. Вибрационная механика и вибрационная реология (теория и приложения) / И.И. Блехман. — М. : Физматлит, 2018. — 752 с.
2. Пановко, Я. Г. Основы прикладной теории колебаний и удара / Я. Г. Пановко. — 4-е изд., испр. и доп. — Л. : Политехника, 1990. — 272 с.
3. Баловнев, В. И. Дорожно-строительные машины и комплексы / В. И. Баловнев. — 4-е изд., стер. — М. : Машиностроение, 2015. — 528 с.
4. Афанасьев, А. А. Технология и механизация бетонных работ / А. А. Афанасьев. — М. : Высшая школа, 1991. — 304 с.
5. Ишлинский, А. Ю. О проскальзывании в зоне контакта при комбинированном нагружении / А. Ю. Ишлинский // Известия АН СССР. Отделение технических наук. — 1956. — № 6. — С. 23–28.
6. Kragelsky, I. V. Friction and Wear: Calculation Methods / I. V. Kragelsky, M. N. Dobychin, V. S. Kombalov. — Oxford: Pergamon Press, 1982. — 480 p.
7. Feeny, B.A Historical Review on Dry Friction and Stick-Slip Phenomena / B. Feeny, A. Guran, N. Hinrichs, K. Popp // Applied Mechanics Reviews. — 1998. — Vol. 51, No. 5. — P. 321–341.
8. Белокобыльский С.В., Мамаев Л.А., Кашуба В.Б., Ситов И.С. Динамически уравновешенная вибрационная бетоноотделочная машина // Современные наукоемкие технологии. — 2009. — № 1. — С. 7.
9. Мамаев Л.А., Дорлигсурэн Лханаг, Кононов А.А., Герасимов С.Н. Вибрационный рабочий орган бетоноотделочной машины. Патент РФ № 2170665. — 1999.

Frictional self-oscillations in disc working elements of concrete finishing machines: relevance, problems, and research prospects

Kogol N.N.[1,a], Gerasimov S.N.[1,b], Kashuba V.B.[1,c], Askerov R.T.[1,d]
[1]Bratsk State University, 40 Makarenko St., Bratsk, Russia
[a] nikitos350z@mail.ru, [b]sdm_gerasimov@rambler.ru, [c] kvb1964@yandex.ru

Keywords: concrete compaction, frictional self-oscillations, oscillation theory

This article focuses on improving the efficiency of concrete surface finishing. Traditional concrete finishing machines with disc working tools have disadvantages, including uneven compaction, high energy consumption, dependence on the properties of the mixture, and the risk of segregation. An innovative solution proposed is the use of frictional self-oscillations, which occur at the disc-concrete interface due to frictional forces and drive energy. This combined effect reduces the friction coefficient, improves microcompaction, and increases process adaptability.

The research problem identified is the lack of systematic data on the influence of the design and kinematic parameters of a disk on the characteristics of self-oscillations. The objective of the study is to establish quantitative relationships between mass, moment of inertia, suspension stiffness, rotational speed, and oscillation parameters. The integrated approach includes theoretical modeling (nonlinear dynamics), computer simulation (MATLAB Simulink, Ansys), and a full-scale experiment. The expected results include a physical and mathematical model, engineering calculation methods, and the creation of next-generation energy-efficient machines.

УДК 621.271

Выемочная машина для доработки прибортовых запасов ценного минерального сырья

Чебан А.Ю.[1,a]

[1] Институт горного дела Дальневосточного отделения РАН, ул. Тургенева 51, Хабаровск, Россия

[a] chebanay@mail.ru

Ключевые слова: богатые рудные включения, взрывное рыхление, телескопическая рукоять, гидравлический грейфер, селективная выемка.

В статье предлагается технико-технологическое решение по доработке богатых рудных включений, остающихся за предельным контуром карьера. Данные включения при относительно небольшом объеме рудной массы могут содержать значительное количество металла. Дезинтеграция выявленных богатых рудных включений осуществляется посредством взрыва с применением специальных кумулятивных зарядов, обеспечивающих качественное рыхление массива. Предлагаемая конструкция выемочной машины, включающей телескопическую стрелу, телескопическую рукоять и гидравлический грейферный ковш с возможностью регулирования его ширины позволяет вести выемку рудной массы из наклонных выработок в стесненных условиях с погрузкой в транспортные средства. Применение разработанной выемочной машины позволит увеличить извлечение полезного ископаемого из недр и повысит рентабельность горного производства.

Введение.

При открытой разработке месторождений в прибортовом пространстве зачастую остаются запасы полезных ископаемых, извлечение которых экономически нецелесообразно так как требует увеличения контура карьера и ведения большого объема вскрышных работ [1-4]. В тоже время доработка таких запасов с применением специальных видов выемочного оборудования с учетом имеющейся инфраструктуры может продлить срок службы горнодобывающего предприятия и увеличить коэффициент извлечения полезного ископаемого из недр [5]. Таким образом, совершенствование выемочного оборудования, предназначенного для доработки прибортовых запасов и позволяющего снизить потери минерального сырья в недрах, имеет важное хозяйственное значение [6-7].

Состояние вопроса.

В настоящее время для доработки прибортовых запасов полезных ископаемых используется ряд технико-технологических решений. Наибольшее распространение получили комплексы глубокой разработки пластов, используемые для выемки угля и песков россыпей [8-9]. Данные комплексы снабжены рабочим оборудованием в виде фрез и транспортирующих устройств, они устанавливаются в карьере у выхода пласта, после чего осуществляется фрезерование полезного ископаемого с образованием выемок глубиной до нескольких сотен метров. Также для доработки угольных пластов используются шнекобуровые агрегаты, которые выемку и перемещение угля по выработке осуществляют при помощи последовательно наращиваемого шнека. Известны конструктивные решения по выемке маломощных рудных тел с применением фрезерных рабочих органов различных конструкций, осуществляющих рыхление руды с последующим перемещением полученной мелкокусковой рудной массы системой пневмотранспортирования [10-11]. Недостатком оборудования ведущего механическое рыхление является низкая производительность и быстрый износ при работе с относительно прочными рудами, что предопределяет высокую себестоимость работ. Кроме того, обеспечение нормальной работы системы пневмотранспортирования требует получения мелкокусковой рудной массы, что не всегда возможно, особенно при рыхлении трещиноватого массива.

Целью исследования является разработка технико-технологического решения для глубокоселективной выемки прибортовых включений богатых руд, имеющих относительно высокую прочность, за счет уточнения контуров богатых включений, проведения локального взрывного рыхления и извлечения полученной рудной массы выемочной машиной специальной конструкции.

Результаты исследований и их обсуждение.

Предлагаемое автором технико-технологическое решение предполагает посредством бурения шпуров и исследования шлама выявлять локализацию богатых включений в рудных телах, оставшихся за контуром карьера. При выявлении богатого включения разведочные шпуры заряжаются специальными кумулятивными зарядами [12], обеспечивающими распространение взрывной волны преимущественно по простиранию рудного тела малой мощности, что уменьшает прихват бедных руд и пустых пород. Для глубокоселективного извлечения взорванных богатых рудных включений 1 разработана конструкция выемочной машины рабочее оборудование, которой включает телескопическую стрелу 2 и телескопическую рукоять 3, а также гидравлический грейферный ковш 4, ширина *B* которого регулируется с учетом мощности извлекаемого богатого рудного включения 1 оставшегося за бортом рудного тела 5 (рис.1).

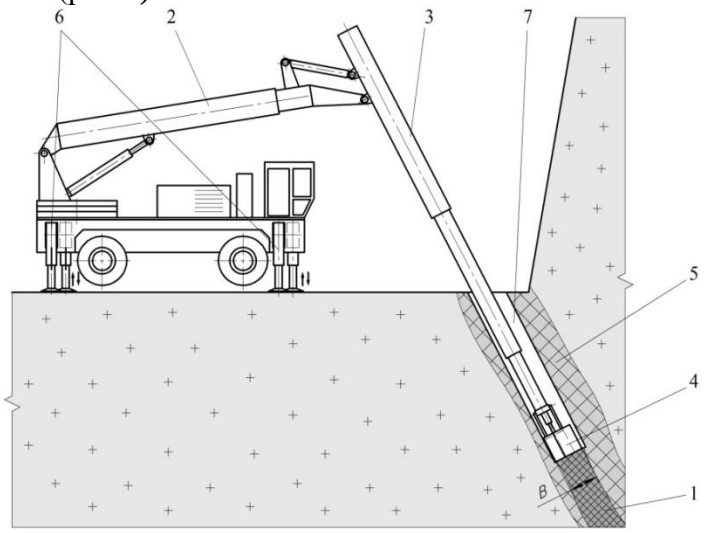


Рис. 1. Схема выемочной машины на доработке богатого рудного включения

Выемочная машина на выдвижных опорах 6 позиционируется относительно взорванного рудного включения, при этом гидравлический грейферный ковш 4 посредством телескопической рукояти 3 погружается в выработку 7 и ведет черпание богатой рудной массы с ее последующей погрузкой в транспортное средство (на рис.1 не показано).

Выводы.

Предлагаемое технико-технологическое решение позволяет вести глубокоселективную выемку богатых рудных включений при доработке прибортовых запасов минерального сырья. Конструкция выемочной машины с грейферным ковшом изменяемой ширины обеспечивает возможность извлечения рудной массы из наклонной выработки в стеснённых условиях. Применение разработанной выемочной машины позволит увеличить извлечение полезного ископаемого из недр и повысит рентабельность горного производства.

Литература:

1. Кожогулов К.Ч., Такеева А.Р., Усенов К.Ж., Алибаев А.П. Способ отработки прибортовых запасов с закладкой при комбинированной разработке месторождений // Известия Кыргызского государственного технического университета. 2023. №3. С. 1397–1401.

2. Baohui Tan, Fengyu Ren, Youjun Ning, Rongxing He, and Qiang Zhu. A new mining scheme for hanging wall ore-body during the transition from open pit to underground mining: a numerical study, Advances in Civil Engineering, 2018, vol. 2018, pp. 1–17.

3. Чебан А.Ю. Совершенствование геотехнологии выемки тонких рудных тел с применением стрелового комбайна // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2020. №1. С. 340-348.

4. Юматов Б.П., Валатка З.И., Секисов А.Г., Зыков Н.В. Управление рудо-потоками на карьерах с использованием ЭВМ // Горный журнал. 1984. №12. С. 33-41.

5. Секисов Г.В., Чебан А.Ю. Малоотходная технология освоения сложноструктурных месторождений с применением комбинированных схем выемки и переработки руд // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2021. №6. С. 110-118.

6. Dintwe T.K.M., Sasaoka T., Shimada H., Hamanaka A., Moses D., Liu S.F., and Meng F.F. Effects of sublevel open stope underground mining on surface and open pit slopes, Journal of Geoscience and Environment Protection, 2021, vol. 9 (1), pp. 121–131.

7. Чебан А.Ю. Способ доработки глубокого карьера с применением фрезерных машин // Маркшейдерия и недропользование. 2017. №4. С. 23-29.

8. Пикалов В.А., Соколовский А.В., Нецветаев А.Г., Пружина Д.И. Расширение области применения комбинированной геотехнологии при отработке угольных месторождений // Горный журнал. 2016. №5. С. 68–72.

9. Ковлеков И.И. Разработка россыпных месторождений севера комплексами глубокой разработки пластов // Горная промышленность. 2021. № 5. С. 84–89.

10. Чебан А.Ю. Технология доработки рудных тел добычной установкой, оборудованной автономным выемочным модулем // Маркшейдерия и недропользование. 2019. № 4. С. 22–28.

11. Чебан А.Ю. Способ и оборудование для открытой разработки маломасштабных крутопадающих месторождений // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т.15. №3. С. 18-23.

12. Секисов А.Г., Чебан А.Ю., Секисов Г.В. Совершенствование технологии взрывного рыхления тонких жил путем применения специальных скважинных зарядов // Маркшейдерия и недропользование. 2020. № 4. С. 35–37.

A mining machine for the processing of near-pit reserves of valuable mineral raw materials

Cheban A.Yu.[1,a]

[1]Mining Institute the Far Eastern branch of the Russian Academy of Sciences, 51 Turgenev st., Habarovsk, 680000, Russian Federation
[a] chebanay@mail.ru

Keywords: High-grade ore inclusions, blast loosening, telescopic handle, hydraulic grab, selective mining.

The article proposes a technical and technological solution for processing rich ore inclusions remaining outside the quarry boundary. These inclusions, despite the relatively small volume of ore mass, can contain a significant amount of metal. The disintegration of identified rich ore inclusions is carried out by means of an explosion using special cumulative charges, which ensure high-quality loosening of the massif. The proposed design of the mining machine, which includes a telescopic boom, a telescopic handle and a hydraulic grab bucket with adjustable width, allows for the extraction of ore mass from inclined workings in confined spaces with loading into vehicles. The use of a mining machine will increase the extraction of minerals from the subsoil and improve the profitability of mining operations.

УДК 621.271

Расширение функциональности специального агрегата для формирования штабелей некондиционных руд

Чебан А.Ю.[1,a]
[1]Институт горного дела Дальневосточного отделения РАН, ул. Тургенева 51, Хабаровск, Россия
[a]chebanay@mail.ru

Ключевые слова: техногенные отходы, мелкие фракции, полезный компонент, просеивание, планировка штабеля.

В статье предлагается конструкция специального агрегата, обеспечивающего извлечение из некондиционных руд продуктивных мелких фракций, обогащенных полезным компонентом, в процессе перевалки рудной массы из кузова автосамосвала под откос. Специальный агрегат включает гусеничную ходовую часть, установленную на раме, поворотную емкость, вакуумную систему транспортирования с гибким трубопроводом, бульдозерный отвал и гидрооборудование. Извлечение продуктивных мелких фракций осуществляется на просеивающих поверхностях поворотной емкости при ее подъеме и пересыпании крупно и среднекусковой рудной массы. Выделенная при формировании штабеля продуктивная фракция концентрируется в накопительном бункере, вместе с которым в дальнейшем транспортируется к месту переработки. В процессе перемещения специального агрегата на новый участок отсыпки бульдозерным отвалом осуществляется планировка поверхности штабеля.

Введение.

В связи с увеличением потребления металлов промышленностью и снижения содержания полезных компонентов в рудах извлечение минерального сырья из недр возрастает ускоренными темпами, а вместе с этим также ускоренно увеличивается количество техногенных отходов [1-3], так если в 2016 году горными предприятиями ведущими освоение металлорудных месторождений было образовано 960 млн т техногенных отходов, то в 2022 году – 2400 млн т. [2]. При разработке месторождений вместе с кондиционными рудами на поверхность извлекается большой объем вскрышных и вмещающих пород, а также некондиционных руд, которые могут содержать существенную часть металла месторождения [4-6]. Низкое среднее содержание металла в некондиционных рудах не позволяет рентабельно перерабатывать данное минеральное сырье, в связи с чем оно складируется в специальных штабелях [7-8], где в процессе хранения окисляется с выделением тяжелых металлов, которые попадают в воду. Таким образом некондиционное минеральное сырье теряет свое качество, одновременно создавая дополнительные экологические проблемы в районе ведения горных работ.

Состояние вопроса и постановка проблемы.

Снизить экологическую нагрузку с одновременным повышением эффективности горного производства возможно за счет вовлечения в переработку части некондиционного минерального сырья. Дело в том, что для некоторых типов руд при их рыхлении взрывным или механическим способом характерно образование рудной мелочи, обогащенной полезным компонентом в 1,5-3,0 раза в сравнении со средним содержанием [9-11]. Таким образом, обогащенная рудная мелочь является продуктивной фракцией, которую можно направить на переработку вместе с кондиционными рудами. Выделение рудной мелочи обычно осуществляется на специальных грохотильных пунктах, однако их организация и эксплуатация требует существенных затрат, кроме того, появляется необходимость в осуществлении дополнительной перевалки рудной массы [12-16]. Уменьшить данные недостатки позволяет технико-технологическое решение, предполагающее использование специального агрегата для формирования штабеля - выгруженная из автосамосвалов некондиционная руда сортируется на просеивающих поверхностях агрегата с выделением продуктивных мелкой и тонкой фракций, при этом крупнокусковая рудная масса сразу ссыпается в штабель [17]. Недостатками данного агрегата являются низкая проходимость колесного шасси при движении по рыхлой поверхности штабеля, необходимость ведения дополнительных планировочных работ бульдозером, а также неравномерная загрузка просеивающей поверхности по ширине, что снижает эффективность выделения рудной мелочи.

Целью исследования является разработка усовершенствованной конструкции агрегата, которая позволит расширить его функциональность и увеличить эффективность просеивания продуктивных мелких фракций.

Результаты исследований и их обсуждение.

Автором предлагается усовершенствованная конструкция специального агрегата для формирования штабеля 1 некондиционных руд (рис. 1).

Предлагаемая конструкция агрегата включает раму 2 с гусеничной ходовой частью 3, поворотную емкость 4 с разделительным клином 5 и просеивающими поверхностями 6, 7, вакуумную систему транспортирования 8 рудной мелочи, бульдозерный отвал 9.

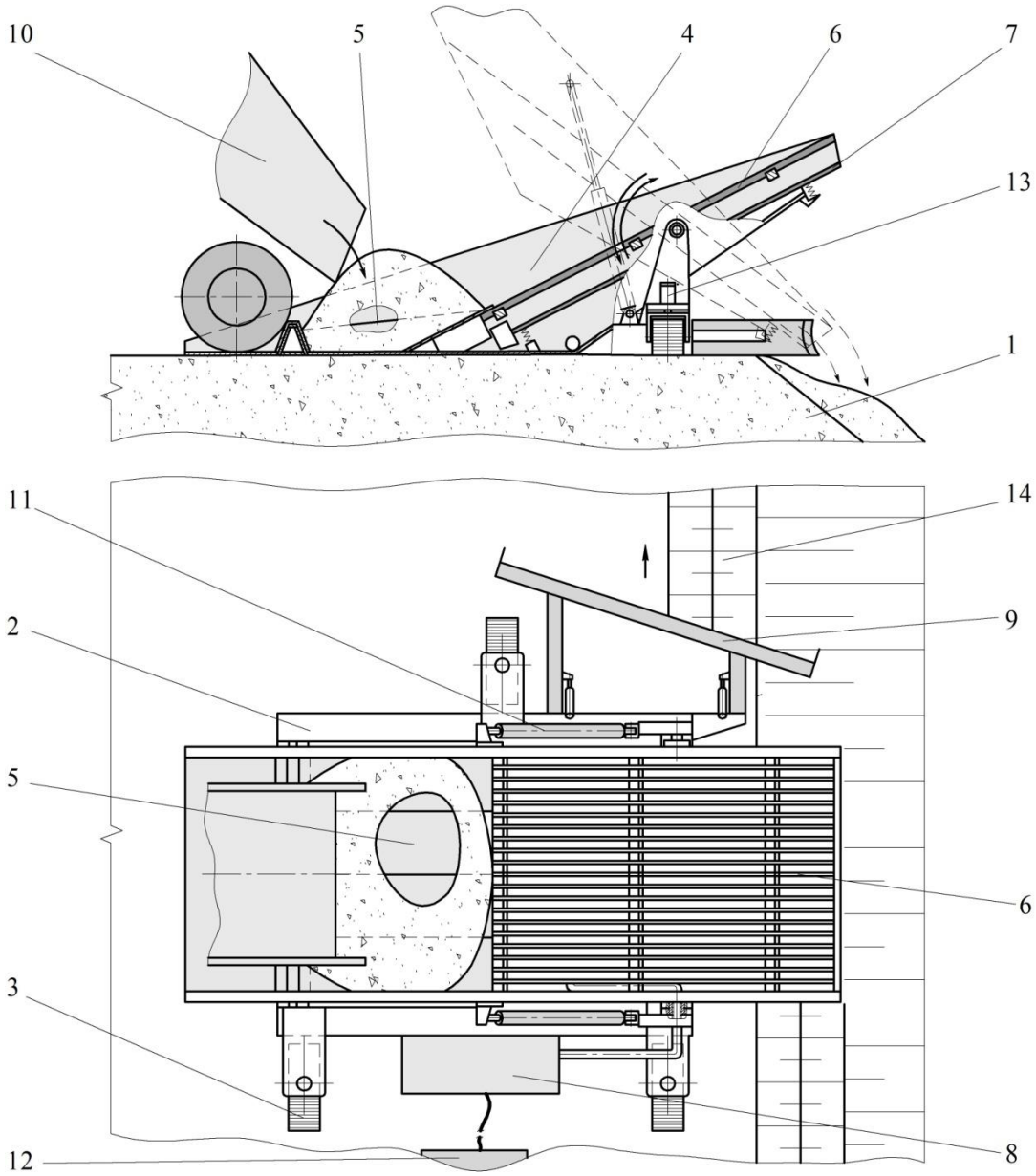


Рис. 1. Схема специального агрегата для формирования штабеля некондиционной руды

Специальный агрегат устанавливается у кромки отсыпаемого штабеля 1, в опущенную поворотную емкость 4 производится разгрузка некондиционной рудной массы из кузова автосамосвала 10, при этом наличие разделительного клина 5 предопределяет более равномерное распределение рудной массы по ширине поворотной емкости 4. После выезда транспортного средства поворотная емкость 4 гидроцилиндрами 11 начинает подниматься, и рудная масса перемещается по просеивающим поверхностям 6, 7 с образованием крупнокусковой и среднекусковой рудной массы, ссыпающейся под откос штабеля 1 и обогащенной рудной мелочи подающейся вакуумной системой транспортирования 8 из донной части поворотной емкости 4 в накопительный бункер 12 по гибкому трубопроводу. Затем поворотная емкость 4 опускается и рабочий цикл повторяется, по завершении отсыпки участка гидроцилиндрами 13 производится приподнимание рамы 2 над поверхностью штабеля 1 с перемещением специального агрегата вдоль кромки отвала, при этом бульдозерным отвалом 9 осуществляется разравнивание ранее отсыпанной рудной массы 14.

Выводы.

Предлагаемая конструкция специального агрегата для формирования штабеля с гусеничной ходовой частью и бульдозерным отвалом обеспечивает возможность свободного маневрирования по рыхлой поверхности штабеля и позволяет без использования дополнительных горных машин вести планировку данной поверхности. Наличие разделительного клина внутри поворотной емкости обеспечивает более равномерное распределение рудной массы при разгрузке автосамосвала, что в дальнейшем повышает эффективность выделения рудной мелочи при перегрузке рудной массы. Извлечение из некондиционной рудной массы дополнительного объема минерального сырья позволит увеличить количество получаемого металла и повысить эффективность горно-обогатительного производства.

Литература:

1. Baninla Y., Zhang M., Lu Y., Liang R., Zhang Q., Zhou Yu., Khan K. A transitional perspective of global and regional mineral material flows // Resources, Conservation and Recycling. 2019, vol. 140, pp. 91-101.

2. Олейник Д.Н., Рыльникова М.В., Швабенланд Е.Е. Совершенствование правовых основ управления отходами недропользования в России // Рациональное освоение недр. 2024. №6. С. 24-35.

3. Чебан А.Ю., Секисов А.Г. Совершенствование технологии разработки сложноструктурных месторождений с применением комбинированной выемки руд // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №3. С. 35-44.

4. Юматов Б.П., Валатка З.И., Секисов А.Г., Зыков Н.В. Управление рудо-потоками на карьерах с использованием ЭВМ // Горный журнал. 1984. №12. С. 33-41.

5. Чебан А.Ю., Секисов Г.В. Обоснование использования комбинированной подготовки к селективной выемке руд сложноструктурных месторождений // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т. 18. №3. С. 4-12.

6. Zhang Z.X., Hou D.F., Aladejare A., Ozoji T., Qiao Y. World mineral loss and possibility to increase ore recovery ratio in mining production. // International Journal Of Mining Reclamation And Environment. 2021, vol. 35, no. 9, pp. 670-691.

7. Чебан А.Ю. Добычной комплекс для открытой разработки месторождений твердых полезных ископаемых // Горное оборудование и электромеханика. 2017. №3. С. 8-11.

8. Снитка Н.П., Наимова Р.Ш. Направления комплексного использования техногенных ресурсов при открытой разработке месторождения Мурунтау // Горный журнал. 2018. №9. С. 57-61.

9. Adams M. D. Gold Ore Processing: Project Development and Operations. 2nd ed. – Amsterdam: Elsevier, 2016, 980 p.

10. Чебан А.Ю. Совершенствование геотехнологии выемки тонких рудных тел с применением стрелового комбайна // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2020. №1. С. 340-348.

11. Рассказов И.Ю., Секисов А.Г., Чебан А.Ю. Повышение эффективности разработки сложноструктурных месторождений при опережающей выемке особо богатых руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. №4. С. 5-19.

12. Чебан А.Ю., Секисов А.Г. Карьерный экскаватор с рабочим оборудованием для отделения обогащенной рудной мелочи Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т. 18. №1. С. 16-22.

13. Открытые горные работы – XXI век. Справочник. Том. 1. Под. ред. Анистратова К.Ю.: М.: ООО «Система максимум», 2019. 640с.

14. Молотилов С.Г., Норри В.К., Кортелев О.Б., Власов В.Н. Отвальный перегружатель для мощных экскаваторно-автомобильных комплексов карьеров // Известия вузов. Горный журнал. 2002. №6. С. 25-31.

15. Кантемиров В.Д., Титов Р.С. Оптимизация параметров карьерных грохотильно-перегрузочных пунктов // Известия Уральского государственного горного университета. 2020. №3. С. 107-114.

16. Увеличение продуктивности рудника экономически эффективным методом с помощью ALLU // Горная промышленность. 2020. №1. С. 68-69.

17. Чебан А.Ю. Технология складирования некондиционных руд с выделением продуктивных мелких фракций // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2024. №1. С. 388-398.

Expanding the functionality of a special unit for forming stacks of substandard ores

Cheban A.Yu.[1,a]
[1]Mining Institute the Far Eastern branch of the Russian Academy of Sciences, 51 Turgenev st., Habarovsk, 680000, Russian Federation
[a]chebanay@mail.ru

Keywords: man-made waste, small fractions, useful component, screening, stack planning.

The article proposes the design of a special unit that ensures the extraction of productive small fractions enriched with a useful component from substandard ores during the process of transferring the ore mass from the body of a dump truck down a slope. The special unit includes a tracked undercarriage mounted on a frame, a rotating container, a vacuum transport system with a flexible pipeline, a dozer blade and hydraulic equipment. Extraction of productive fine fractions is carried out on the screening surfaces of the rotating container during its lifting and pouring of large and medium-sized ore mass. The productive fraction separated during the stack formation is concentrated in a storage bin, where it is subsequently transported to the processing site. As the special unit is moved to a new dump site, a bulldozer blade is used to level the stack surface.

УДК 625.76.08

Способы повышения эффективности работы дорожных и строительных машин с помощью технологий искусственного интеллекта

Садовникова Я.С.[1,a], Мандровский К.П.[2,b]
[1]ООО «Эксперт-Центр», 115211 Россия, г. Москва, Каширское ш., д. 55, к. 5, этаж/помещ 1/I,
[2]ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)», 125319 Россия, г. Москва, Ленинградский пр., 64
[a]jana.sadovnikova@yandex.ru, [b]effectmash@mail.ru

Ключевые слова: зимнее обслуживание дорог, технология свёрточных нейронных сетей, компьютерное зрение, датчики состояния дорожного покрытия, цифровые двойники дорог, методы машинного обучения.

Технологии искусственного интеллекта в сфере эксплуатации дорожных и строительных машин внедряются по двум основным направлениям, таким как разработка автономных машин и оснащение обычных дорожно-строительных машин интеллектуальными бортовыми системами. В качестве решения задачи повышения эффективности работы машин широкое применение получили датчики состояния дорожного покрытия, системы видеонаблюдения и автоматические дорожные метеостанции, предоставляющие информацию, необходимую для организации работы машин при зимнем содержании дорог. В статье рассматриваются новейшие исследования,

направленные на повышение эффективности эксплуатации машин в зимние периоды, в частности, с применением методов и алгоритмов искусственного интеллекта.

Введение.

Эффективность работы дорожных и строительных машин связана с рядом факторов [1], одним из которых является мониторинг и учёт состояния дорожного покрытия. Используемые в настоящее время методы мониторинга состояния дорожных покрытий требуют задействования значительной численности персонала. Технологии искусственного интеллекта (ИИ) открывают широкие перспективы для совершенствования мониторинга покрытий и дорожной обстановки в целом, что напрямую определяет пути повышения эффективности эксплуатации дорожных и строительных машин и качества выполняемых ими операций по содержанию дорог.

Рассмотрим известные на данный момент направления и теоретические основы внедрения ИИ в сферу зимнего содержания дорог (на примере снегоуборочной техники, машин для распределения противогололёдных реагентов).

Пути повышения эффективности работы дорожных и строительных машин в зимний период с помощью технологий искусственного интеллекта.

Исследователями [2] разработана система мониторинга дорожных условий в режиме реального времени, основанная на веб-технологиях, технологии свёрточных нейронных сетей, работающей совместно с автоматизированной системой определения местоположения транспортных средств (Auto Vehicle Location, AVL) и дорожной метеорологической информационной системой (RWIS). Система мониторинга позволяет определять состояние дорожного покрытия не только на уровне наличия/отсутствия снежно-ледяных образований, но и на более сложном уровне, например, при частичном покрытии снегом. Предложенная система позволяет повысить качество принятия решений при организации мероприятий по зимнему содержанию дорог за счёт автоматизированной классификации состояний дорожного покрытия, а также позволяет операторам дорожных машин своевременно реагировать на дорожную и метеорологическую обстановку в процессе осуществления операций по зимнему содержанию дорог.

В статье [3] описаны инструменты с поддержкой ИИ для оперативного принятия решений по зимнему обслуживанию дорог. Интеллектуальная система поддержки принятия решений предоставляет графический интерфейс, визуализирующий ключевые актуальные данные о дорожных и метеорологических условиях в конкретных точках дороги. Сервер системы непрерывно собирает и анализирует данные (в том числе с камер видеонаблюдения) и принимает решения по организации зимнего обслуживания дорог. Для определения высоты снежного покрова на дорожном покрытии предусмотрено применение свёрточной нейронной сети. Веб-интерфейс системы создан с использованием веб-фреймворка Django, а интерфейс карты дорожной сети – с использованием библиотеки JavaScript Leaflet. Приложение, в котором реализована интеллектуальная система, предлагает рекомендуемый вариант зимнего обслуживания на последующие двадцать четыре часа, прошедшие после оценки данных для каждой конкретной точки дорожной сети.

В работе [4] решается задача повышения эффективности патрулирования дорог в зимний период в ночное время. В работе показан механизм использования алгоритмов машинного обучения (Random Forest (RF algorithm) и CatBoost (Boosting algorithms)) и глубоких нейронных сетей (DNN) для прогнозирования и обнаружения гололёда на основе атмосферных данных. В прогностической модели учитывались предоставляемые метеорологической службой входные параметры, такие как температура воздуха, влажность, скорость ветра, точка росы и вероятность осадков. Предложенная система начала использоваться с декабря 2023 года. По данным авторов, в зимний период 2023–2024 гг. система позволила сократить использование людских и материальных ресурсов примерно до 60 %. Утверждается, что уровень аварийности из-за гололёдных явлений при этом остался на

уровне статистических данных предыдущих лет, что позволяет сделать вывод об обеспечении аналогичного уровня безопасности дорожного движения.

В исследовании [5] представлены результаты оценки Программы борьбы со снегом и льдом, проведённой Департаментом транспорта Массачусетса (MassDOT). В качестве конкретных рекомендаций по повышению эффективности зимнего содержания дорог Департаментом указано более широкое внедрение контроллеров замкнутого цикла с поддержкой GPS/AVL, установку станций беспроводной передачи данных, а также использование программного обеспечения для оптимизации маршрутов работы дорожных машин. Эти меры позволят устранить пересечения маршрутов техники, избыточную обработку покрытий реагентами и сократить неоправданный расход противогололёдных реагентов.

В отчете [6] Федерального управления автомобильных дорог (FHWA) изучена возможность применения ИИ для сбора и анализа массива данных с целью повышения эффективности осуществления операций по зимнему обслуживанию дорог. Наиболее важными возможностями, предоставляемыми ИИ, названы: рекуррентные нейронные сети (RNN) для прогнозировании концентрации противогололёдных реагентов и температуры поверхности дорог; глубокое обучение с подкреплением и принятием решений (DRL) для анализа массивов данных без участия человека; визуализация состояния дорог, достигаемая совместным использованием технологий ИИ с традиционными визуальными инструментами и датчиками (например, камеры видеонаблюдения, бортовые камеры автоматического определения местоположения транспортных средств (AVL), датчики состояния дорожного покрытия); свёрточные нейронные сети (CNN), собирающие данные в формате видео и изображений и передающие их в блок управления для анализа и принятия решений по дальнейшей организации операций по обслуживанию дорог. Для максимальной эффективности все составляющие системы ИИ должны функционировать по принципу целостного замкнутого цикла в рамках определённого сценария конкретных операций по зимнему содержанию дорог. Утверждается, что наиболее перспективно внедрение системы поддержки принятия решений в зимнее время (MDSS), которая будет изучать вопросы зимнего обслуживания и будет реализована в приложении Data-Driven MDSS (Dr. MDSS). Оно предназначено для работы с данными, полученными в ходе практической деятельности дорожных служб, с актуальными данными от дорожных датчиков, с изображениями и видеозаписями о состоянии дорожного покрытия, дорожной обстановки и погодных условий.

В исследовании [7] представлены результаты разработки системы управления снегоуборочными машинами, включающей в себя сбор и визуализацию информации о состоянии дорог для оперативного управления рабочими процессами снегоуборочной техники. Система использует изображения покрытий дорог, полученные в режиме реального времени, информацию о метеорологических факторах (температура окружающей среды, относительная влажность воздуха, скорость ветра, оповещения о возможном гололёде) от национальных метеорологических служб и расчётные температуры дорожного покрытия из геопространственной базы данных. Сбор данных о состоянии дорог осуществляется автоматически с заданным интервалом времени при движении снегоуборочных машин. Использование системы предоставляет возможность отслеживать состояние покрытия дорог и своевременно принимать решения по организации работы снегоуборочной техники во время снегопадов. Также система позволяет получать информацию о наличии и точных координатах возможных мест с низкой температурой покрытия, что повышает эффективность организации работ по устранению и превентивной обработке покрытий противогололёдными реагентами.

Разработка экономически эффективной системы для отслеживания состояния дорог представлена в работе [8]. В работе описаны статистические модели, демонстрирующие

взаимосвязь между температурой дорожного покрытия и прогнозами погоды, предоставляемыми Национальной метеорологической службой. Также была представлена разработанная система цифрового двойника, отображающая реальные дорожные условия путём объединения функций мобильных устройств и программного интерфейса ArcGIS. Показано, что предложенная методология может быть интегрирована в систему принятия решений по зимнему содержанию дорог для визуализации изображений состояния дорог и отображения расчётной температуры дорожного покрытия без необходимости использования систем метеорологической информации. Полученные системой данные о расчётной температуре дорожного покрытия помогают дорожным службам повысить эффективность планирования и организации работ по зимнему содержанию дорог.

Для эффективного мониторинга состояния дорог и оперативной организации мероприятий по удалению снега и гололёда активно разрабатываются цифровые двойники дорог [9, 10]. В статье [10] рассматривается использование технологии цифровых двойников автомобильных городских дорог, предполагающей создание цифровой модели реальной дороги, в которой учтены данные о состоянии покрытия от датчиков, информация о реальном дорожном движении и погодных условиях. Модель воспроизводит реальные дорожные условия и формирует прогностические сценарии возможных проблем. Эта технология повышает технико-экономические показатели эксплуатации техники для содержания дорог и позволяет улучшить эффективность управления дорожной инфраструктурой в целом.

На данный момент при организации мероприятий по содержанию дорог широко используют сеть автоматических дорожных метеостанций (АДМС). Развитие ИИ идёт по пути интеграции технологий нейронных сетей с данными от АДМС (зарубежный аналог – RWIS). В частности, исследователями [11] рассматривается совместная работа свёрточных нейронных сетей с изображениями дорожных покрытий от RWIS с целью повышения точности определения состояния дорожного покрытия, что особенно актуально в зимних условиях, когда точность классификации состояния покрытия затруднена. Технология свёрточных нейронных сетей позволяет анализировать влияния углов съёмки для оптимизации ориентации камеры, оценивать влияние разрешения изображений на точность модели и определять необходимость добавления или удаления видеопотоков с камер для повышения точности определения состояния покрытия и планирования рациональной работы снегоуборочных машин.

Совершенствованию технологии интеллектуальных машин для распределения противогололёдных реагентов с целью более точного их дозирования посвящена работа [12]. В статье описаны модель и алгоритмы для точного дозирования реагентов с использованием методов машинного обучения. Предложенная модель обучена и протестирована с использованием эмпирических данных о дозировках распределения реагентов за последнее десятилетие на трёх различных классах автомобильных дорог. В модели используется метод групповой обработки данных (GMDH), применяемый для решения сложных нелинейных систем. Предложенные нелинейные модели GMDH были разработаны на основе зависимости между наблюдаемыми нормами применения соли и соответствующими зимними штормами. Структура модели GMDH аналогична нейронным сетям прямого распространения (Feedforward Neural Networks, FNN) и включает в себя значительный по объёму массив входных данных, а также скрытых слоёв и выходных данных. В модели учитываются: класс дороги, продолжительности снегопада, температуры воздуха и дорожного покрытия, солнечная радиация и осадки. Прогнозирование температуры поверхности дорожного покрытия в модели основано на использовании передовых методов обучения на основе глубоких нейронных сетей. Новые модели показали хорошую точность прогнозирования и статистические показатели ошибок, и могут быть использованы для совершенствования систем управления машин для распределения реагентов.

Использование алгоритмов ИИ для эффективной организации работы снегоуборочных машин рассмотрено в статье [13]. В исследовании описана инновационная структура для маршрутизации снегоуборочных машин в городской автодорожной сети. Предлагаемая система рассчитана на применение камер видеонаблюдения (компьютерное зрение) и методов глубокого обучения для оценки высоты снежного покрова и интенсивности трафика для поиска оптимальных маршрутов работы снегоуборочной техники. Алгоритмы глубокого обучения используются для обработки информации с камер видеонаблюдения. При решении задач маршрутизации снегоуборочной техники применяются методы анализа графов для вычисления весовых коэффициентов при расчёте приоритета дорог. Выбор оптимальных маршрутов снегоуборочных машин на дорогах, требующих первоочередной обработки, достигается совместной работой модулей компьютерного зрения, нейронной сети графа (GCN) и алгоритма маршрутизации транспортных средств.

В сфере эксплуатации строительных машин алгоритмы машинного обучения позволяют управлять процессами технической эксплуатации; повышать технико-экономические показатели работы машин; повышать безопасность выполнения рабочих операций. Системы ИИ, в частности, могут выполнять следующие задачи: обнаружение препятствий и организацию их обхода; управление погрузочно-разгрузочными операциями [14], копанием и заливкой бетона; оценка и контроль показателей производительности строительных машин путём отслеживания расхода топлива, энергии, материалов; контроль позиционирования и ориентации машины и её рабочего оборудования; анализ массы поднимаемого груза и степени наполненности ковша; анализ грузоподъёмности оборудования; контроль показателей устойчивости машин при выполнении ими рабочих операций [15-20].

При этом наиболее перспективными технологиями ИИ выступают: предиктивная аналитика и машинное обучение (с использованием свёрточных нейронных сетей, нейросетей для прогнозного анализа, гибридных нейросетей), технология компьютерного зрения, технология оптимизации маршрутов и режимов работы техники; разработка автономных машин и цифровых двойников.

Результаты и обсуждение.

Технологии искусственного интеллекта активно разрабатываются и внедряются в сферу зимнего содержания автомобильных дорог для решения задач математического моделирования рабочих процессов и в целях оптимизации работы дорожной и строительной техники. Технологии предиктивной аналитики и алгоритмы машинного обучения находят применение для решения производственных задач, таких как оптимизация графиков проведения технического обслуживания, прогнозирование параметров отказов, увеличение срока службы оборудования, построение оптимальных маршрутов снегоуборочной техники и машин для распределения противогололёдных материалов. Технология компьютерного зрения широко применяется при анализе видеоданных и изображений с камер для определения состояния дорожных покрытий, оценки уровня снежно-ледяных отложений, а также для создания цифровых моделей дорог. В качестве отдельного направления выделяется разработка автономных машин (автономные бульдозеры, экскаваторы, погрузчики, рабочий процесс и технологические операции которых выполняются по заданным алгоритмам и программам). Создание теоретической базы для подобных программных продуктов и алгоритмов, внедрённых в бортовые системы дорожных и строительных машин, в настоящее время продолжается. Упоминаемые технологии развиваются [21] параллельно с комплексной работой по поэтапному созданию национальной сети интеллектуальных транспортных систем, проводимой в рамках Российской Транспортной стратегии, утверждённой распоряжением Министерства транспорта Российской Федерации № АК-247-р от 30 сентября 2022 г., и работам в рамках

исполнения Указа Президента РФ от 10.10.2019 N 490 (ред. от 15.02.2024) «О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации» (вместе с «Национальной стратегией развития искусственного интеллекта на период до 2030 года»).

Для анализа и оптимизации работы дорожных и строительных машин на данный момент применяются несколько видов нейросетей. Свёрточные нейронные сети (CNN) в основном нацелены на осуществление анализа и обработки поступающих визуальных данных, на распознавание и классификацию объектов (изображений). Технология нейросетей для прогнозного анализа (рекуррентные нейронные сети (RNN, LSTM)) применяется для разработки прогностических моделей, в сфере технической эксплуатации – для предиктивного технического обслуживания машин и прогнозирования сбоев в системах, а также для управления автономными машинами. Для управления механизмами машин на основе данных, поступающих с датчиков, используются гибридные нейросети (End-to-End Learning).

Выводы.

Направления использования технологий ИИ можно разделить на три основные группы: мониторинг состояния автомобильных дорог на основе данных с камер и датчиков дорожных и строительных машин, а также уличных видеокамер; оптимизация маршрутов техники с учётом данных о реальной дорожной обстановке; прогнозирование ситуаций, связанных с технической эксплуатацией техники и дорожной обстановкой. Основное ограничение для использования ИИ в настоящее время – это специфические условия зимнего периода, затрудняющие распознавание состояния дорожного покрытия и разметки. Для повсеместного перехода на технологии ИИ требуются инвестиции, перестройка действующей инфраструктуры и освоение новых стандартов работы по обслуживанию дорог в зимний период. Внедрение ИИ в практику зимнего содержания дорог уже показало свои преимущества и эффективность, что подтверждает тенденцию к дальнейшему переходу к интеллектуальным транспортным системам, «умным» дорогам и автономно работающим дорожно-строительным машинам.

Литература:

1. Мандровский К.П., Садовникова Я.С. Предпосылки к разработке методики обеспечения эффективности противогололёдной обработки покрытий // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2018. № 3(54). С. 54-61.

2. Urbiztondo M., Wu M., Kwon T. J. Advancing winter road maintenance: An AI-driven web platform for real-time road condition monitoring and spatial analysis // Transportation Research Interdisciplinary Perspectives. 2025. Vol. 33. P. 101575. https://doi.org/10.1016/j.trip.2025.101575.

3. Dastjerdi M. H. T., Liu Z., Azmoon B., Yuan X. Enhancing Winter Road Maintenance via Cloud Computing // IEEE Internet Computing. 2023. Vol. 27. Issue 4. Pp. 6-14. DOI: 10.1109/MIC.2023.3265651

4. Jang J. Predicting nighttime black ice using atmospheric data for efficient winter road maintenance patrols // Transportation Research Interdisciplinary Perspectives. 2025. Vol. 29. P. 101299. https://doi.org/10.1016/j.trip.2024.101299.

5. Arcieri W. R., Niemeyer D. C. Operational Factors that Affect Road Salt Usage and the Effectiveness and Efficiency of Salt Spreading Operations and Equipment. Boston, MA, Massachusetts Department of Transportation Office of Transportation Planning, 2016. 119 p.

6. Implementation of Artificial Intelligence to Improve Winter Maintenance. Exploratory Advanced Research Program (U.S.) Report № FHWA-HRT-21-090. United States, Federal Highway Administration, 2021. 3 p.

7. Shahandashti M., Mattingly S., Darghiasi P., Baral A., Abediniangerabi B. Snowplow operations management system. Final Report. FHWA/TX-22/5-6996-01-1. Arlington, Texas. The University of Texas at Arlington. Department of Civil Engineering. 2022. 115 p.

8. Darghiasi P. Digital twin enabled winter operations management through the integration of artificial intelligence, sensory level-data, and publicly available data.

Dissertation Submitted In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy. Arlington, Texas. The University of Texas at Arlington, 2023. 24 p.

9. Haverkamp P., Anantheswar A., May M., Wadlig G., Hildebrandt J., Thiessat K. A., Wollny I., Traverso M., Müller-Mall S., Kaliske M., Habich D., Lehner W. Digital Twin Road: value and implications involving data and application // Discover Applied Sciences. 2025. Vol. 7. No. 510. 21 p. https://doi.org/10.1007/s42452-025-07018-w.

10. Zhu Sh., Peng B; Li D., Bai Y., Liu X., Li Y., Methods for Addressing Pavement Defects Based on Digital Twin Technology-A Case Study of Snow and Water Accumulation on Road Surface // 2024 International Conference on Urban Construction and Transportation (UCT 2024). E3S Web of Conferences. Harbin, China. 2024. Vol. 512. id. 04015. DOI: 10.1051/e3sconf/202451204015.

11. Lee Y. W., Wu M., Kwon T. J. Integrating convolutional neural networks and explainable AI for enhanced winter road surface conditions classification using stationary RWIS imagery //Cold Regions Science and Technology. – 2026. – С. 104832.)

12. Tabrizi S. E., Elizarov J., Farghaly H., Gharabaghi B. Precision salt application using advanced machine learning algorithms to achieve improved road safety and reduced environmental impacts // Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition). 2025. Vol. 12. Issue 3. Pp. 603-615.

13. Karaa M., Ghazzai H., Massoud Y., Sboui L. A computer vision-based framework for snow removal operation routing // IEEE Open Journal of Circuits and Systems. 2024. Vol. 5. Pp. 81-91. DOI 10.1109/OJCAS.2023.3326274.

14. Золотухин А. В. разработка модели нейронной сети для решения задачи распознавания объектов беспилотными погрузчиками / Сборник докладов Международной молодёжной научной конференции, посвященной 60-летию со дня осуществления Первого полета человека в космическое пространство и 90-летию Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева-КАИ XXV Туполевские чтения (Школа молодых ученых). Т. V. Казань, 2021. С. 286-291.

15. Викторова Е.В. Применение нечетких нейронных сетей для технической диагностики дорожных машин // Вестник ХНАДУ. 2012. Вып. 56. С. 98-102.

16. ИИ в землеройной технике [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.bkt-tires.com/ru/ru/blog/agriculture-blog/ii-v-zemleroynoy-tekhnike (дата обращения 05.02.2026).

17. Бугебрин Ш., Михайлов А.В., Казаков Ю.А. Контроль позиционирования ковша экскаватора с применением датчиков // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. 2024. № 25. С. 169-175.

18. Lian K., Hu Z., Long X., Zhang Y., Xie W., Song X. Adaptive neural network tracking control for unmanned electric shovel intelligent excavation system // Frontiers of Mechanical Engineering. 2024. Vol. 19. No. 6. P. 45.

19. Fu T., Zhang T., Cui Y., Song X. Deep Learning-enhanced Intelligent Electric Shovel Digging Trajectory Tracking Control // Journal of mechanical engineering. 2024. Vol. 60 No.16. Pp. 357-366. DOI : 10.3901/JME.2024.16.357.

20. Сухарев Р.Ю. Научные основы автономного управления колесными дорожно-строительными машинами: автореф. дис. … докт. тех. наук: 2.5.11. Омск, 2023. 36 с.

21. Белая книга. Искусственный интеллект в сфере транспорта и логистики. 1-е издание / Коллектив авторов под редакцией Ассоциация «Цифровой транспорт и логистика», Ассоциация «Альянс в сфере искусственного интеллекта». М., 2025. 277 с. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://get-qr.com/content/qH0fw- (дата обращения 06.02.2026).

Ways to improve the efficiency of road and construction machinery using artificial intelligence technologies

Sadovnikova Y.S.[1,a], Mandrovskiy K.P.[2,b]
[1]Expert-Center LLC, Moscow, Russia,
[2]Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia
[a]jana.sadovnikova@yandex.ru, [b]effectmash@mail.ru

Keywords: winter road maintenance, convolutional neural network technology, computer vision, road surface condition sensors, road digital twins, machine learning methods.

Artificial intelligence technologies in the operation of road and construction equipment are being implemented in two main areas: the development of autonomous machines and the equipping of conventional road construction equipment with intelligent onboard systems. Road surface sensors, video surveillance systems, and automatic road weather stations, which provide information necessary for managing winter road maintenance, are widely used to improve machine efficiency. This article examines the latest research aimed at improving the efficiency of machine operation during winter periods, using artificial intelligence methods and algorithms.

УДК 69.05:004.8

Интеллектуальные бетоноотделочные машины: как адаптивное управление меняет строительство

Чуланов А.А. [1,a], Мамаев Л.А.[1,b], Федоров В.С.[1,c.], Федорова К.В.[2,d]
[1] Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия
[2]Санкт-Петербургский государственный экономический университет, наб. канала Грибоедова д. 30-32, литер А. Санкт-Петербург, Россия
[a] lotzip@yandex.ru, [b] mamaevla@yandex.ru, [C] fedorov-v-s@yandex.ru,
[d] fedorova2006kv@gmail.com

Ключевые слова: бетоноотделочная машина, адаптивное управление, интеллектуальная система, автоматизация технологического процесса, машинное зрение, нечеткая логика, нейронные сети, датчики, обратная связь, замкнутый контур управления.

В статье выполнен обзор мировой строительной отрасли, стремление повысить производительность, качество и точность работ сочетается с задачей снижения затрат и зависимости от человеческого фактора. Особенно остро это проявляется при устройстве бетонных полов и покрытий, где бетоноотделочные машины становятся ключевым инструментом на строительной площадке. На смену традиционным подходам приходит новое поколение техники с интеллектуальными системами адаптивного управления. Рассматриваются архитектура интеллектуальной системы адаптивного управления, основные типы датчиков и алгоритмов, а также преимущества и ограничения внедрения таких систем в условиях строительной площадки.

Еще недавно качество отделки бетона почти полностью зависело от опыта оператора, его индивидуальных навыков и физической выносливости. Переутомление, субъективная оценка состояния смеси и различия в квалификации приводили к колебаниям качества на одном и том же объекте. Первой ступенью прогресса стала механизация: двигатели взяли на себя тяжелую работу, но управление режимами оставалось ручным (рис.1) [1, 2, 3].

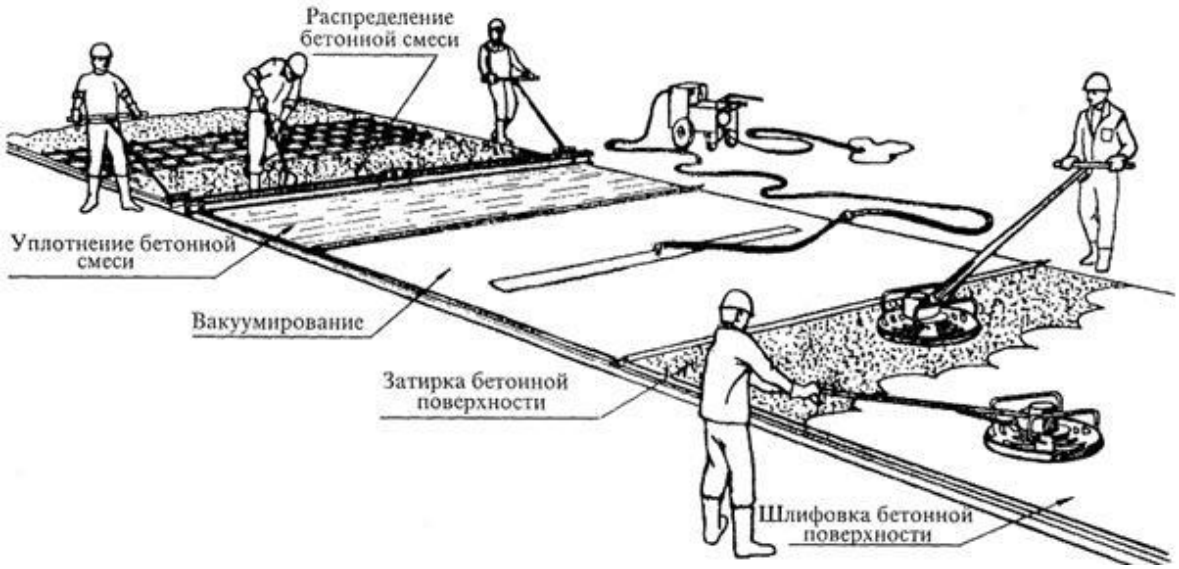


Рис.1. Ручное управление бетоноотделочной машиной

Следующий этап — простая автоматизация (рис2.), позволившая задавать постоянные параметры, такие как скорость вращения роторов и движение машины. Однако такие системы практически не реагируют на изменяющиеся условия: неравномерное уплотнение, изменение влажности и температуры, различия в бетонной смеси или сложную геометрию объекта. Сегодня отрасль движется к комплексной автоматизации с элементами интеллектуализации, когда техника сама адаптируется к среде в режиме реального времени.

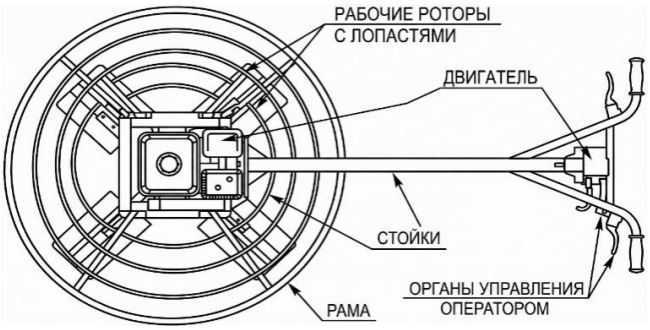


Рис.2. Схема конструкции бетоноотделочной машины с основными узлами

Современные бетоноотделочные машины уже могут автоматически следовать по натянутым проволочным направляющим, используя следящие датчики для обеспечения плоскостности поверхности. (рис. 2) [4]. Более продвинутые решения опираются на лазерное нивелирование, когда приемник отслеживает лазерную плоскость и обеспечивает точное выглаживание по заданному уровню. В верхнем сегменте рынка появляются системы 3D-нивелирования и навигации по GNSS, которые сверяют положение машины с цифровой трехмерной моделью объекта и корректируют работу без физической разметки.

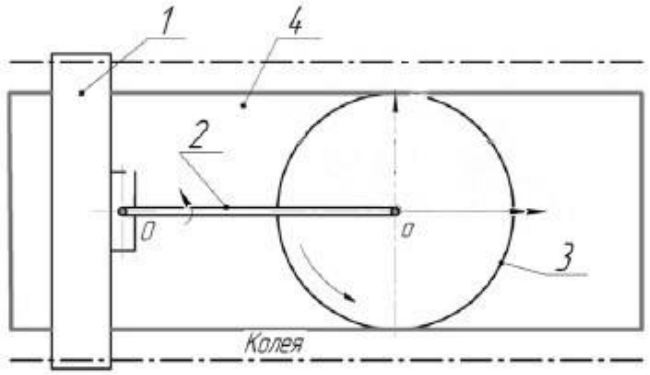


Рис. 3. Схема заглаживания свежеотформованного изделия:
1– портал заглаживающей машины; 2 – водило; 3 – диск вращающийся; 4 – форма с бетонной смесью

В Японии на строительных площадках нашла применение робототехническая система для чистовой затирки и шлифовки бетонных полов (рис. 4). Она является многофункциональным устройством, которое выполняет движение по незастывшему бетону, производит выравнивание уложенного бетона, нанесение настилки, а также выполняет циклевку и окончательную отделку полов. Система представляет собой мобильный строительный робот, имеющий колесное шасси, двухзвенную руку с рабочим инструментом для обработки пола. Диаметр актуатора 102 см. Система работает в автоматическом режиме по программе, в которой задаются требования к геометрическим параметрам обрабатываемой поверхности пола, а также маршрут и скорость перемещений. Для управления движением применяют гидро-компас, путеизмерительное устройство с сенсорными датчиками обнаружения проема и касания боковой поверхности. Система управления на базе микро-ЭВМ обеспечивает автономное движение при управлении от бортовой навигационной системы по данным гидро-компаса и локатора. Скорость перемещения машины изменяется от 0 до 12 м/мин, а ее производительность составляет 200—300 м^2 обрабатываемой поверхности в 1 ч.

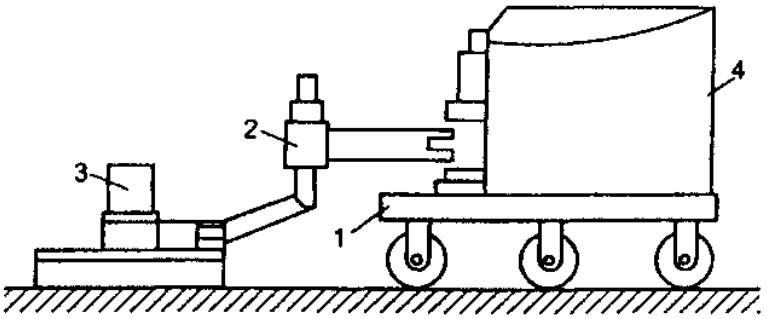


Рис. 4. Робототехническая система для чистовой обработки полов
1 – шасси; 2 – манипулятор; 3 – рабочий инструмент; 4 – силовая установка

Не менее важна автоматизация работы самих рабочих органов. Гидравлические и электромеханические приводы поддерживают стабильную глубину заглубления и угол атаки лопастей, а частотные преобразователи плавно регулируют скорость вращения в зависимости от выбранного этапа — от первичной затирки до финишного глянцевания. При этом ключевую роль начинают играть интеллектуальные датчики, считывающие состояние бетона в реальном времени.

Тензометрические и крутильные датчики оценивают сопротивление вращению лопастей и тем самым косвенно «чувствуют» вязкость и степень схватывания смеси. Акустические и виброакустические сенсоры анализируют шум и вибрации узлов, которые меняются по мере изменения пластичности бетона. Бесконтактные оптические и

инфракрасные датчики позволяют оценивать влажность, температуру и текстуру поверхности, а системы машинного зрения по блеску и структуре определяют готовность к следующему проходу.

Вся эта информация поступает в центральный контроллер — «мозг» интеллектуальной системы адаптивного управления. На уровне алгоритмов могут использоваться как строгие правила («если крутящий момент выше порога, уменьшить скорость и увеличить обороты»), так и нечеткая логика, описывающая переходные состояния бетона словами «пластичный», «начало схватывания» и т.п. В перспективе особую роль играют нейронные сети и машинное обучение, способные обнаруживать сложные зависимости между показаниями датчиков и оптимальными режимами работы (рис. 5).

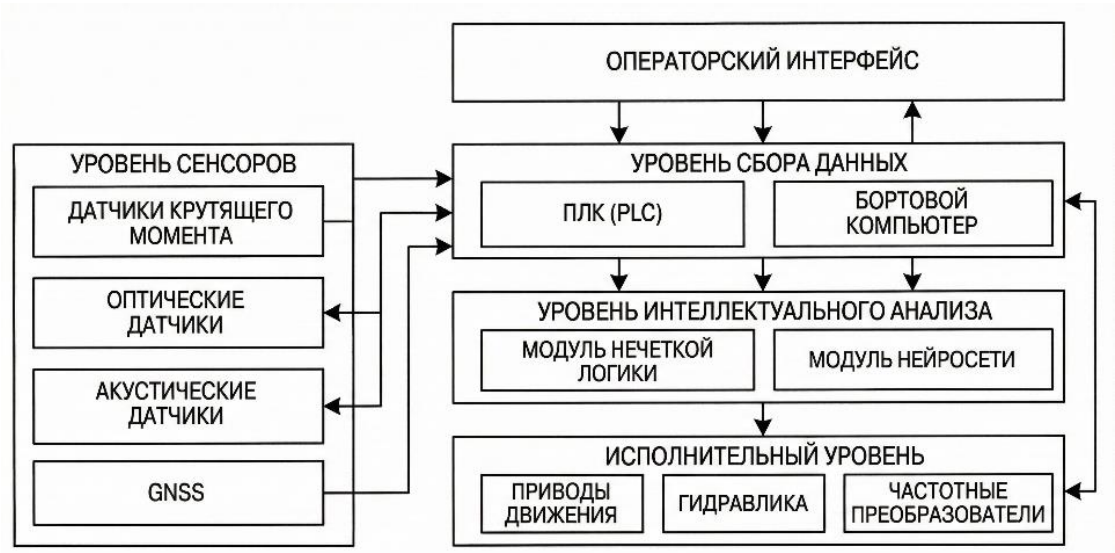


Рис.5. Структурная схема интеллектуальной системы адаптивного управления бетоноотделочной машиной

Как работает адаптивная система на практике. На этапе предварительной обработки система фиксирует высокую пластичность бетона по низкому крутящему моменту и характерной картине с камер и выбирает режим с пониженными оборотами и соответствующей траекторией движения. Цель – удалить излишки влаги и выровнять поверхность. По мере удаления воды датчики отмечают рост сопротивления, и алгоритм распознает переход к следующей фазе.

Далее автоматически изменяются угол атаки лопастей, увеличиваются обороты и при необходимости корректируется скорость перемещения машины [7, 8, 9], чтобы обеспечить оптимальное уплотнение и подготовить основание к финишной обработке. На завершающем этапе обработки система переходит к высоким оборотам при минимальном заглублении, ориентируясь на данные о твердости поверхности и визуальном эффекте, который анализируется средствами машинного зрения (рис. 6).

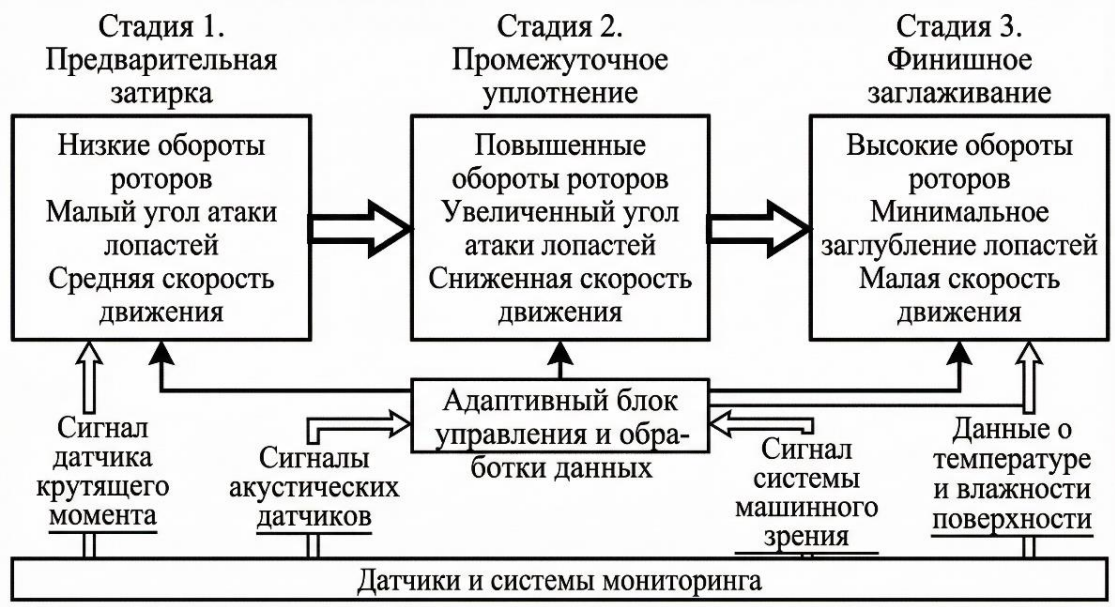


Рис. 6. Схема адаптивного алгоритма работы бетоноотделочной машины по стадиям обработки бетона

Основные выводы и заключение. Для подрядчиков и заказчиков главными аргументами в пользу интеллектуальных систем становятся стабильное качество и однородность покрытия по всей площади. Автоматический подбор оптимальных режимов и траекторий сокращает количество проходов, уменьшает время работ и снижает износ оборудования, экономя топливо и электроэнергию. Параллельно происходит оцифровка процесса: все параметры записываются и могут использоваться для отчетности, анализа и прогнозного обслуживания парка машин.

Еще один важный эффект – изменение роли оператора: он меньше «руководит» машиной и больше контролирует работу автономной системы, что снижает требования к квалификации персонала. Вместе с тем внедрение интеллектуальных систем сопровождается высокими первоначальными затратами и серьезными инженерными задачами. Необходимо создавать точные модели взаимодействия рабочих органов с бетоном и обеспечивать стабильную работу сложных сенсоров в условиях пыли, вибраций и влаги на строительной площадке. К этому добавляется зависимость от качества исходных данных, включая корректность BIM-моделей и однородность поставляемой бетонной смеси [5, 6].

Несмотря на эти ограничения, переход к адаптивной автоматизации выглядит логичным этапом развития строительных технологий в эпоху индустрии. Интеллектуальные бетоноотделочные машины превращают процесс отделки бетона из ремесла, основанного на индивидуальном опыте оператора, в управляемый, прогнозируемый и оцифрованный технологический цикл. Именно за такими системами, объединяющими мехатронику, сенсорику, робототехнику и искусственный интеллект, все больше экспертов связывают рост эффективности и качества в строительной отрасли в ближайшие годы.

Литература:

1. Мамаев, Л. А. Методология совершенствования теории взаимодействия рабочих органов бетоноотделочных машин с поверхностью обрабатываемых сред: дис. … д-ра техн. наук / Л. А. Мамаев. — Братск, 2006. — 320 с.

2. Болотный А.В. Заглаживание бетонных поверхностей. - Л.: Стройиздат, 1979.- 126с.

3. Федоров, В.С Совершенствование процесса и агрегата финишной обработки незатвердевших бетонных поверхностей: дис. канд-а техн.наук / В.С. Федоров. — Братск, 2011. — 193 с.

4. Севастьянов, П. Д. Развитие систем автоматизированного управления на основе технологий информационного моделирования при строительстве линейных объектов / П. Д. Севастьянов // Инженерные исследования в строительстве. — 2023. — № 4.

5. Рада, А. О. Автоматизация мониторинга строительных работ на основе данных лазерного сканирования с БВС / А. О. Рада // Нанотехнологии в строительстве. — 2023. — Т. 15, № 4. — С. 373–382.

6. Баранник, С. В. Применимость BIM-технологий в дорожной отрасли / С. В. Баранник // CAD и GIS для дорог. — 2015. — № 1 (4). — С. 18–25.

7. Сарычев, Д. С. Автоматизированная технология изысканий в строительном контроле / Д. С. Сарычев // Вестник СибАДИ. — 2016.

8. Загороднюк, В. Т., Паршин Д. Я. Строительная робототехника. — М.: Стройиздат, 2006. — 269 с.

9. Зенкевич, С. Л., Ющенко А. С. Управление роботами. Основы управления манипуляционными роботами. - М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. — 400 с.

Intelligent concrete finishing machines: how adaptive control is transforming constructio

Chulanov A.A.[1,a], Mamaev L.A. [1,b], Fedorov V.S. [1,c], Fedorova K.V. [2,d]

[1] Bratsk State University, 40 Makarenko st., Bratsk, Russian Federation

[2] St. Petersburg State University of Economics, nab. 30-32 Griboyedov Canal, letter A. St. Petersburg, Russia

[a] lotzip@yandex.ru,[b] mamaevla@yandex.ru, [C] fedorov-v-s@yandex.ru,

[d] fedorova2006kv@gmail.com

Keywords: concrete finishing machine, adaptive control, intelligent system, technological process automation, machine vision, fuzzy logic, neural networks, sensors, feedback, closed-loop control.

This article provides an overview of the global construction industry, where the drive to enhance productivity, quality, and work precision is coupled with the challenge of reducing costs and dependence on the human factor. This issue is particularly acute in the construction of concrete floors and pavements, where concrete finishing machines have become a key tool on the construction site. Traditional approaches are being replaced by a new generation of equipment equipped with intelligent adaptive control systems. The paper examines the architecture of intelligent adaptive control systems, main types of sensors and algorithms, as well as the advantages and limitations of implementing such systems under real-world construction site conditions.

УДК 629.032

Технико-технологическое обоснование процедуры турбонаддува атмосферного дизельного двигателя ОМ662: на примере силового агрегата автомобиля SsangYongIstana

Иванов В.С.[1,a]
[1]Хакасский государственный университет им. Н.Ф. Катанова, ул. Хакасская 6, Абакан, Россия
[a]Ivanov_vs2020@mail.ru

Ключевые слова: двигатель ОМ662, агрегатный наддув, Ssang Yong Istana, атмосферный дизель, система подачи топлива, интеркулер.

В статье представлено комплексное исследование, посвященное теоретическому обоснованию и практической реализации проекта установки турбокомпрессора на атмосферный дизельный двигатель ОМ662 (2.9 л), применявшийся на микроавтобусе SsangYongIstana. Рассматривается конструктивная специфика штатного атмосферного мотора в сравнении с его турбированным аналогом ОМ662Т, устанавливавшимся на SsangYongMusso. Проведен анализ необходимых модификаций силового агрегата. На основе методов сравнительного анализа и технического моделирования определен перечень обязательных конструктивных изменений, оценены потенциальные риски и ограничения.

Дизельный двигатель ОМ662 производства Mercedes-Benz и его лицензионные копии заслужили репутацию исключительно надежных и долговечных агрегатов. В своей атмосферной версии данный двигатель являлся силовой установкой микроавтобуса Ssang Yong Istana. Однако динамические характеристики автомобиля с таким мотором зачастую не удовлетворяют современных пользователей, особенно в условиях полной загрузки или горной местности. Выходом представляется принудительное увеличение мощности путем установки турбокомпрессора.

Главной ошибкой при попытке газотурбирования является предположение, что двигатели отличаются лишь наличием турбокомпрессора. Анализ технической документации и практики разборки показывает системные различия (табл. 1).

В турбированном двигателе применяется кривошипно-шатунный механизм из более высокопрочного сплава, рассчитанный на повышенные нагрузки от давления сгорания. Поршни агрегатнотурбированного двигателя имеют: усиленные бобышки и более прочные поршневые пальцы; конструктивно иной профиль днища, оптимизированный для агрегатного наддува и снижения степени сжатия. В блоке турбомотора предусмотрены каналы и установлены специальные форсунки, которые под давлением подают масло на внутреннюю поверхность поршней для их охлаждения. В атмосферном блоке эти каналы отсутствуют.

Конструктивно идентичны блоки, однако при форсировании требуется проверка состояния седел и направляющих клапанов.

Агрегатнотурбированный двигатель оснащен маслонасосом повышенной производительности для обеспечения надежной смазки подшипников турбокомпрессора. Масляный поддон и маслоприемник имеют отличия в конструкции для стабильного подвода масла при динамичных нагрузках.

Для атмосферного мотора объемом 2.9 л оптимальным является выбор турбины с относительно небольшим корпусом компрессора, обеспечивающей ранний выход, уже при 1800-2000 об/мин, для компенсации недостатка момента на низких оборотах. Подходящим

донором может служить штатная турбина Garrett с двигателя OM662 от Ssang Yong Musso. Применение турбокомпрессоров большой размерности, характерных для современных двигателей, ограничено существенной инерционностью ротора, что приводит к запаздыванию роста давления наддува на переходных режимах.

Таблица 1

Сравнительная характеристика двигателей на базе OM662

Характеристика	Атмосферный OM662	Турбированный OM662T
Общее обозначение	OM662.9xx (атмосферный)	OM662.9xx (турбированный)
Тип двигателя	Атмосферный	С турбонаддувом
Мощность	94-98 л.с. при 3800-4000 об/мин	118-125 л.с. при 4000 об/мин
Крутящий момент	192-196 Нм при 2000-2200 об/мин	255-280 Нм при 1800-2200 об/мин
Степень сжатия	Высокая (21:1 - 22:1)	Пониженная (17:1 - 18:1)
Поршни	Поршни для атмосферного мотора. Конструкция днища рассчитана на высокую степень сжатия.	Поршни для турбированного двигателя. Днище поршня имеет другую форму, чаще с выемкой для снижения степени сжатия и лучшего смесеобразования
Система охлаждения поршней	Отсутствует	Присутствует
Топливная аппаратура	ТНВД Bosch VE с настройками для атмосферного мотора	ТНВД Bosch VE с настройками для турбированного двигателя
Система смазки	Масляный насос стандартной производительности	Масляный насос повышенной производительности.
Выпускной коллектор	Чугунный, конструкция для отвода газов без избыточного давления	Чугунный, с фланцем для крепления турбокомпрессора
Впускной коллектор	Стандартная конструкция	Конструкция, рассчитанная на подвод воздуха под давлением от турбины
Объем двигателя, $см^3$	2874	2874
Диаметр цилиндра, мм	89	89
Ход поршня, мм	92,4	92,4
Расход топлива, л/100 км	9,8	8,8
Агрегатный наддув	-	Garrett GT2052S

Штатный ТНВД Bosch VE и форсунки атмосферного двигателя не рассчитаны на подачу увеличенной порции топлива. ТНВД должен быть заменен на аналогичный от турбодвигателя. Он имеет иные настройки регулятора и подачи. Форсунки также требуют замены на форсунки от турбированного двигателя. Они имеют другое давление впрыска и характеристики распыла. Регулировка подачи топлива является критическим этапом. Чрезмерное обогащение смеси при повышенном давлении наддува приведет к перегреву, детонации и гарантированному прогару поршней в данном двигателе.

Установка интеркулера «воздух-воздух» обязательна. Снижение температуры на 40-60°C значительно увеличивает плотность воздуха, снижает тепловую нагрузку на двигатель и риск детонации.

Система управления и контроля является неотъемлемой частью, при создании и внедрении турбокомпрессора в двигатель OM662.

При установке турбокомпрессора на двигатель OM662 была проработана техническая часть, а также просчитаны нагрузки на двигатель и на кузов автомобиля. Была произведена замена поршневой группы, разработана система охлаждения и отлажен ТНВД и впрыск топлива. При этом не были внесены изменения в конструкцию автомобиля (рис. 1-4).

При корректной реализации повышение мощности до 120-130 л.с. и крутящего момента до 250-270 Н.м.

Была произведена оценка рисков и экономическая возможность реализации данного проекта. К техническим рискам можно отнести: Прогар поршней, разрушение колец,

залегание турбины из-за недостатка смазки, разрушение кривошипно-шатунного механизма, хронический перегрев. К экономической целесообразности стоит отнести: Стоимость комплекта (турбина, коллектор, интеркулер), нового КШМ, топливной аппаратуры и работ. Проект оправдан только как инженерно-исследовательский проект, при доработке и автоматизации процесса, данную модернизацию можно производить в заводских условиях.

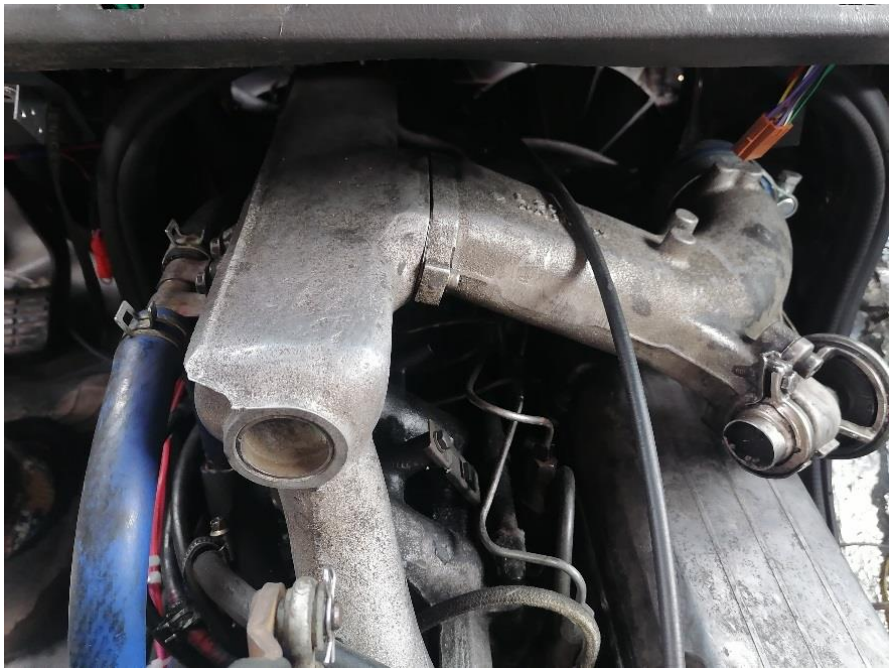


Рис. 1. Впускной коллектор с установленной турбиной

Рис. 2. Установленная система охлаждения воздуха для турбины

Установка турбины на атмосферный двигатель ОМ662 является крайне сложным инженерным проектом, требующим глубокого перестроения силового агрегата. Ключевым выводом исследования является необходимость обязательной замены элементов кривошипно-шатунного механизма и топливной аппаратуры на детали от штатного турбодвигателя. Отсутствие системы масляного охлаждения поршней в атмосферном блоке

является его самым уязвимым местом и накладывает жесткие ограничения на допустимое давление наддува и температурный режим. При эксплуатационном тестировании, автомобиль с установленным турбонаддувом показал хорошие эксплуатационные качества как при использовании в городском режиме, так и при использовании автомобиля на дальние расстояния.

Литература:

1. Нормы расхода топлива и смазочных материалов на автомобильном транспорте // Автомобильный транспорт. – 2008. – № 7. – С. 68-73.
2. Сарбаев, В. А. Некоторые возможности повышения эффективности процессов ТО и ТР лёгких коммерческих автомобилей с дизелями при расширенном применении в эксплуатации специализированного диагностирования / В. А. Сарбаев, А. П. Болдин, А. С. Чусова // Информационные технологии и инновации на транспорте : Материалы 5-ой Международной научно-практической конференции, Орёл, 22–23 мая 2019 года / Под общей редакцией А.Н. Новикова. – Орёл: Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева, 2020. – С. 366-368.
3. Свержевсая, Н. В. Особенности маркировка кузова (рамы) автомобилей марки Ssangyong / Н. В. Свержевсая, И. С. Щербаков // Производство судебных автотехнических экспертиз : Материалы всероссийской научно-практической конференции, Иркутск, 26 мая 2017 года. – Иркутск: Восточно-Сибирский институт Министерства внутренних дел Российской Федерации, 2017. – С. 18-24.
4. Мотор Шоу-2005 // Металлург. – 2005. – № 10. – С. 77-79.

Technical and technological substantiation of the turbocharging procedure for the OM662 atmospheric diesel engine: using the example of the SsangYong Istana power unit

Ivanov V.S.[1,a]
[1]Khakassky State University named after N.F. Katanov, 6 Khakasskaya Street, Abakan, Russia
[a]Ivanov_vs2020@mail.ru

Keywords: OM662 engine, turbocharging, SsangYong Istana, naturally aspirated diesel, fuel supply system, intercooler.

The article presents a comprehensive study on the theoretical justification and practical implementation of the project to install a turbocharger on the OM662 (2.9 L) naturally aspirated diesel engine used in the SsangYong Istana minibus. The article examines the design specifics of the naturally aspirated engine in comparison with its turbocharged counterpart, the OM662T, which was installed in the SsangYong Musso. The article analyzes the necessary modifications to the power unit. Based on comparative analysis and technical modeling methods, the article identifies the required design changes and assesses potential risks and limitations.

УДК 681.5:666.972.017:004.89

Адаптивные системы управления технологическим оборудованием смесительных установок: оборудование, технологии, история и перспективы

Соловьев К.А.[1,a], Федоров В.С.[1,b], Федорова К.В.[2,c], Орлов В.А., Усов Е.Э.
[1]Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия
[2]Санкт-Петербургский государственный экономический университет, наб. канала Грибоедова д. 30-32, литер А. Санкт-Петербург, Россия
[a]solovev.k.a-16@yandex.ru, [b] fedorov.v.s@yandex.ru, [c] fedorova2006kv@gmail.com

Ключевые слова: адаптивная система управления, бетоносмесительная установка, технологическое оборудование, автоматизация, реологические свойства, датчики, искусственный интеллект.

Адаптивные системы управления технологическим оборудованием смесительных установок рассматриваются как ключевой инструмент обеспечения стабильности реологических свойств бетонной смеси. Производство товарного бетона сталкивается с проблемой изменчивости свойств исходных материалов, колебаний температуры и влажности, что приводит к нестабильности качества продукции. В настоящей работе предложена структура адаптивной системы управления с многоуровневыми контурами коррекции, включающими прогнозирование параметров смеси, онлайн-контроль реологических свойств и самообучение на основе накопленных данных. Проведен анализ исторического развития систем управления от ручного управления 1950-х годов до современных интеллектуальных систем, описано оборудование адаптивных систем (датчики, исполнительные механизмы, контроллеры), формализованы базовые алгоритмы коррекции дозирования и определены перспективы развития на основе искусственного интеллекта, цифровых двойников и концепции Индустрии 4.0. Научная новизна заключается в комплексном подходе к построению адаптивной системы управления, интегрирующей традиционные методы автоматизации с современными технологиями машинного обучения и предиктивной аналитики.

Введение.

Современное производство товарного бетона предъявляет жесткие требования к стабильности реологических свойств бетонной смеси, поскольку именно они определяют удобоукладываемость, прокачиваемость и качество готовых конструкций [1]. Адаптивные системы управления технологическим оборудованием смесительных установок становятся ключевым инструментом обеспечения требуемых свойств смеси в условиях изменчивости сырья и внешних факторов.

Проблема вариативности качества бетонных смесей остается актуальной на протяжении последних десятилетий. По данным различных исследований [2, 3], доля некондиционных замесов при традиционном программном управлении составляет 15–20 %, что приводит к значительному перерасходу материалов и снижению экономической эффективности производства. Основными факторами нестабильности являются изменчивость влажности заполнителей (от 2 до 8 % в зависимости от условий хранения), колебания температуры окружающей среды (от –30 до +35 °С в российских условиях), неоднородность гранулометрического состава инертных материалов и вариативность активности цемента различных партий [2, 6].

Целью настоящего исследования является разработка и обоснование структуры эффективной адаптивной системы управления технологическим оборудованием

смесительных установок, способной обеспечить непрерывный контроль и коррекцию реологических характеристик бетонной смеси в процессе производства.

Задачи исследования:

1. Проанализировать историческое развитие систем управления бетоносмесительными установками и выявить предпосылки перехода к адаптивным подходам.
2. Систематизировать современное оборудование адаптивных систем управления (датчики, исполнительные механизмы, контроллеры).
3. Формализовать базовые алгоритмы адаптивного управления процессом приготовления бетонной смеси.
4. Определить перспективные направления развития адаптивных систем на основе искусственного интеллекта и концепции цифровых двойников.

Результаты исследований и их обсуждение.

Производство товарного бетона предъявляет жёсткие требования к стабильности реологических свойств бетонной смеси, от которых напрямую зависят удобоукладываемость, насосаемость и качество возводимых конструкций [1]. На протяжении десятилетий производители бетона сталкиваются с одной и той же проблемой: даже при формально одинаковых рецептурах фактические свойства смесей заметно различаются из-за изменчивости сырья, колебаний температуры, влажности заполнителей и нестабильности технологических режимов [2]. При этом традиционные системы управления, ориентированные на повторение заранее заданных алгоритмов дозирования и смешения, оказались недостаточно чувствительными к этим изменениям, что привело к поиску более гибких, адаптивных подходов [3].

Историческое развитие систем управления бетоносмесительными установками хорошо показывает, как постепенно формировалась потребность в адаптивности. На ранних этапах, когда преобладало ручное и релейно-контакторное управление, оператор практически полностью определял качество смеси: он по месту и по опыту корректировал дозы воды, цемента и добавок, ориентируясь на визуальную оценку консистенции [2]. Это давало определённую гибкость, но делало процесс крайне зависимым от человеческого фактора и приводило к значительным колебаниям характеристик бетона, а также к перерасходу цемента и добавок. Переход к пневмоавтоматике позволил автоматизировать последовательность операций и повысить повторяемость циклов, однако системы по-прежнему были «глухими» к реальному состоянию сырья и смеси: они лишь точнее выполняли заданные команды, не анализируя, к каким реологическим свойствам это приводит [3]. С появлением микропроцессорной техники и программируемых логических контроллеров ситуация принципиально изменилась: стало возможно не только управлять отдельными механизмами, но и собирать, хранить и анализировать данные о дозировании, температуре, влажности и других параметрах процесса [4]. Это дало основу для построения более сложных алгоритмов, которые учитывают, например, измеренную влажность заполнителей и автоматически пересчитывают требуемое количество воды, а также корректируют время смешения в зависимости от типа смеси и требуемых свойств [5]. На этом этапе формируются полнофункциональные АСУ ТП, интегрирующие дозирование, смешение, подогрев, учёт и отчасти логистику, но в большинстве случаев они всё ещё работают по принципу программного управления с ограниченной обратной связью по качеству [3].

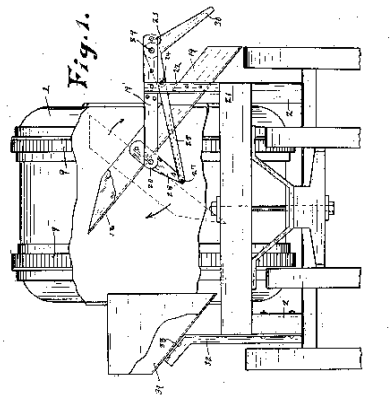


Рис. 1. Бетоносмеситель 1908 г.

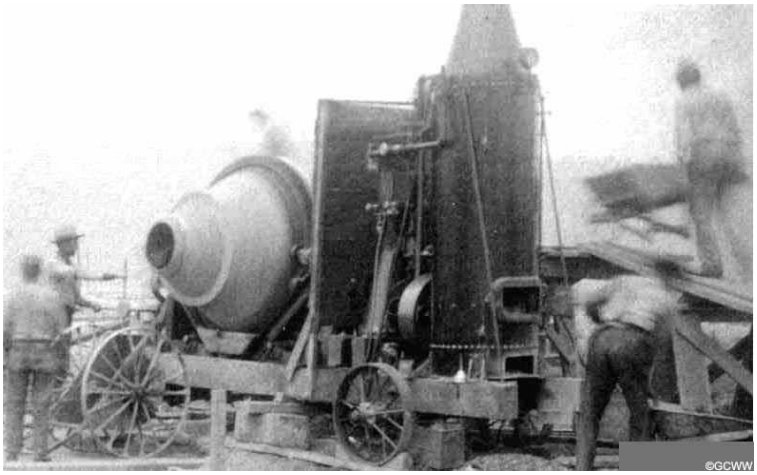


Рис. 2. Бетоносмеситель 1920 г.

В бетоносмесителе используется вращающийся барабан с отдельными приемными и разгрузочными отверстиями на противоположных концах, неподвижный бункер, разгрузочный конец которого находится в одном из отверстий барабана, рычаги, соединенные с несущей рамой барабана и выступающие в барабан с разгрузочной стороны, а также поворотный желоб с возможностью изменения угла наклона вручную. А так же используется комбинация вращающегося барабана с отдельными приемными и разгрузочными отверстиями на противоположных концах, стационарного бункера, загрузочный конец которого находится в одном из отверстий барабана, стационарного желоба, закрепленного снаружи рядом с противоположным концом барабана, кронштейнов, соединенных с рамой барабана и выступающих в барабан только со стороны разгрузочного отверстия, и наклонного желоба, закрепленного на внутренних концах кронштейнов и контактирующего с неподвижным желобом.

Дальнейшее развитие этих решений закономерно привело к идее адаптивного управления, когда система не просто выполняет рецептуру и цикл, а непрерывно оценивает состояние оборудования, сырья и самой смеси, подстраивая свои действия [1]. Такая система опирается на развитый комплекс оборудования: тензометрические весы для цемента, инертных материалов и воды обеспечивают высокоточное дозирование (точность до ±0.5-1%), датчики уровня контролируют запасы сырья, а влагомеры и термодатчики фиксируют критически важные параметры, влияющие на водоцементное отношение и реологию [6]. Дополняют картину специальные средства мониторинга консистенции — измерение момента на валу смесителя, анализ потребляемой мощности привода, иногда акустические или вибрационные датчики, а в более продвинутых системах — встроенные реометрические зонды и элементы машинного зрения [7]. Совокупность этих сигналов даёт возможность оценивать реальные свойства смеси не только по результатам лабораторных испытаний, но прямо в ходе замеса.

Не менее важную роль в адаптивной системе играют исполнительные механизмы и архитектура управления. Быстродействующие затворы дозаторов (время срабатывания менее 0.5 секунды), частотно-регулируемые приводы смесителей и транспортеров (диапазон регулирования 10-100% номинальной скорости), а также гибкая логика ПЛК позволяют реализовать упреждающие и корректирующие действия с учётом инерционности оборудования и задержек при срабатывании [4]. Например, алгоритм может заранее закрыть затвор, учитывая «хвост» материала, который продолжит стекать по инерции, или автоматически скорректировать время смешения, ориентируясь на достижение устойчивого значения момента на валу, соответствующего требуемой вязкости [5]. Над всем этим уровнем работают SCADA-системы, обеспечивающие визуализацию процесса, архивирование данных, формирование отчётности и возможность удалённого доступа, что

особенно важно при внедрении сложных адаптивных алгоритмов, требующих мониторинга и периодической перенастройки [4].

Адаптивная система управления БСУ опирается на развитый комплекс измерительного, исполнительного и вычислительного оборудования (табл. 1).

Таблица 1

Основное оборудование адаптивных систем управления БСУ

Тип оборудования	Назначение	Технические характеристики
Тензометрические весы	Высокоточное дозирование компонентов	Точность ±0,5–1 %, диапазон 0–5000 кг
Влагомеры	Измерение влажности заполнителей	СВЧ-диапазон, точность ±0,3 %, время отклика <2 с
Термодатчики	Контроль температуры материалов	Pt100, диапазон –40...+120 °C, точность ±0,2 °C
Датчики момента	Мониторинг консистенции смеси	Измерение крутящего момента 0–2000 Н·м
Частотно-регулируемые приводы	Управление скоростью смешения	Диапазон регулирования 10–100 %
ПЛК	Реализация алгоритмов управления	Время цикла <10 мс, 32-битная обработка
SCADA-системы	Визуализация и архивирование	Веб-интерфейс, SQL-база данных

Логичным продолжением накопления измерительной и вычислительной базы стало развитие собственно адаптивных технологий управления. Если изначально коррекция ограничивалась учётом влажности заполнителей и сезонной настройкой температурных режимов, то сегодня речь идёт о многоуровневых контурах, где прогноз состава и свойств смеси, онлайн-измерения и статистический анализ связаны в единую систему [1, 3]. На этапе задания рецептуры система может использовать исторические данные и модели для прогнозирования необходимой корректировки доз воды и добавок в зависимости от текущих характеристик материалов и погодных условий. В ходе замеса она отслеживает динамику момента на валу смесителя и других косвенных показателей, сравнивает их с эталонными кривыми и при необходимости выполняет до-дозирование жидкости или пластификатора, а также изменяет продолжительность или интенсивность смешения [6]. После выгрузки данные о фактических параметрах цикла и результатах контроля качества попадают в архив и используются для уточнения моделей и алгоритмов в последующих циклах [3].

Математическая основа адаптивного управления включает несколько ключевых элементов. Базовый алгоритм коррекции дозирования воды с учётом влажности заполнителей описывается формулой 1:

$$m_{вода\backslash корр} = m_{вода\backslash расч} - \sum_i \cdot W_i, \quad (1)$$

где $m_{вода\backslash корр}$ – скорректированная масса воды, $m_{вода\backslash расч}$ – расчётная масса воды по рецептуре, m_i – масса i-го заполнителя, W_i – измеренная влажность i-го заполнителя. Критерий окончания смешения на основе анализа момента формулируется как достижение устойчивого значения: $M(t) \approx M_{уст} + \Delta M$, где $M(t)$ – текущий момент на валу смесителя,

$M_{уст}$ – установившееся значение момента, ΔM – допустимое отклонение (обычно 2-3% от номинального значения)[6].

Компенсация инерционности оборудования реализуется через модель упреждающего управления 2:

$$t_{откл} = t_{расч} - t_{зад} - \frac{m_{ост}}{Q}, \quad (2)$$

где $t_{откл}$ – момент отключения подачи, $t_{расч}$ – расчётное время достижения заданной массы, $t_{зад}$ – задержка срабатывания затвора, $m_{ост}$ – масса материала, остающаяся в дозаторе после закрытия затвора, Q – средняя скорость истечения [4]. Эти алгоритмы работают в замкнутом контуре с обратной связью, где целевыми показателями выступают реологические параметры смеси, а управляющими воздействиями – дозировки компонентов и режимы смешения.

Такой подход сближает современные системы управления бетоносмесительными установками с общими трендами Индустрии 4.0 и «цифрового завода». Производитель больше не ограничивается локальной оптимизацией одного узла, а рассматривает смесительную установку как часть киберфизической системы, в которой оборудование, датчики, программное обеспечение и внешние информационные системы (ERP, логистика, BIM-модели объектов) взаимодействуют в реальном времени [8]. Это позволяет, например, формировать задания на производство на основе данных из проектной модели здания, учитывать планируемые условия укладки бетона на объекте и время сохранения технологичности смеси, а затем возвращать в цифровую модель фактические сведения о свойствах каждой партии. В результате появляется возможность прослеживаемости качества от момента приготовления до эксплуатации конструкции, что важно как для управления рисками, так и для соблюдения нормативных требований [3].

Рис. 3. Схематическая блок-схема адаптивной системы управления бетоносмесительной установкой

Перспективы дальнейшего развития адаптивных систем управления смесительными установками во многом связаны с внедрением методов искусственного интеллекта, анализа больших данных и концепции цифровых двойников [8, 9].

Большие объёмы архивной информации о замесах, рецептурах, сырье и условиях работы создают благодатную основу для применения алгоритмов машинного обучения, которые способны выявлять скрытые закономерности и строить более точные модели

зависимости реологических свойств от множества факторов. На этой основе возможно создавать самообучающиеся системы управления, которые постепенно уменьшают потребность в ручных настройках, адаптируются к новым материалам и технологиям и более устойчиво реагируют на внешние возмущения [9]. Глубокое обучение (Deep Learning) позволяет прогнозировать реологические свойства с точностью более 95%, что существенно превосходит традиционные регрессионные модели. Обучение с подкреплением (Reinforcement Learning) даёт возможность автоматически оптимизировать стратегии управления без необходимости ручной настройки параметров регуляторов [9].

Схема работает как замкнутая система с обратной связью: по заданию на партию модуль прогнозирования формирует уставки и предварительно корректирует рецептуру, затем дозаторы отмеряют компоненты, а блок коррекции автоматически пересчитывает воду и добавки по фактической влажности и температуре материалов. Во время замеса смеситель постоянно «наблюдается» датчиками момента/мощности (и при необходимости другими сенсорами), а адаптивный регулятор сравнивает текущую динамику с целевым профилем и в реальном времени меняет время/интенсивность смешения или даёт команду на до-дозирование. Все сигналы и команды проходят через ПЛК/SCADA, а результаты контроля качества и параметры цикла сохраняются в архив, чтобы модели и настройки адаптации уточнялись и повышали точность управления в следующих партиях.

В параллель развивается идея цифрового двойника бетоносмесительной установки — виртуальной модели, синхронизированной с реальной, на которой можно безопасно тестировать новые алгоритмы управления, прогнозировать последствия изменений в рецептуре или оборудовании и оптимизировать графики технического обслуживания [10]. Цифровой двойник включает в себя математические модели всех ключевых процессов (дозирование, смешение, структурообразование), постоянно калибруется по данным реального производства и позволяет проводить виртуальные эксперименты без остановки производства и риска получения брака. Прогнозирование отказов оборудования на основе анализа трендов параметров (температура подшипников, вибрация, токи электродвигателей) позволяет перейти к предиктивному техническому обслуживанию, снижая простои на 20-30% [10].

Развитие онлайн-сенсорики реологических параметров является ещё одним приоритетным направлением. Их внедрение позволит перейти от косвенных оценок (момент на валу, потребляемая мощность) к прямому управлению реологическими характеристиками, что повысит точность и надёжность адаптивных систем.

Не стоит забывать и о ресурсосберегающем и экологическом аспекте, который становится всё более значимым в бетонной отрасли. Более точное и гибкое управление дозированием и реологией позволяет снизить перерасход цемента на 3-5%, воды на 2-3%, химических добавок на 10-15%, уменьшить долю некондиционных замесов с 15-20% до 2-5% и связанного с ними возвратного бетона, а также оптимизировать энергопотребление смесителей и систем подогрева на 5-8% [2, 3]. Это не только улучшает экономику производства (суммарный экономический эффект составляет 8-12% снижения себестоимости), но и уменьшает углеродный след, что соответствует международным тенденциям по декарбонизации строительных материалов. С другой стороны, адаптивные системы создают предпосылки для более широкого использования вторичных и альтернативных материалов (золы, шлаков, рециклированных заполнителей), компенсируя их повышенную вариативность за счёт более точного управления процессом [3].

Архитектура киберфизической системы для управления бетонными заводами включает несколько уровней. Полевой уровень представлен датчиками и исполнительными механизмами с интерфейсами промышленного Интернета вещей (IIoT). Edge-уровень обеспечивает локальную обработку данных и управление в реальном времени с минимальными задержками. Облачный уровень выполняет функции хранения больших

данных, машинного обучения и аналитики на основе данных множества заводов. Уровень приложений предоставляет операторам дашборды, мобильные приложения и системы поддержки принятия решений [8, 9]. Такая архитектура обеспечивает масштабируемость решений: алгоритмы и модели, обученные на данных одного завода, могут быть адаптированы и применены на других предприятиях сети, что ускоряет внедрение лучших практик.

Рис. 4. Эволюция смесителей от 1900 г. до современного мира

Эволюция идёт от тяжёлого механического смесителя Koehring с ручными приводами и открытыми шестернями (1900г), через мобильный наклонный барабанный смеситель с двигателем (1970 г.), к современному адаптивному программируемому агрегату с датчиками, автоматическим дозированием и цифровым управлением, обеспечивающему стабильное качество бетонной смеси.

Выводы.

В итоге развитие адаптивных систем управления технологическим оборудованием смесительных установок можно рассматривать как естественный этап эволюции автоматизации бетонных заводов: от жёстко запрограммированных циклов к интеллектуальным, самонастраивающимся решениям, ориентированным на конечное качество смеси, а не только на воспроизведение рецептуры [1, 3]. Исторический опыт показывает, что каждое поколение технологий управления снижало роль случайности и человеческого фактора — точность дозирования выросла с ±10-15% в 1950-е годы до ±0.5-1% в настоящее время, доля некондиционных замесов снизилась с 25-30% до 2-5%, а современные адаптивные подходы позволяют существенно сократить вариации реологических свойств, сократить потери и повысить устойчивость производства. В дальнейшем успех этих систем будет зависеть от доступности надёжных средств онлайн-контроля реологии, зрелости нормативной базы (стандарты на методы онлайн-контроля, требования к точности и надёжности систем, протоколы обмена данными) и готовности производителей интегрировать свои БСУ в более широкие цифровые экосистемы, нацеленные на качество, эффективность и экологическую ответственность [3, 8].

Приоритетные направления дальнейших исследований включают разработку надёжных встроенных датчиков реологических параметров для работы в условиях промышленного смесителя, создание универсальных математических моделей, учитывающих широкий диапазон составов и условий производства, разработку алгоритмов машинного обучения для самообучающихся систем управления, формирование нормативно-методической базы и стандартов на методы онлайн-контроля реологии, а также создание отраслевых платформ для обмена данными и лучшими практиками между предприятиями. Эти направления в совокупности позволят реализовать концепцию полностью автономного

управления качеством бетонной смеси, где система самостоятельно адаптируется к изменениям сырья и условий, обеспечивая стабильно высокое качество продукции при минимальных затратах ресурсов и участии человека.

Литература:

1. Roussel N. Understanding the Rheology of Concrete. – Cambridge: Woodhead Publishing, 2012. – 368 p.
2. Автоматизированная система управления бетоносмесительной установкой: Производственно-техническое издание по автоматизации бетонных заводов. – 2023.
3. Современное состояние и перспективы систем автоматизации бетонных заводов [Электронный ресурс]. – Fastwel, 2023. – Режим доступа: https://www.fastwel.ru/solutions/sovremennoe-sostoyanie-i-perspektivy-sistem-avtomatizatsii-betonnykh-zavodov/ (дата обращения: 11.03.2026).
4. Система управления бетоносмесительной установкой [Электронный ресурс]. – М.: СТА.ru, 2003. – Режим доступа: https://www.cta.ru/articles/cta/otrasli/promyshlennost-stroymaterialov/125275/ (дата обращения: 11.03.2026).
5. АСУ ТП бетоносмесительной установки [Электронный ресурс] // Журнал ИСУП. – 2025. – Режим доступа: https://isup.ru/articles/5/313/ (дата обращения: 11.03.2026).
6. Автоматизация процесса приготовления бетонной смеси как средство повышения эффективности производства [Электронный ресурс]. – Брест: БГТУ, 2021. – Режим доступа: https://tbsm.bstu.by/wp-content/uploads/2021/04/avtomatizatsiya-protsessa-prigotovleniya-betonnoy-smesi.pdf (дата обращения: 11.03.2026).
7. Koehler E.P., Fowler D.W. Summary of Concrete Workability Test Methods. – Austin: University of Texas at Austin, ICAR Report, 2003.
8. БСУ: автоматическое дозирование цемента, заполнителей, воды [Электронный ресурс]. – Inner.su, 2025. – Режим доступа: https://inner.su/articles/betonosmesitelnaya-ustanovka-bsu-dozirovanie-komponentov-i-avtomatizatsiya/ (дата обращения: 11.03.2026).
9. Chen M., Mao S., Liu Y. Big Data: A Survey // Mobile Networks and Applications. – 2014. – Vol. 19, No. 2. – P. 171–209.
10. Grieves M., Vickers J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems // Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems. – Cham: Springer, 2017. – P. 85–113.
11. Ефремов И.М., Лобанов Д.В. Исследование и информационно-аналитический обзор современных технических решений в конструировании новых вибробетоносмесительных машин // Mechanics Development Issues: Materials of the International Conference. – Ulaanbaatar, Mongolia: Mongolian University of Science and Technology, 18–20 June 2009. – P. 209–213.

Adaptive Control Systems for Technological Equipment of Mixing Plants: Equipment, Technologies, History, and Prospects

Solovev K.A. [1, a], Fedorov V.S. [1, b],Fedorova K.V. [2, c] Orlov V.A., Usov E.E.
[1] Bratsk State University, Makarenko St., 40, Bratsk, 665709, Russia
[2] St. Petersburg State University of Economics, nab. 30-32 Griboyedov Canal, letter A. St. Petersburg, Russia
[a] solovev.k.a-16@yandex.ru, [b] fedorov.v.s@yandex.ru, [c] fedorova2006kv@gmail.com

Keywords: adaptive control system, concrete mixing plant, technological equipment, automation, rheological properties, sensors, artificial intelligence.

Adaptive control systems for the technological equipment of mixing plants are regarded as a key tool for ensuring the stability of the rheological properties of concrete mixtures. The production of ready-mix concrete faces challenges associated with variations in the properties of raw materials, as well as fluctuations in temperature and humidity, which lead to instability in product

quality. In this work, a structure of an adaptive control system with multi-level correction loops is proposed, incorporating mixture parameter forecasting, online monitoring of rheological properties, and self-learning based on accumulated data. The historical evolution of control systems from manual operation in the 1950s to modern intelligent systems is analyzed, the equipment used in adaptive systems (sensors, actuators, controllers) is described, basic dosing correction algorithms are formalized, and development prospects based on artificial intelligence, digital twins, and the Industry 4.0 concept are outlined. The scientific novelty lies in a comprehensive approach to the design of an adaptive control system that integrates traditional automation methods with modern machine learning technologies and predictive analytics.

УДК 629.3 (075.32)

Формирование критерия гарантированной безопасности при обосновании эксплуатационных свойств транспортных средств

Карагодин В.И.[1,a], Шилимов М.В.[1,b], Кубышев В.Л.[2,c]
[1]Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Ленинградский пр-кт, 64, Москва, Россия
[2] ПАО «Дальневосточное морское пароходство»
ул Новокузнецкая, д. 7/11, стр. 1, Москва, Россия
[a] bik250248@yandex.ru; [b] mshilimov@mail.ru; [c] Kubyshev@bk.ru

Ключевые слова: транспортные средства, эксплуатационные свойства, крупногабаритные и тяжеловесные грузы, модульные прицепы, гарантированная безопасность.

В статье рассмотрены проблемы обоснования комплекса эксплуатационных свойств автопоездов с модульными прицепами для перевозки крупногабаритных и тяжеловесных грузов (КТГ). Математическая модель задачи обоснования комплекса эксплуатационных свойств автопоездов включает критерий (целевую функцию) и совокупность ограничений. В качестве критерия принята гарантированная безопасность, предполагающая отсутствие аварий по причинам, основные их которых сформулированы в статье. Ограничениями, определяющими область допустимых решений задачи, служит совокупность параметров, влияющих на безопасность перевозок КТГ автомобильным транспортом. С помощью энтропийного метода выполнен расчет весовых коэффициентов для 43-х параметров, объединенных в три группы. Информационное обеспечение решения задачи максимизации гарантированной безопасности перевозок КТГ при условиях регламентации остальных эксплуатационных свойств автопоездов с модульными прицепами сведено к стандартной задаче многофакторного корреляционно-регрессионного анализа.

Введение.

Эксплуатационные свойства – это совокупность характеристик объекта (системы и т.п.), определяющих его способность выполнять заданные функции в определённых условиях эксплуатации в течение заданного времени. Е.С. Кузнецов отмечает, что эксплуатационные свойства автомобиля закладываются при проектировании и производстве, реализуются (причем в разной степени) при производстве и в эксплуатации [1].

Учитывая большие сухопутные территории нашей, а также близлежащих стран, на практике возникает потребность выполнять перевозки грузов массой от 40 до 1600 т

автомобильным транспортом на расстояния до 3500 км. Перевозка крупногабаритных и тяжеловесных грузов (КТГ) на модульных прицепах в составе автопоезда требует использования трех- или четырехосных седельных или балластных тягачей с мощностью двигателя от 386 кВт (525 л.с.) и колесной формулой 6х4 или 8х4. В особо тяжелых условиях выполняется движение двойной или тройной тягой с подталкиванием и использованием тягачей с колесной формулой 8х8. Современные прицепы выполняются модулями по 4, 5 и 6 осей, имеют допускаемые нагрузки до 45 т/ось и на практике для движения по дорогам общего пользования соединяются в группы по 20 – 24 оси в длину и по 1,5 – 2 модуля в ширину [2].

Из западной практики, например [3, 4] пришли такие термины как «файл» и «линия». Некоторые отдельно поставляемые модульные прицепы имеют возможность рассоединения по ширине, в результате чего получаются как бы 2 «половинки», называемые файлами. Их прикрепляют к модульным прицепам исключительно для увеличения устойчивости груженых автопоездов и равномерного распределения нагрузок на дорожные одежды. «Линиями» называют количество модулей, установленных в ширину.

В работе [2] эксплуатационные свойства автопоездов с модульными прицепами для перевозки КТГ объединены в шесть подсистем, которые обладают прямыми и обратными связями: безопасность, функциональное соответствие, надежность, ресурсопотребление, социально значимые свойства, экономическая эффективность. Предлагаемая систематизация и классификация эксплуатационных свойств автопоездов с модульными прицепами для перевозки КТГ основана на принципе доминирования безопасности перевозок; все остальные свойства должны быть обеспечены на том уровне, который для них регламентирован, а при отсутствии регламентации – достаточен для удовлетворения требований по безопасности.

Формирование критерия гарантированной безопасности.

В качестве критерия оценки безопасности перевозок КТГ предлагается *гарантированная безопасность*, которая представляет собой вероятность безаварийной доставки КТГ в пункт назначения.

Вероятность $P_{гб}$ безаварийной доставки КТГ рассматривается как произведение независимых событий, состоящих в отсутствии причин для аварий и характеризуемых вероятностями наступления этих событий:

$$P_{гб} = 1 - \prod_{i=1}^{m} (1 - P_i), \quad (1)$$

где P_i – вероятность аварии по i-й причине.

Причинами аварий при перевозке КТГ автопоездами-тяжеловозами могут быть:

– опрокидывание;

– утрата возможности дальнейшего движения в связи с потерей тяговых и сцепных (с дорогой) свойств;

– наезд на препятствие, как автопоездом, так и грузом, ввиду конструктивных особенностей (т.е. без учета фактора невнимательности водителя) выбранной конфигурации транспортного средства;

– потеря конструктивной прочности и разрушение элементов конструкции автопоезда или крепления груза;

– потеря несущей способности и разрушение грунтов, дорожных одежд, искусственных сооружений – капитальных или их временного усиления;

– столкновение транспортных средств по причине человеческого фактора, вызванное другими, менее опытными, участниками дорожного движения

В данный перечень не внесены ошибки водителя транспортного средства, выполняющего перевозки КТГ. Проблематика и подробное рассмотрение системы «ВАДС» является отдельной темой исследований [5, 6], где постоянное повышение требований к

управлению транспортным средством требует все большей технической грамотности водителей при постоянной необходимости снижения общего количества ДТП.

Также из рассмотрения необходимо исключить происшествия, связанные с несущей способностью грунтов и искусственных сооружений. При этом необходимо заметить, что основой для проведения комплексных риск-ориентированных оценок безопасности [7] служат в том числе и эксплуатационные свойства транспортных средств.

Как правило, модульный автопоезд обслуживается не одним водителем, а бригадой водителей, прицепщиков, мастеров по погрузке и ИТР автотранспортных предприятий. Это весьма опытные специалисты, не склонные к групповому риску, хорошо знающие технические характеристики вверенной им техники. Их деятельность строго регламентирована инженерными расчетами автотранспортного предприятия, а зачастую и заказчика, службами безопасности дорожного движения.

Предполагается, что выполнение всех требований научно-технической документации обеспечивает заданный уровень безопасности, при котором происшествие является маловероятным событием. В целом, все рассмотренные за последние годы в профессиональной среде случаи аварий являются следствием инженерных просчетов при выходе за предельные значения эксплуатационных параметров груженых автопоездов.

Определение весовых коэффициентов параметров эксплуатационных свойств.

Перевозки КТГ на модульных прицепах характеризуются индивидуальным подходом к каждому отдельному грузу, и сконфигурированный автопоезд имеет свои, присущие только ему эксплуатационные характеристики, рассчитываемые, например, при помощи программы [8]. С этой целью ранее полученные статистические данные [9] по 233 единицам перевезенных КТГ дополнены информацией об индивидуальных эксплуатационных свойствах подвижного состава.

В программе [8] реализация эксплуатационных свойств груженого автопоезда рассчитывается в двух режимах:

«Тяжелый» – трогание в подъем на грунтовой дороге и установившееся движение со скоростью 2,5 км/ч на пониженной передаче;

«Дорожный» – трогание в подъем, а также установившееся движение с минимально допустимой скоростью 40 км/ч на прямой передаче по автомагистрали на руководящем подъеме для дорог 1-й категории.

Предельные значения руководящего уклона и коэффициента сцепления установлены согласно СП 34.13330.2012 для соответствующих категорий дорог.

Методы определения весовых коэффициентов параметров эксплуатационных свойств изложены в [10]. Для расчета весовых коэффициентов был использован энтропийный метод [11], суть которого заключается в расчете энтропии и коэффициента разности предварительно нормированных данных на основании оценочного значения каждого из факторов. Чем больше разброс значений по фактору (различие между образцами), тем выше его вклад в интегральную оценку.

Необходимо заметить, что качественные факторы с одинаковыми значениями (почти все 0 либо почти все 1) будут иметь максимальную энтропию, и, следовательно, не будут являться информативными. Таким факторам присваивается минимальный вес. И наоборот, максимальный вес достигается при распределении 50/50.

К достоинствам метода можно отнести:

– отсутствие необходимости в привлечении экспертов и, как следствие, проблематики рассогласований мнений в связи с большим количеством субъективных оценок в обрабатываемых объемах данных;

– возможность получения объективной, автоматизированной оценки больших массивов данных.

Полученные весовые коэффициенты приведены в таблице, причем они отсортированы от большего значения к меньшему.

Таблица 1

Весовые коэффициенты параметров эксплуатационных свойств

Фактор, индекс	Весовой коэффициент	Наименование фактора
X43	2,3635E-02	Максимальный изгибающий момент в хребтовой раме т·м
X30	2,3572E-02	Снаряженная масса прицепа, т
X29	2,3557E-02	Количество линий (модулей по ширине), шт.
X35	2,3542E-02	Суммарное сопротивление дороги в «Тяжелых» условиях движения
X36	2,3542E-02	Фактор тяги («Тяжелые» условия)
X37	2,3542E-02	Мощность, потребная для преодоления суммарного сопротивления дороги (для «Тяжелых» условий)
X31	2,3542E-02	Полная масса автопоезда с грузом, т
X38	2,3540E-02	Суммарное сопротивление дороги в «Дорожных» условиях движения
X39	2,3540E-02	Фактор тяги («Дорожные» условия)
X40	2,3540E-02	Мощность, потребная для преодоления суммарного сопротивления дороги (для «Дорожных» условий)
X41	2,3540E-02	Фактор мощности («Дорожные» условия)
X42	2,3535E-02	Максимальное поперечное усилие в хребтовой раме, т
X1	2,3531E-02	Масса груза, т
X28	2,3519E-02	Количество осей, шт.
Y18	2,3429E-02	Наличие ящичной упаковки, в т.ч. обшивки собственной рамы фанерой
X2	2,3411E-02	Длина, мм
X27	2,3403E-02	Внешний радиус разворота груза, мм
X24	2,3403E-02	Внутренний радиус разворота автопоезда, мм
X25	2,3402E-02	Внешний радиус разворота автопоезда, мм
X22	2,3402E-02	Коридор автопоезда, мм
X19	2,3402E-02	Требуемая длина транспортной рамы-вставки, мм
X26	2,3388E-02	Внутренний радиус разворота груза, мм
X23	2,3388E-02	Коридор груза, мм
X9	2,3367E-02	Расстояние от центра тяжести до ближайшей опоры, мм
X8	2,3350E-02	Количество поперечных опор, шт.
Y13	2,3261E-02	Наличие предусмотренных заводом-изготовителем мест крепления
Y14	2,3202E-02	Наличие собственных опор или рамы у груза
X10	2,3180E-02	Шаг опор (минимальное расстояние между опорами), мм
Y16	2,3162E-02	Надежность крепления груза в транспортной упаковке (ко временным опорам, внутри ящика, кассет)
X3	2,3159E-02	Ширина, мм
Y11	2,3157E-02	Форма поперечного сечения груза
Y15	2,3062E-02	Наличие транспортных (временных) опор или рам у грузов
X32	2,3049E-02	Осевые нагрузки, т
Y17	2,3010E-02	Материал опор
Y12	2,2981E-02	Наличие предусмотренных заводом-изготовителем мест строповки
X7	2,2971E-02	Высота центра тяжести от опорной плоскости груза, мм
X4	2,2963E-02	Высота, мм

Фактор, индекс	Весовой коэффициент	Наименование фактора
X21	2,2939E-02	Минимальная колея при скоростном движении, мм
X20	2,2902E-02	Минимальная колея при движении на малых скоростях, мм
X33	2,2699E-02	Нагрузки на колесо, т
X34	2,2699E-02	Нагрузки на шину, т
X6	2,2407E-02	Поперечное смещение центра тяжести от середины груза (полуширины), мм
X5	2,2178E-02	Продольное смещение центра тяжести от середины груза (полудлины) груза, мм

В сформированной таблице показатели оценки свойств можно условно разделить на три группы:

1) количественные факторы грузов (X1 – X10);
2) качественные факторы грузов (Y11 – Y18);
3) эксплуатационные свойства груженых автопоездов (X19 - X43).

Исследование взаимосвязи вероятностей аварий с влияющими факторами.

В работе [10] эксплуатационные свойства автопоездов предлагается оценивать на основании интегрального показателя. А полученные весовые коэффициенты предлагается использовать в рамках той же методики.

При использовании критерия «гарантированная безопасность» составляющие сформированной выше целевой функции будут иметь вид:

$$P_i = f\left(x_1, x_2, \ldots, x_j, \ldots, x_n\right), \quad (2)$$

где x_j – j-й фактор, влияющий на вероятность P_i аварии по i-й причине.

Таким образом, поставленная задача сводится к стандартной задаче многофакторного корреляционно-регрессионного анализа.

Выводы.

1. В комплексе эксплуатационных свойств автопоездов с модульными прицепами для перевозки КТГ, представленном шестью подсистемами, доминирующей признана безопасность перевозок; все остальные свойства должны быть обеспечены на регламентированном уровне, достаточном для удовлетворения требований по безопасности.

2. В качестве критерия оценки безопасности перевозок КТГ принята *гарантированная безопасность*, предполагающая отсутствие аварий по причинам, основные из которых сформулированы в статье.

3. Сформирована совокупность параметров, влияющих на безопасность перевозок КТГ автомобильным транспортом, выполнен расчет весовых коэффициентов для 43-х параметров, объединенных в три группы.

4. Информационное обеспечение решения задачи максимизации гарантированной безопасности перевозок КТГ при условиях регламентации остальных эксплуатационных свойств автопоездов с модульными прицепами сведено к стандартной задаче многофакторного корреляционно-регрессионного анализа.

Литература:

1. Техническая эксплуатация автомобилей: Учебник для вузов. 4-е изд., перераб. и дополн. / Е.С. Кузнецов, А.П. Болдин. В.М. Власов и др. – М.: Наука, 2001. – 535 с.

2. Карагодин, В.И. Формирование комплекса эксплуатационных свойств автопоездов с модульными прицепами для перевозки крупногабаритных и тяжеловесных грузов / В.И. Карагодин, В.Л. Кубышев // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2025. № 2 (81). – С. 98-110.

3. M. Hetherington. Equipment Developments A brief look at some of the developments in equipment and hardware, both afloat and ashore, that could offer additional solutions to our project logistics toolbox. F.H. Berting interoffice HL manual by Heavy Lift team, 48 pages.

4. M.J. van Daal. The art of heavy transport, first edition 2010, second edition 2012, 413 pages.

5. Горбатенко, Д.С. Дополнительные меры профилактики аварийности по вине водителей грузовых автомобилей / Д. С. Горбатенко // Транспорт Российской Федерации, 2024, № 6 (115). – С.14-16.

6. Подопригора, Н.В. Структура и функционирование системы «водитель-автомобиль-дорога-внешняя среда» / Н. В. Подопригора // Вестник гражданских инженеров, 2022, № 2(91). – С. 154-159.

7. Кочетков, А. В. Риск-ориентированный подход при эксплуатации мостов / А.В. Кочетков, Ш.Н. Валиев // Транспорт Российской Федерации, 2024, № 4 (113). – С. 25-29.

8. Кубышев, В.Л. Эксплуатационные свойства автопоездов-тяжеловозов (Heavy lift trailer exploitation properties) / В.Л. Кубышев // Программа для ЭВМ. Свидетельство о регистрации 2025688101 от 16.10.2025.

9. Кубышев, В.Л. Анализ характеристик крупногабаритных и тяжеловесных грузов, доставленных на объекты строительства автомобильным транспортом в 2024-2025 гг. / В.Л. Кубышев // Автомобильный транспорт: эксплуатация, сервис, подготовка кадров. Сборник научных статей по материалам Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 95-летию Университета Яковлева. Чебоксары, 2025. С. 62-70.

10. Карагодин, В.И. Методы обоснования эксплуатационных свойств автопоездов с модульными прицепами для перевозки крупногабаритных и тяжеловесных грузов / В.И. Карагодин, В.Л. Кубышев [Текст] // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2025. № 1 (43).

11. Завернюк, В.М. Энтропийный метод анализа данных для процедуры определения степени влияния факторов на устойчивое развитие предприятий минерально-сырьевого комплекса / В.М. Завернюк, Чж.Чи // Национальные интересы: приоритеты и безопасность, 2022, т. 18, вып. 6. – С. 1188–1200.

Formation of a guaranteed safety criterion when justifying the performance characteristics of vehicles

Karagodin V.I.[1,a], Shilimov M.V.[1,b], Kubyshev V.L.[2,c]
[1]Moscow Automobile and Road Engineering State Technical University (MADI),
64 Leningradsky Ave., Moscow, Russia
[2] PAO Far Eastern Shipping Company
Novokuznetskaya St., 7/11, Bldg. 1, Moscow, Russia
[a]bik250248@yandex.ru; [b]mshilimov@mail.ru; [c]Kubyshev@bk.ru

Keywords: vehicles, performance properties, large-sized and heavy loads, modular trailers, guaranteed safety.

This article examines the problems of justifying a set of operational properties of road trains with modular trailers for the transportation of oversized and heavy cargo (OHC). The mathematical model for justifying a set of operational properties of road trains includes a criterion (target function) and a set of constraints. Guaranteed safety, implying the absence of accidents due to the main causes formulated in the article, is adopted as the criterion. The constraints defining the range of feasible solutions to the problem are a set of parameters affecting the safety of OHC transportation by road. Using the entropy method, weighting coefficients for 43 parameters, combined into three groups, are calculated. Information support for solving the problem of maximizing the guaranteed safety of OHC transportation under conditions of regulation of other operational properties of road trains with modular trailers is reduced to a standard problem of multivariate correlation and regression analysis.

УДК 621.001.4

Обоснование размеров оборотного фонда гидромолотов с учетом их взаимозаменяемости

Карагодин В.И.[1,a], Чан Ван Доан [1,b]
[1]Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Ленинградский пр-кт, 64, Москва, Россия
[a]bik250248@yandex.ru; [b] tranvandoan262@gmail.com

Ключевые слова: гидромолот, базовая машина, оборотный фонд, затраты, транспортировка, взаимозаменяемость, теория игр.

В статье рассмотрены проблемы обоснования размеров оборотного фонда рабочего оборудования транспортно-технологических машин, в том числе гидромолотов. От места их ремонта (в стационарной мастерской эксплуатирующего предприятия, либо централизованно на предприятии технического сервиса) зависят не только размеры оборотного фонда, но и методы его расчета. Для случая, когда гидромолоты ремонтируются и децентрализовано, и централизованно, в качестве универсального метода расчета предложено использовать теорию игр. На основе собранной информации от разных поставщиков рабочего оборудования в России получена эмпирическая зависимость затрат на транспортировку гидромолотов от расстояния транспортировки. Выявлено влияние взаимозаменяемости моделей гидромолотов на размеры оборотного фонда и затрат на его создание и содержание. Установлено, что учет взаимозаменяемости позволяет существенно уменьшить размер оборотного фонда и затраты на его создание и содержание.

Введение.

Обычно при расчёте размеров оборотного фонда агрегатов машин, как правило, рассматривается одна конкретная модель агрегата, так как агрегаты различных моделей, как правило, невзаимозаменяемы [1]. Для рабочего оборудования транспортно-технологических машин подобная возможность в ряде случаев существует, и это является источником значительной экономии затрат на создание и содержание оборотного фонда такого оборудования [2].

Постановка задачи.

В зависимости от места замены оборудования применяются различные методы расчёта размеров оборотного фонда [3]. Методы теории массового обслуживания [4] целесообразно использовать в случае, когда снятый с машины агрегат ремонтируется на том же предприятии, где осуществляется его демонтаж и монтаж. Методы теории управления запасами [4] целесообразно применять тогда, когда снятый на одном предприятии агрегат отправляется затем для ремонта на другое предприятие.

Несмотря на наличие трёх направлений использования (полевые условия, стационарная мастерская, централизованный ремонт), оборотный фонд гидромолотов является единым и используется одновременно по всем направлениям. Применение различных методов расчёта по отдельным направлениям не позволяет в полной мере учесть данное обстоятельство. С целью унификации методов расчета оборотного фонда гидромолотов для всех направлений его использования целесообразно использовать методику, основанную на теории игр [5].

Без учета взаимозаменяемости расчетные показатели составят:

$$N_{\text{оф}} = \sum_{i=1}^{m} N_i; \quad S_{\text{оф}} = \sum_{i=1}^{m} S_i, \tag{1}$$

где $N_{\text{оф}}$ – общее количество гидромолотов в оборотном фонде; m – количество моделей гидромолотов; N_i – количество гидромолотов i-й модели в оборотном фонде; $S_{\text{оф}}$ – суммарные затраты на создание и содержание оборотного фонда; S_i – затраты на создание и содержание оборотного фонда гидромолотов i-й модели.

Эти затраты включают расходы на приобретение оборотного фонда, строительство и содержание (отопление, освещение, вентиляцию и уборку) складских помещений, транспортировку гидромолотов в централизованный ремонт и обратно.

Те же показатели с учетом взаимозаменяемости:

$$N_{\text{оф}}^{\text{в}} = \sum_{k=1}^{K} \sum_{i \in k} N_{ik}; \quad S_{\text{оф}}^{\text{в}} = \sum_{k=1}^{K} \sum_{i \in k} S_{ik}, \tag{2}$$

где K – количество групп взаимозаменяемых гидромолотов; N_{ik} – количество гидромолотов i-й модели в k-й группе; S_{ik} – затраты на создание и содержание оборотного фонда гидромолотов i-й модели k-й группы взаимозаменяемых гидромолотов.

Естественно предположить, что выполняются условия

$$N_{\text{оф}}^{\text{в}} \le N_{\text{оф}}; \quad S_{\text{оф}}^{\text{в}} \le S_{\text{оф}},$$

т.е. и размеры оборотного фонда, и затраты на его создание и содержание при наличии взаимозаменяемости не превосходят аналогичных показателей при отсутствии взаимозаменяемости.

Подготовка исходных данных.

В соответствии с техническими условиями на одну и ту же модель экскаватора допускается установка различных гидромолотов при условии, что их параметры находятся в допустимых пределах по массе, энергии удара, частоте ударов, расходу рабочей жидкости и рабочему давлению. Каждый гидромолот комплектуется подвеской, предназначенной для его присоединения к базовой машине. Различия в присоединительных размерах подвесок не оказывают существенного влияния на возможность замены одной модели гидромолота другой [6]. Таким образом, взаимозаменяемость гидромолотов определяется преимущественно не конструктивными ограничениями, а экономической целесообразностью их использования в составе оборотного фонда. В качестве иллюстративного примера рассмотрим гидромолоты моделей Delta F-5 и Impulse 120. Несмотря на наличие конструктивных различий, их технические характеристики являются сопоставимыми (табл. 1).

Таблица 1

Технические характеристики Delta F-5 и Impulse 120

Модель	Масса, кг	Энергия удара, Дж	Частота ударов, мин$^{-1}$	Поток масла, л/мин	Рабочее давление, МПа
Delta F-5	315	849	450 – 900	40 – 70	11 – 14
Impulse 120	275	850	450 – 900	30 – 70	9 – 13

Затраты на создание и содержание оборотного фонда включают расходы на приобретение гидромолотов, строительство и содержание (отопление, освещение, вентиляцию и уборку) складских помещений, транспортировку гидромолотов в централизованный ремонт и обратно. Часть затрат может быть определена с помощью методик, изложенных в [7]. Затраты на транспортировку изделий при централизации технического обслуживания и ремонта зависят от принятых способов транспортировки.

При перегоне машины своим ходом транспортные издержки включают лишь расходы, связанные с его пробегом на заданное расстояние:

$$S_{ij}^{\text{сх}} = C_{км} R_{ij}, \quad (3)$$

где $C_{км}$ – приведенные затраты на один км пробега, руб.; R_{ij} – расстояние перегона между пунктами i и j, км.

Себестоимость перевозок изделий в ремонт и обратно автомобильным транспортом определяется из выражения [8]:

$$S_{ij} = \left(З_{гр} z_{гр} + З_{нк} + З_{дв}^{км} R_{ij}\right), \quad (4)$$

где $З_{гр}$ – затраты на погрузку и выгрузку 1 т груза; $z_{гр}$ – количество грузовых операций на всем пути следования; $З_{нк}$ – расходы на начально-конечные операции для 1 т груза; $З_{дв}^{км}$ – расходы по передвижению 1 т груза на 1 км.

Гидромолот как представитель рабочего оборудования отличается от других типов оборудования и агрегатов машины тем, что его базовая машина должна быть на объекте эксплуатации даже в случае отказа гидромолота, так как машина нужна для работы с другим рабочим оборудованием (ковшом, грейфером, рыхлителем и т.д.). Транспортировка машины с отказавшим гидромолотом на место ремонта своим ходом – не экономичный вариант. Таким образом, гидромолот транспортируется вторым способом (автомобильным транспортом). При постоянных условиях транспортировки затраты на погрузку и выгрузку 1 т груза и расходы на начально-конечные операции для 1 т груза не изменяются, что позволяет ввести обозначения:

$$z = S_{ij}; \quad a = \left(З_{гр} z_{гр} + З_{нк}\right); \quad b = З_{дв}^{км}; \quad y = R_{ij}.$$

Тогда формула для расчета затрат на транспортировку одного гидромолота имеет вид:

$$z = m(a + by), \quad (5)$$

где m – масса груза, т.

Если нам известны экспериментальные значения m (масса груза), y (расстояние от пункта отправителя до пункта получателя) и z (затраты на транспортировку), то мы можем определить коэффициенты a и b. Полученное уравнение позволит рассчитать затраты на транспортировку гидромолота. Если транспортируется не один гидромолот, а партия грузов, то затраты на транспортировку одного гидромолота нетрудно определить пропорционально массе транспортируемых грузов.

Были проведены экспериментальные исследования по сбору информации о затратах на транспортировку гидромолотов разных поставщиков рабочего оборудования в России. Методом наименьших квадратов определены значения коэффициентов a и b. Расчетная формула для определения затрат на транспортировку одного гидромолота имеет вид:

$$S_{ij} = m\left(2{,}24 + 0{,}03 R_{ij}\right), \text{ руб.} \quad (6)$$

Расчетное значение коэффициента корреляции величин R_{ij} и S_{ij} составило 0,997, что говорит об их тесной корреляционной связи и практической возможности использовать полученную расчетную формулу для прогнозирования затрат на транспортировку гидромолотов.

Оптимизационные расчеты и их результаты.

Метод обоснования запаса оборотных агрегатов при стационарном и нестационарном спросе на агрегаты [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**] основан на математической теории игр и отвечает на вопрос, сколько исправных гидромолотов должно быть на складе оборотного фонда в день. Стратегия производства $П_j$ выдает число требований на замену (ремонт) гидромолотов определенного наименования. Организаторы склада применяют стратегии A_i (A_0 – не иметь запаса, A_1 – иметь в запасе один гидромолот,,..). Последствия сочетания стратегий $П_j$ и A_i оцениваются выигрышем b_{ij} ($b_{ij} > 0$ значит прибыль, а $b_{ij} < 0$ – убыток), которые сводятся в платежной матрице. Иными словами, матрица представляет собой список всех вариантов стратегий, и из них необходимо выбрать рациональную

стратегию. При известных вероятностях q_j каждой стратегии $П_j$ выбирают стратегию A_i, при которой математическое ожидание выигрыша достигает максимального значения. По строке матрицы (по каждой стратегии A_i) вычисляют средневзвешенный выигрыш:

$$\overline{b_i} = q_1 b_{i1} + q_2 b_{i2} + \ldots + q_n b_{in} = \sum_{j=1}^{n} q_j b_{ij}. \quad (7)$$

Рассмотрим первый случай, когда отсутствует взаимозаменяемость гидромолотов. Предположим, что склад оборотного фонда гидромолотов состоит из 6 шт. модели F-5 и 6 шт. модели Impulse 120. Средняя продолжительность ремонта перечисленных моделей соответственно составляет T=4 дня, 2 дня. Среднегодовые затраты на приобретение и хранение одной модели на складе соответственно U_a = 280 тыс. руб., 230 тыс. руб., суточные потери от простоя машины U_a = 8 тыс. руб. Число рабочих дней в году D=250. Отсюда среднесуточные затраты на приобретение и хранение одной модели на складе U_{ac} = =U_a / D=1,22 тыс. руб. и 0,92 тыс. руб. Производственные ситуации каждой модели и соответствующие им последствия показываются в платежной матрице рассматриваемой игры (табл. 2 и 3).

Таблица 2

Платежная матрица для модели F-5

Стратегии организаторов склада	Стратегии производства и их вероятности						
	$П_о$	$П_1$	$П_2$	$П_3$	$П_4$	$П_5$	$П_6$
	0,300	0,300	0,300	0,070	0,020	0,006	0,004
A_0	0,00	12,88	25,76	38,64	51,52	77,28	90,16
A_1	1,22	0,00	12,88	25,76	38,64	51,52	77,28
A_2	2,44	1,22	0,00	12,88	25,76	38,64	51,52
A_3	3,66	2,44	1,22	0,00	12,88	25,76	38,64
A_4	4,88	3,66	2,44	1,22	0,00	12,88	25,76
A_5	6,10	4,88	3,66	2,44	1,22	0,00	12,88
A_6	7,32	6,10	4,88	3,66	2,44	1,22	0,00

Средневзвешенный выигрыш по каждой сроке платежной матрицы: $\overline{b_0}$ = 16,15; $\overline{b_1}$ = 7,42; $\overline{b_2}$ = 2,95; $\overline{b_3}$ = 2,76; $\overline{b_4}$ = 3,56; $\overline{b_5}$ = 4,64; $\overline{b_6}$ = 5,80. Таким образом, наилучшим является вариант, если на складе оборотного фонда будут 3 исправных гидромолота модели Delta F-5.

Таблица 3

Платежная матрица для модели Impulse 120

Стратегии организаторов склада	Стратегии производства и их вероятности						
	$П_о$	$П_1$	$П_2$	$П_3$	$П_4$	$П_5$	$П_6$
	0,100	0,200	0,300	0,250	0,080	0,040	0,030
A_0	0,00	8,44	16,88	25,32	33,76	50,64	59,08
A_1	0,92	0,00	8,44	16,88	25,32	33,76	50,64
A_2	1,84	0,92	0,00	8,44	16,88	25,32	33,76
A_3	2,76	1,84	0,92	0,00	8,44	16,88	25,32
A_4	3,68	2,76	1,84	0,92	0,00	8,44	16,88
A_5	4,60	3,68	2,76	1,84	0,92	0,00	8,44
A_6	5,52	4,60	3,68	2,76	1,84	0,92	0,00

Для модели Impulse 120 средневзвешенный выигрыш по каждой сроке платежной матрицы: $\overline{b_0}$ = 19,58; $\overline{b_1}$ = 11,74; $\overline{b_2}$ = 5,85; $\overline{b_3}$ = 3,03; $\overline{b_4}$ = 2,55; $\overline{b_5}$ = 2,81; $\overline{b_6}$ = 3,45.

Отсюда наилучший вариант, если на складе оборотного фонда для модели Impulse 120 находятся 4 исправных гидромолота.

Без учета взаимозаменяемости расчетные показатели составят:

$$N_{\text{оф}} = \sum_{i=1}^{m} N_i = 3+4 = 7\ шт.; \quad S_{\text{оф}} = \sum_{i=1}^{m} S_i = 3 \cdot 1{,}22 + 4 \cdot 0{,}92 = 7{,}34\ тыс.руб.$$

При наличии взаимозаменяемости гидромолотов возможно соединить модели F-5 и Impulse 120 в одно множество. Тогда оборотный фонд состоит только из множества F-5 и Impulse 120. Ниже в табл. 4 представлена платежная матрица для объединенного множества (F-5 и Impulse 120) со средневзвешенными выигрышами: $\overline{b_0}$ = 23,02; $\overline{b_1}$ = 12,66; $\overline{b_2}$ = 5,91; $\overline{b_3}$ = 3,60; $\overline{b_4}$ = 3,55; $\overline{b_5}$ = 4,21; $\overline{b_6}$ = 5,19. Оптимальный размер оборотного фонда для объединенного множества равен 4 гидромолота. Соответственно, затраты на его создание и содержание равны 4·1,22=4,88 тыс. руб.

Таблица 4

Платежная матрица для объединенного множества (F-5 и Impulse 120)

Стратегии организаторов склада	Стратегии производства и их вероятности						
	$П_о$	$П_1$	$П_2$	$П_3$	$П_4$	$П_5$	$П_6$
	0,200	0,250	0,300	0,160	0,050	0,023	0,017
A_0	0,00	12,88	25,76	38,64	51,52	77,28	90,16
A_1	1,22	0,00	12,88	25,76	38,64	51,52	77,28
A_2	2,44	1,22	0,00	12,88	25,76	38,64	51,52
A_3	3,66	2,44	1,22	0,00	12,88	25,76	38,64
A_4	4,88	3,66	2,44	1,22	0,00	12,88	25,76
A_5	6,10	4,88	3,66	2,44	1,22	0,00	12,88
A_6	7,32	6,10	4,88	3,66	2,44	1,22	0,00

Результаты расчетов показывают, что при наличии взаимозаменяемости моделей размер оборотного фонда составляет всего 4 гидромолота, а затраты на его создание и содержание – 4,88 тыс. руб./сутки. При отсутствии взаимозаменяемости моделей размер оборотного фонда – 7 гидромолотов, а затраты – 7,34 тыс. руб./сутки.

Выводы.

1. Размеры оборотного фонда рабочего оборудования транспортно-технологических машин, в том числе гидромолотов, зависят от места их ремонта: в стационарной мастерской эксплуатирующего предприятия, либо централизованно на предприятии технического сервиса. От этого зависят не только размеры оборотного фонда, но и методы его расчета. Для случая, когда гидромолоты ремонтируются и децентрализовано, и централизованно, в качестве универсального метода расчета предложено использовать теорию игр.

2. При централизованном ремонте гидромолотов размеры оборотного фонда существенно зависят от затрат на их транспортировку. На основе собранной информации от разных поставщиков рабочего оборудования в России получена эмпирическая зависимость затрат на транспортировку гидромолотов от расстояния транспортировки.

3. Выявлено влияние взаимозаменяемости моделей гидромолотов на размеры оборотного фонда и затрат на его создание и содержание. При наличии взаимозаменяемости моделей для рассматриваемой ситуации размер оборотного фонда составляет всего 4 исправных гидромолота, а затраты на его создание и содержание – 4,88 тыс. руб./сутки. При отсутствии взаимозаменяемости моделей размер оборотного фонда – 7 исправных гидромолотов, а затраты – 7,34 тыс. руб./сутки.

Литература:

1. Баловнев, В.И. Вопросы развития техники для строительства, ремонта и восстановления автомобильных дорог / В.И. Баловнев, Г.В. Кустарев, Р.Г. Данилов, Н.Д. Селиверстов // Наука и техника в дорожной отрасли. 2021. № 4 (98). С. 8-10.

2. Локшин, Е. С. Критерии оценки сервисного сопровождения дорожно-строительных машин / Е. С. Локшин, В. И. Карагодин, А. Ю. Горелов // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2024. № 1 (76). С. 41–48.

3. Карагодин, В.И. Методы обоснования запаса оборотных агрегатов для ремонта автомобильной техники / В.И. Карагодин // Современные аспекты развития и безаварийной эксплуатации автомобильной техники (бронетанкового вооружения и техники). Сборник научных статей межвузовской научно-технической конференции. Новосибирск, 2024. С. 128-133.

4. Карагодин, В.И. Математическое моделирование процессов и систем технического сервиса на транспорте. Прикладные задачи : учебник / В.И. Карагодин. – Москва : КНОРУС, 2024. – 374 с. – (Бакалавриат и магистратура).

5. Карагодин, В.И. Особенности расчета оборотного фонда рабочего оборудования транспортно-технологических машин / В.И. Карагодин, Чан Ван Доан // Сборник научных статей межвузовской научно-практической конференции. – Новосибирск: Новосибирский военный ордена Жукова институт имени генерала армии И.К. Яковлева войск национальной гвардии Российской Федерации, 2024. – С. 94-98.

6. Dublin, Nov. 07, 2024 (GLOBE NEWSWIRE) / The «Vietnam Construction Equipment Market – Strategic Assessment & Forecast 2024-2029» report.

7. Политковская, И.В. Показатели и модели стратегического управления финансовой деятельностью предприятий транспортной отрасли / И.В. Политковская, С.Н. Исраилова // Экономика и бизнес: теория и практика. 2021. № 12-2 (82). С. 217-220.

8. Ситников, О.С. Экономика перевозок ремонтного фонда автомобильного транспорта / О.С. Ситников, Я.С. Игудесман, В.М. Руденков. – М.: Транспорт, 1974. – 70 с.

Justification of the size of the circulating fund of hydraulic hammers, taking into account their interchangeability

Karagodin V.I.[1,a], Tran Van Doan [1,b]
[1]Moscow Automobile and Road Engineering State Technical University (MADI),
64 Leningradsky Ave., Moscow, Russia
[a]bik250248@yandex.ru; [b]tranvandoan262@gmail.com

Keywords: hydraulic hammer, base machine, working capital, costs, transportation, interchangeability, game theory.

The article discusses the problems of justifying the size of the working equipment turnover fund for transport and technological machines, including hydraulic hammers. Not only the size of the turnover fund, but also the methods of its calculation depend on the place of repair (in a stationary workshop of the operating enterprise, or centrally at a technical service enterprise). For the case when hydraulic hammers are repaired both decentralized and centralized, the game theory is proposed as a universal method of calculation. Based on the collected information from various suppliers of working equipment in Russia, an empirical dependence of the cost of transporting hydraulic hammers on the distance of transportation has been obtained. The influence of interchangeability of models of hydraulic hammers on the size of the circulating fund and the costs of its creation and maintenance has been revealed. It has been established that taking into account interchangeability allows to significantly reducing the size of the circulating fund and the costs of its creation and maintenance.

УДК- 693.546

Влияние магнитных полей на реологические свойства бетонных смесей для строительных 3D-принтеров

Фёдоров В.С.[1,a] , Нестер А.С. [1,b], Бузурный Д.В.[1,c]
[1]Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия
[a]f edorov-v-s@yandex.ru; [b] zombine2012@yandex.ru

Ключевые слова: 3D-печать бетона, магнитное поле, реология, наночастицы Fe_3O_4, магнито-реологический эффект, формоустойчивость.

В статье представлено теоретическое исследование влияния магнитных полей на реологические свойства бетонных смесей для строительной 3D-печати. Рассмотрены физико-химические механизмы магнито-реологического эффекта и разработана математическая модель изменения реологических параметров под действием магнитного поля. Показано, что магнитное управление реологией обеспечивает баланс между экструдируемостью смеси и формоустойчивостью напечатанных слоев.

Строительная 3D-печать активно развивается благодаря работам компаний COBOD International, Apis Cor, ICON и других. Технология позволяет автоматизировать возведение конструкций, сократить затраты и реализовать сложные архитектурные формы. При этом бетонная смесь послойно экструдируется через сопло без использования опалубки, что предъявляет противоречивые требования к её реологическим свойствам [1].

Рис.1. Строительный 3D-принтер

С одной стороны, требуется низкое сопротивление течению в сопле для обеспечения экструдируемости при минимальном давлении. С другой стороны, непосредственно после укладки материал должен обладать высокой структурной прочностью для сохранения формы и восприятия нагрузок от вышележащих слоев. Кроме того, необходима достаточная межслойная адгезия и контролируемая кинетика структурообразования.

Традиционные методы регулирования реологии (изменение водоцементного отношения, химические добавки, оптимизация гранулометрии) имеют ограниченную гибкость и не позволяют осуществлять динамическое управление в процессе печати. В этой связи перспективным представляется магнитное воздействие на цементные системы как физический метод управления дисперсной структурой без изменения химического состава.

Введение в состав смеси магнитных наночастиц Fe_3O_4 (1–5% по массе цемента) и приложение внешнего магнитного поля позволяет обратимо изменять реологические характеристики. Магнитные частицы намагничиваются и формируют упорядоченные цепочечные структуры вдоль силовых линий поля, что изменяет макроскопические реологические свойства системы. После снятия поля структуры разрушаются, однако процессы гидратации могут быть ускорены за счёт изменения пространственного распределения компонентов [2].

Целью работы является разработка теоретической модели влияния магнитных полей на реологические свойства бетонных смесей для 3D-печати и анализ возможностей практического применения магнитного воздействия.

Свежий бетон представляет собой концентрированную суспензию твёрдых частиц в жидкой фазе. Его реологическое поведение описывается моделью Бингама:

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \cdot \dot{\gamma} \quad (1)$$

где τ – касательное напряжение сдвига (Па), τ_0 – предел текучести (Па), μ_p – пластическая вязкость (Па·с), $\dot{\gamma}$ – скорость сдвига ($с^{-1}$).

Предел текучести τ_0 обусловлен наличием структурной сетки из межчастичных взаимодействий, а пластическая вязкость μ_p характеризует сопротивление течению после разрушения этой сетки [3].

При 3D-печати материал работает в двух режимах. В режиме экструзии при высоких скоростях сдвига ($\dot{\gamma} \sim 10^1 - 10^2$ $с^{-1}$) структурная сетка разрушена, и требуется минимизация сопротивления течению. В режиме покоя после укладки слоя начинается тиксотропное упрочнение — восстановление структуры с ростом статического предела текучести $\tau_{0,stat}$ во времени. Это обеспечивает формоустойчивость конструкции.

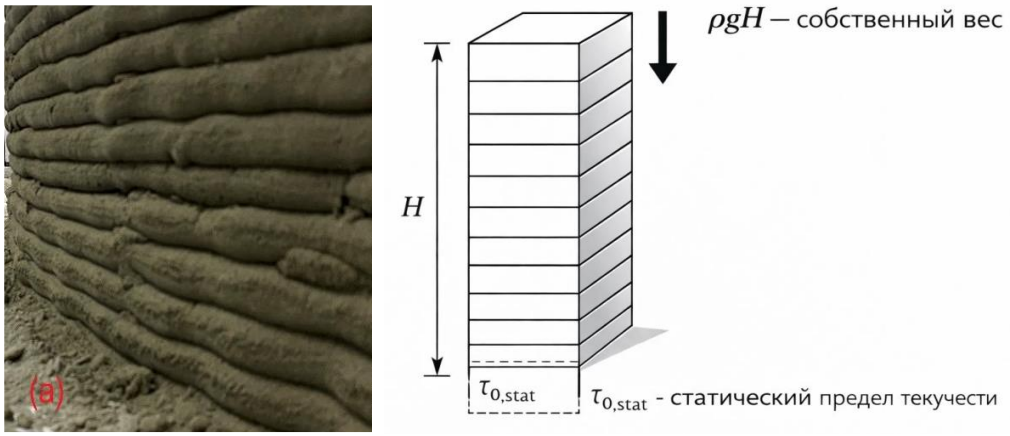


Рис. 2. Схема с указанием статического предела текучести и собственного веса

Для придания смеси магнито-реологических свойств в её состав вводят наночастицы магнетита Fe_3O_4 (1–5% по массе цемента). Магнетит обладает высокой намагниченностью, а наночастицы размером 20–100 нм проявляют суперпарамагнитные свойства: быстро намагничиваются при приложении поля, но не имеют остаточной намагниченности.

При приложении внешнего магнитного поля с индукцией B (0.3–1.0 Тл) наночастицы приобретают магнитный дипольный момент $m = \chi VB$ и взаимодействуют посредством диполь-дипольных сил с энергией $U_{mag} \sim \mu_0 m^2/(4\pi r^3)$. Для минимизации магнитной энергии частицы выстраиваются в цепочечные структуры вдоль силовых линий поля. Это изменяет конфигурацию дисперсной системы: магнитные наночастицы перераспределяются, формируются цепочечные агрегаты, изменяется эффективная вязкость, ослабляются коагуляционные контакты между цементными частицами. Экспериментально наблюдается снижение динамического предела текучести и пластической вязкости [4].

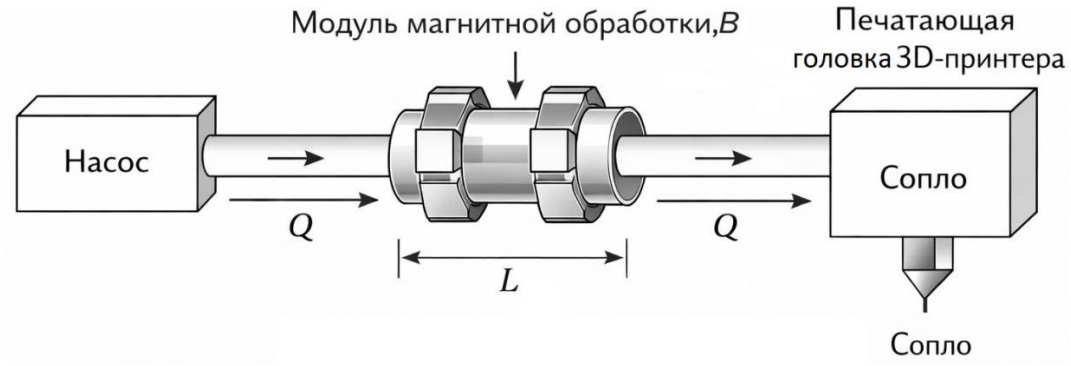


Рис. 3. Схема магнитной обработки жидкости для 3D-принтера

После снятия поля цепочечные структуры разрушаются, однако магнитная обработка может ускорять процессы гидратации и рост структурной прочности, улучшая межслойную адгезию. Таким образом, реализуется двойной эффект: снижение сопротивления течению во время воздействия и ускорение структурообразования после снятия поля.

Для количественного описания введём параметр магнитного воздействия $M = B^2 \cdot t_m$, где B – магнитная индукция (Тл); t_m – время воздействия (с). Квадратичная зависимость отражает пропорциональность энергии магнитного взаимодействия квадрату намагниченности. На основе литературных данных предлагаются феноменологические зависимости:

$$\tau_0(B) = \frac{\tau_{00}}{1+k_1 M}, \qquad \mu_p(B) = \frac{\mu_{p0}}{1+k_2 M} \tag{2}$$

где τ_{00} и μ_{p0} – параметры без магнитного поля; k_1 и k_2 – эмпирические коэффициенты чувствительности материала.

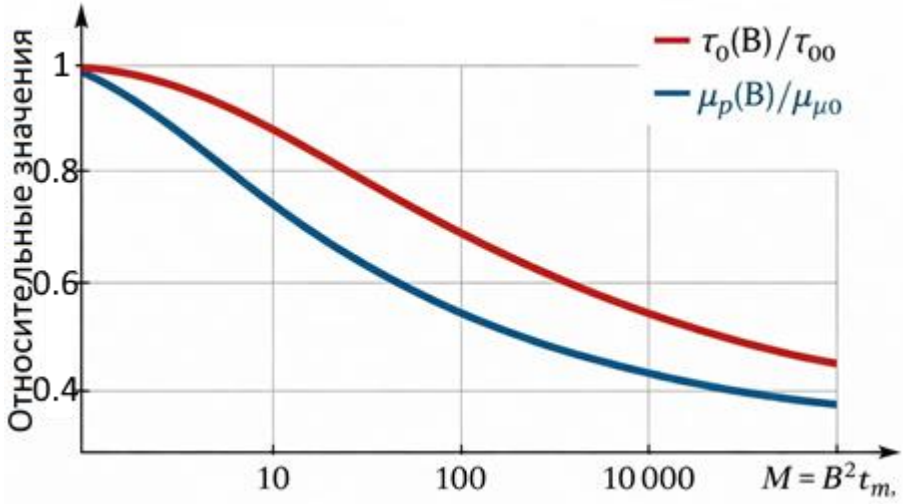


Рис. 4. График влияние магнитного воздействия
на предел текучести и пластическую вязкость

Применение разработанной модели к анализу процесса экструзии показывает существенное снижение требуемого давления. Для течения через цилиндрическое сопло давление определяется как:

$$P = \frac{2L}{R}\tau_0 + \frac{4L}{R^4}\mu_p Q \tag{3}$$

где L – длина канала,м; R – радиус,м; Q – объёмный расход, м^3/с. При магнитной обработке давление снижается до $P(B)$ с подстановкой $\tau_0(B)$ и $\mu_p(B)$, что уменьшает энергозатраты и износ оборудования.

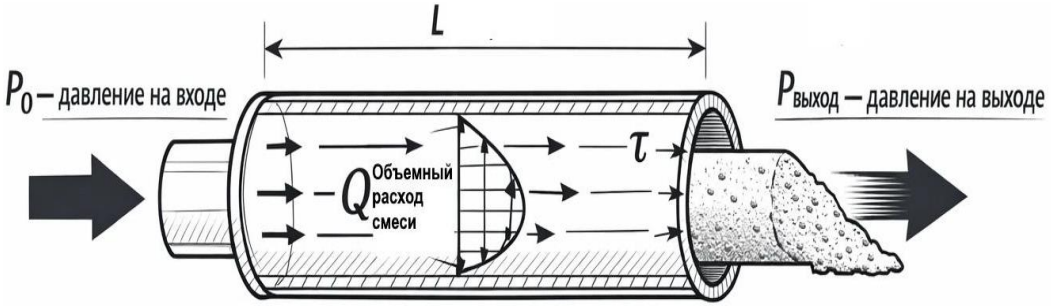


Рис. 5. Схема для расчёта давления необходимого для процесса экструзии

Формоустойчивость определяется критерием $H_{max} = \tau_{0,stat}/(\rho g)$, где H_{max} — максимальная устойчивая высота. Хотя магнитная обработка снижает начальный предел текучести, ускорение тихотропного упрочнения компенсирует этот эффект, обеспечивая быструю стабилизацию слоёв. Улучшение межслойной адгезии достигается за счёт оптимизации баланса между структурообразованием поверхности нижнего слоя и проникновением свежей смеси верхнего слоя.

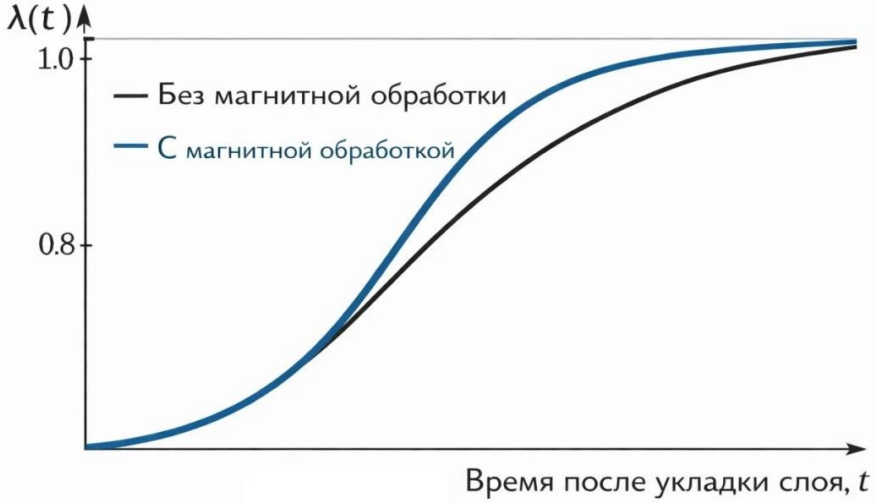


Рис. 6. График влияния магнитного поля на рост межслойной адгезии

Для практической реализации необходим модуль магнитной обработки в тракте подачи смеси. Возможны варианты с постоянными магнитами (без энергопотребления, но фиксированное поле), электромагнитами (динамическое управление, но требуется энергия) или гибридные системы. Оптимальна система адаптивного управления, регулирующая параметры магнитного воздействия в реальном времени.

Магнитное воздействие на бетонные смеси с наночастицами Fe_4O_3 представляет собой перспективный метод динамического управления реологическими свойствами для строительной 3D-печати. Теоретический анализ показал, что приложение магнитного поля приводит к формированию упорядоченных цепочечных структур и изменению межчастичных взаимодействий в дисперсной системе.

Разработанная математическая модель позволяет прогнозировать влияние магнитной обработки на давление экструзии, формоустойчивость слоёв и межслойную адгезию. Магнитное управление разрешает фундаментальное противоречие между требованиями высокой текучести при экструзии и высокой структурной прочности после укладки. Во время воздействия снижается сопротивление течению, что уменьшает энергозатраты. После снятия поля ускоряется структурообразование, улучшая формоустойчивость и адгезию.

Практическая реализация требует разработки модулей магнитной обработки, оптимизации составов смесей и создания систем адаптивного управления. Необходимы

экспериментальные исследования для верификации модели и оценки влияния на механические свойства и долговечность конструкций. Магнитное управление реологией открывает новые возможности для повышения эффективности строительной 3D-печати.

Литература:

1. Khoshnevis B., Hwang D., Yao K.-T., Yeh Z. Mega-scale fabrication by contour crafting // International Journal of Industrial and Systems Engineering. 2006. Vol. 1. No. 3. P. 301-320.

2. Wang X., Xiao F., Yu W., et al. Effect of magnetized water on the properties of cement paste // Construction and Building Materials. 2018. Vol. 180. P. 439-447.

3. Roussel N. A thixotropy model for fresh fluid concretes: Theory, validation and applications // Cement and Concrete Research. 2006. Vol. 36. No. 10. P. 1797-1806.

4. Jiao D., Shi C., Yuan Q. Magneto-responsive structural build-up of highly flowable cementitious materials with nano-Fe3O4 // Construction and Building Materials. 2022. Vol. 327. 126945.

5. Wolfs R.J.M., Bos F.P., Salet T.A.M. Correlation between destructive compression tests and non-destructive ultrasonic measurements on early age 3D printed concrete // Construction and Building Materials. 2018. Vol. 181. P. 447-454.

6. Фёдоров В.С., Нестер А.С., Портнягина А.В. Магнитная активация бетона и её роль в 3D печати строительных конструкций. //Механики XXI веку - Братск: Изд-во «БрГУ», 2025, С.45-48.

The effect of magnetic fields on the rheological properties of concrete mixtures for construction 3D printers

Fedorov V.S.[1,a]., Nester A.S.[1,b], Buzurnyj D.V[1,c]
Bratsk State University, 40 Makarenko st., Bratsk, Russian Federation
[a]fedorov-v-s@yandex.ru; [b] zombine2012@yandex.ru

Keywords: 3D printing of concrete, magnetic field, rheology, Fe_3O_4 nanoparticles, magneto-rheological effect, form stability.

The article presents a theoretical study of the influence of magnetic fields on the rheological properties of concrete mixtures for construction 3D printing. The article discusses the physical and chemical mechanisms of the magneto-rheological effect and develops a mathematical model for the change in rheological parameters under the influence of a magnetic field. It has been shown that magnetic rheology control ensures a balance between the extrusibility of the mixture and the shape stability of the printed layers.

УДК 621.928:235

Перспективы применения двухмассных резонансных систем в современных технологических процессах грохочения

Емцов В.А.[1,a], Зедгенизов В.Г.[1,b]
[1]Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова, 83, Иркутск, Россия, 664074
[a]valeriy.emtsov2@mail.ru, [b]vzedgenizov@bk.ru

Ключевые слова: резонансные грохоты, вибрационные параметры, разделение каменных материалов, эффективность грохочения, двухмассные системы.

В статье рассматривается применение резонансных вибрационных грохотов для разделения каменных материалов. Анализируется влияние ключевых параметров колебаний, включая амплитуду, частоту и направление колебаний на общую эффективность процессов грохочения. Проведен детальный факторный анализ, учитывающий гранулометрический состав и влажность сырья, а также конструктивные особенности оборудования.

Сравнительная оценка резонансных систем серии RT и традиционных инерционных агрегатов серий YZS или EDT подтверждает технологическое превосходство первых. Установлено, что резонансный режим обеспечивает снижение энергопотребления в полтора или два раза при росте производительности на 40 процентов. Использование двухмассных систем со стабильной амплитудой 12 миллиметров позволяет увеличить время нахождения материала на сите до 33 секунд, гарантируя высокую точность разделения даже для сложных фракций. Авторы делают вывод, что внедрение автоматизированного контроля параметров вибрации является необходимым условием для повышения экономической эффективности и надежности современных систем сортировки.

Введение.

В условиях растущих требований к качеству и точности классификации каменных материалов в горнодобывающей, строительной и перерабатывающей промышленности традиционные методы грохочения всё чаще оказываются недостаточно эффективными, особенно при работе с мелкими, влажными или неоднородными фракциями. Это связано с тем, что долгое время предприятия пренебрегали грохотами, считая их менее важными, чем дробильные установки. От них требовали, в основном, лишь прочность и износостойкость, однако сегодня подход изменился. Из-за снижения содержания полезного компонента в рудах по всему миру спрос на эффективные системы грохочения продолжает расти [1].

Современные технологии всё больше ориентируются на энергоэффективные, высокоточные и адаптивные решения, что делает резонансные вибрационные грохоты одним из наиболее перспективных направлений развития сортировочного оборудования. Их ключевое преимущество - использование резонансных режимов колебаний для усиления эффективности просеивания при снижении энергопотребления, что особенно актуально в условиях стремления к цифровизации и экологизации производственных процессов.

Однако для реализации потенциала резонансных грохотов необходимо глубокое понимание взаимосвязи параметров вибрации и свойств обрабатываемого материала. Недостаточная проработка этих взаимодействий в практике эксплуатации приводит к снижению производительности, увеличению износа и потере точности разделения.

Таким образом, комплексный анализ параметров колебаний и конструктивных особенностей рабочего оборудования резонансных грохотов представляет собой научно-техническую задачу высокой актуальности, направленную на повышение технологической надёжности, экономической эффективности и экологической устойчивости процессов грохочения в современной промышленности.

Факторный анализ эффективности грохочения и сравнительная оценка применения резонансных систем.

Разделение каменных материалов является ключевым этапом в горнодобывающей, строительной и перерабатывающей промышленности. Его основная цель - классификация по гранулометрическому составу частиц для последующего использования.

Наиболее распространённым и эффективным методом является механическое грохочение. В порядке убывающей применяемости также используют гидрогрохочение, аэросепарацию, гравитационное разделение, магнитное разделение и флотацию.

Эффективность процесса грохочения определяется комплексом различных факторов, что неоднократно подтверждено экспериментальными исследованиями [2].

Факторы грохочения целесообразно группировать по характеру их происхождения,

что позволяет последовательно учитывать влияние материала, оборудования и условий эксплуатации. При таком подходе выделяются три взаимосвязанные группы.

Первая группа - свойства просеиваемого материала. Сюда относятся насыпная плотность, распределение гранулометрического состава, форма зёрен и поверхностная влажность. Именно эти характеристики задают исходное состояние сырья, от которого зависит дальнейшее поведение частиц на поверхности грохочения.

Вторая группа параметров грохота и сита включает рабочую площадь грохота, долю живого сечения, размер, форму и толщину отверстий, а также параметры вибрации - амплитуду, частоту и направление колебаний, угол наклона грохота и способ подачи сырья, которые непосредственно формируют режим разделения.

Третья группа – условия эксплуатации грохота. Они охватывают конструктивные и технологические параметры грохота, характер движения сита и внешние факторы, влияющие на эксплуатацию, что дополняет анализ процесса эксплуатации.

Отметим влияние ключевых факторов, определяющих эффективность грохочения по первой группе. Грохочение в значительной степени зависит от гранулометрического состава просеиваемого материала, а важность этого параметра определяется соотношением верхних и нижних фракций. Данное соотношение может изменяться от 10 до 90%, что значительно меняет эффективность сортировки. Поэтому для определения производительности грохота по нижней фракции пользуются следующей зависимостью [3]:

$$Q_{\text{исх}} = \frac{Q_{\text{нижн}}}{\alpha * \varepsilon} \quad (1)$$

где α – содержание мелкого класса в исходном материале в долях единицы; ε – точность грохочения в долях единицы.

Отметим, что точность грохочения — это качественный показатель, который отражает степень чистоты получаемых фракций и точность разделения материала по граничному размеру. Он учитывает такие факторы, как форма зерен (игловатость), шероховатость поверхности.

Точность грохочения можно разделить по уровням в зависимости от их назначения: низкую точность в пределах 0,65 – 0,75 применяют для предварительного грохочения с целью первичного разделения материала; среднюю точность в диапазоне 0,75 – 0,85 используют при техническом грохочении, что является наиболее массовым вариантом в промышленности; повышенную точность 0,85 – 0,92 выбирают для товарного грохочения при получении готовой продукции; высокую же точность более 0.92 применяют исключительно при специальном грохочении, требующем строгого соблюдения гранулометрического состава.

Большое влияние на грохочение также оказывает влажность материала, так как увеличение влажности существенно сказывается на производительности и эффективности грохочения. Наибольшее влияние влажность оказывает при грохочении мелких зерен. Влажность имеет определенную отметку, при которой эффективность резко падает, но она не всегда оказывает пагубное воздействие так, например, в зависимости от типа сортируемого материала точность грохочения может увеличиваться или уменьшаться.

Влажность материала оказывает значительное влияние на производительность и точность грохочения, особенно при работе с мелкими зернами размером менее 5-10 мм. Увеличение влажности свыше 5-7% приводит к повышению вязкости и слипанию частиц, что замедляет процесс разделения и снижает пропускную способность грохота вплоть до 30 - 50% для различных материалов. Критический уровень влажности, при котором эффективность резко падает, зависит от типа материала и размера зерен: для песка он составляет около 15%, для глинистых 25%, а для кристаллических 8% [3].

Влага оказывает положительное влияние в таких случаях: в некотором узком диапазоне влажности 1-3%, влажность дает эффект антистатика - тонкая пленка воды снимает статическое электричество, которое часто возникает чаще всего при трении сухих

кристаллических материалов менее 0,5 мм. Это предотвращает хаотичное налипание мелких и пылевидных частиц на крупные куски. Умеренная адгезия помогает материалу двигаться по ситу более «спокойным» слоем, не допуская излишнего пыления и беспорядочного подпрыгивания частиц на высоту более 30-100 мм. Поэтому при планировании процесса грохочения необходимо учитывать конкретные свойства сортируемого материала и поддерживать влажность в оптимальном диапазоне, чтобы максимизировать эффективность и качество сортировки.

Зерна можно разделить на легкие и трудные. Легкие зерна – те, размер которых в два и более раз меньше размера отверстия сита и легко проваливаются. Трудные зерна – те, размер которых близок к размеру отверстия или меньше на 30 %. Также зерна делятся на три вида: кубовидные, игловатые, лещадь, где к последним двум типам относят частицы, чья длина превышает ширину или толщину в 3 раза и более. При этом материал классифицируют на 1-ю группу с содержанием таких зерен до 10 %, 2-ю группу - от 10 % до 15 %, 3-ю группу - от 15 % до 25 % и 4-ю группу - от 25 % до 35 %. Производительность зависит от правильного соотношения форм отверстий и зерен, поэтому важно правильно подбирать сито исходя из обрабатываемого материала, так как при работе с материалом 3 и 4 групп стандартные ячейки забиваются в 1,5-2 раза быстрее, что требует использования прямоугольных отверстий с соотношением сторон от 1:2 до 1:3 [3].

На практике эффективность грохота может оцениваться по весу или по объёму. Однако, последний способ является более рациональным, так как он даёт возможность сравнения эффективности грохотов независимо от насыпной плотности материала. А эффективность грохота по весу может быть определена из учёта насыпной плотности материала.

Рассмотрим влияние факторов, влияющих на эффективность грохочения по второй группе относящихся к параметрам вибрации.

Направление колебаний связано с направлением вращения вала вибровозбудителя и оказывает существенное влияние на эффективность грохочения.

При совпадении вращения вала с направлением перемещения материала по наклонной поверхности сита происходит увеличение скорости движения потока в 2-3 раза, что ведет к снижению эффективности грохочения вплоть до 25%. Однако при таком режиме работы значительно увеличивается производительность грохота до 30-50% и обеспечивается лучшая очистка сита от застрявших частиц [3].

При вращении вала в сторону противоположную движению материала поток зерен замедлится и будет чаще встряхиваться вследствии более длительного контакта с ситом. Это благоприятно скажется на эффективности грохочения, но снизит производительность и повысит вероятность забивания сита. Обратное вращение рекомендуется для резонансных грохотов, а также грохотов с размерами отверстий меньше 60 мм. Отметим, что большинство грохотов работает в зарезонансном режиме и чаще всего колебания короба находятся в противофазе с вибратором.

Угол наклона сита существенно влияние на эффективность грохочения. С изменением угла наклона меняется как производительность, так и эффективность процесса. При увеличении угла наклона скорость перемещения зерен возрастает, вследствие чего растет производительность, но падает эффективность грохочения. Аналогично, с уменьшением угла наклона падает производительность и увеличивается эффективность грохочения вследствие меньшей скорости потока материала. Следует отметить, что направление колебаний и угол наклона напрямую взаимосвязаны, так как они дополняют друг друга. Для резонансного грохота рекомендуемый угол наклона от 0-15%

Рассмотрим влияние амплитуды и частоты колебаний исходя из условий работы резонансного грохота. Резонансный грохот — это чаще всего грохот с направленными колебаниями, для которого скорость движения сита определяется по формуле [3]:

$$\overline{v_0} = 7.72\sqrt{h_п} \quad (2)$$

где $h_п$ – высота подбрасывания зерна, м.

При этом для обеспечения очищения сита желательно сохранять соотношение:

$$h_п \geq 0.4d_0 \quad (3)$$

где d_0 – диаметр отверстия сита, м.

При этом в случае установки нескольких сит скорость рассчитывают исходя из наибольшего размера отверстий, то есть по диаметру отверстий верхнего сита.

По полученной скорости сита определяют амплитуду и частоту колебаний по формуле:

$$v_0 = A\omega \quad (4)$$

где A – амплитуда колебаний, м;

ω - угловая скорость колебаний, рад/с.

Ускорение сита, м/с^2 будет составлять:

$$a = A\omega^2 \quad (5)$$

При этом согласно классической методике расчёта желательно подбирать диапазон ускорения близкий к 50 м/с^2. Отметим, что скорость движения сита лучше увеличивать за счет увеличения амплитуды. При этом рекомендуемые параметры амплитуды находятся в пределах 10-12 мм, а обороты - 8,3-10 об/с. При 15.83 об/с рекомендуется выбирать амплитуду 2-4 мм [4].

Данные параметры определяют интенсивность встряхивания материала и вероятность его прохождения через отверстия сита. При увеличении амплитуды и частоты колебаний материал активнее разрыхляется, что способствует быстрому прохождению мелких фракций к поверхности сита повышая производительность. Однако чрезмерное увеличение этих параметров может привести к тому, что зерна будут слишком высоко подбрасываться и перелетать через отверстия, вследствие чего эффективность грохочения начнет снижаться. Сочетание амплитуды и частоты должно стремиться к максимальной точности разделения сохраняя при этом высокую пропускную способность оборудования.

Следовательно, техническая реализация оптимального режима грохочения требует внедрения систем, работа которых базируется на принципах самосинхронизации и усиления импульса. В этом контексте одним из наиболее эффективных решений являются резонансные грохоты. Их особенность - использование резонанса для усиления колебаний, что позволяет достигать более высокой пропускной способности и точности сортировки при меньших энергетических затратах. Рассмотрим подробнее преимущества и особенности этого типа оборудования.

Данные установки занимают особое место в ряду классификационного оборудования благодаря своей эффективности и способности достигать высокой точности разделения при правильной настройке. Такой принцип работы основан на согласовании частоты вынужденных колебаний с частотой собственных колебаний системы, что приводит к усилению амплитуды колебаний и, соответственно, к более эффективной обработке материала [4].

Резонансные грохоты отличаются тонко настроенной системой, которая позволяет регулировать параметры вибрации - амплитуду, частоту и форму колебаний таким образом, чтобы достичь оптимального режима работы для конкретного вида просеиваемого материала. Это особенно важно при работе с малыми зернами и тонкими фракциями, где высокая точность разделения и минимальный уровень пылеобразования являются обязательными требованиями.

Однако тонкая настройка выступает существенным недостатком, так как она требует постоянного контроля всех параметров и автоматической подстройки под изменяющуюся технологическую нагрузку. Высокая требовательность к такой настройке, а также сложная конструкция являются причинами, по которым данные грохоты не получили широкого

распространения. В процессе работы оборудование издает шум и требует очень тщательного и систематического контроля, особенно в отношении гибких узлов [5]. Гибкие узлы нуждаются в строго равномерном начальном напряжении обеих половин, так как это определяет передачу одинакового количества кинетической энергии в обоих направлениях движения короба грохота и переход всей системы в режим резонанса.

Требуется систематический контроль износа всех эластичных компонентов из-за старения резиновых колец и буферов. Кроме того, обеспечение правильного охлаждения резиновых эластичных узлов и подбор смазочных материалов могут вызывать определенные трудности. Проблемы возможны и во время ремонта, когда необходимо уделять особое внимание сохранению неизменности масс коробов грохота и вибрирующих рам в многомассных агрегатах [5]. Поэтому наибольшее распространение получили грохоты, использующие зарезонансный режим работы, однако постепенное развитие технологий автоматизированного контроля позволяет преодолеть большую часть этих недостатков. Тем не менее продолжаются исследования, связанные с получением нелинейных систем, где форма упругой характеристики обеспечивает более широкий резонансный диапазон с меньшей чувствительностью к нагрузке.

Говоря о выборе параметров, следует отметить, что именно настройка технологических параметров вибрации приводящих к резонансу определяет баланс между производительностью и качеством сортировки. Например, увеличение амплитуды и частоты колебаний способствует более быстрому прохождению мелких частиц через отверстия, однако при этом возрастает риск избыточного пылеобразования или проскакивания в надрешетный продукт, что снижает точность разделения в результате засорения крупной фракции мелкими частицами. Поэтому основные задачи при эксплуатации резонансных грохотов - это установка оптимальных настроек, обеспечивающих максимальную эффективность без потери качества.

Еще одним важным аспектом является возможность автоматической регулировки параметров колебаний в ходе работы, что позволяет адаптировать режим грохочения под изменения свойств материала, такие как влажность или гранулометрический состав. Благодаря интегрированным системам контроля и автоматическому управлению, резонансные грохоты демонстрируют стабильную работу в течение долгого времени и обладают высокой адаптивностью к различным условиям эксплуатации.

Перспективность внедрения данного типа оборудования подтверждается практическими результатами эксплуатации резонансных двухмассных систем, в частности разработок компании General Kinematics. Их применение позволяет повысить производительность оборудования на 40 % при одновременном снижении энергопотребления на 70 %. Эффективность классификации в таких системах обеспечивается за счет значительного увеличения времени удержания материала на просеивающей поверхности - до 26-33 секунд против 6-8 секунд у стандартных грохотов прямого действия [6]. Технология двухмассных систем реагирует на нагрузку и способна поддерживать стабильную амплитуду хода при скачках подачи материала, что позволяет просеивать минералы одинаково эффективно независимо от объема загрузки. Также преимуществом является увеличение производительности без расширения габаритов, снижение потребности в мощном двигателе и значительное увеличение срока службы машины [6]. При этом специфическая конструктивная схема позволяет практически полностью исключить передачу динамических нагрузок на фундаменты и несущие металлоконструкции, предотвращая избыточное вибрационное воздействие на производственные здания.

Проведем сравнение данных таблицы, которая подчеркнет преимущества резонансных грохотов над другими типами грохотов со схожей производительностью при равных размерах отверстий сит. В табл. 1 приняты следующие обозначения: Q –

производительность, т/ч; S – рабочая площадь сита, мм^2; N – мощность привода, кВт; n – частота вращения вала, об/мин; A – амплитуда колебаний, мм; $E_{уд}$ – удельная энергоемкость, кВт/(т/ч).

Таблица 1

Сравнительные характеристики резонансных и инерционных грохотов

Модель	Q, т/ч	S, мм^2	N, кВт	n, об/мин	A, мм	$E_{уд}$, кВт/(т/ч)
EDT2050	240	10000000	11	950	6	0.05
RT2037	240	7400000	11	1000	12	0.05
2YZS1848	250	8640000	18.5	950	9	0.07
RT1847	270	8460000	11	950	12	0.04
2YK1548	275	7200000	15	870	9	0.05
RT1367	280	8710000	7.5	850	12	0.03
RT2047	300	9400000	11	1000	12	0.04
2YZS1860	300	10800000	22	950	9	0.07

Источники: [7-10]

Результаты и обсуждение.

Анализ данных таблицы позволяет выявить значительное преимущество резонансных грохотов серии RT перед традиционными инерционными агрегатами по ключевым эксплуатационным показателям. В первую очередь это проявляется в значительном снижении энергопотребления. При сопоставлении моделей RT2047 и 2YZS1860 с одинаковой производительностью 300 тонн в час видно, что резонансная машина потребляет 11 киловатт мощности, тогда как инерционная требует 22 киловатта. Таким образом, удельная энергоемкость резонансных моделей в среднем в полтора или два раза ниже и составляет от 0,03 до 0,05 против 0,07 киловатт на тонну в час у аналогов.

Динамические характеристики также указывают на технологическое превосходство резонансного принципа работы. Модели серии RT обеспечивают стабильную амплитуду 12 миллиметров, что существенно выше показателей инерционных грохотов, где этот параметр составляет 9 миллиметров. Повышенная амплитуда в сочетании с высокой частотой колебаний позволяет эффективнее расслоить материал и ускорить прохождение мелких частиц через отверстия сит. Характерным примером служит модель RT1367, которая при минимальной мощности привода 7,5 киловатт превосходит по производительности модель 2YK1548 с двигателем на 15 киловатт. Это подтверждает, что использование сил упругости в резонансном режиме позволяет достигать высоких производственных результатов при значительно меньших затратах энергии.

Обсуждение практического применения показывает, что использование резонансных двухмассных систем позволяет повысить общую производительность оборудования на 40%. Эффективность классификации в таких системах обеспечивается за счет значительного увеличения времени удержания материала на просеивающей поверхности до 33 секунд против 8 секунд у стандартных грохотов прямого действия. Технология двухмассных систем гибко реагирует на нагрузку и поддерживает стабильную амплитуду хода даже при резких скачках подачи сырья.

Важным преимуществом является специфическая конструктивная схема, которая практически полностью исключает передачу динамических нагрузок на фундаменты и несущие металлоконструкции. Это предотвращает избыточное вибрационное воздействие на производственные здания. Несмотря на повышенные требования к настройке гибких узлов и необходимость контроля износа эластичных компонентов, развитие систем автоматического управления позволяет успешно преодолевать эти ограничения, обеспечивая надежную эксплуатацию в цифровых производственных цепочках.

Выводы.

Проведенный анализ подтверждает, что применение резонансных вибрационных

грохотов является одним из наиболее перспективных направлений модернизации сортировочного оборудования. На основании полученных данных можно сделать следующие выводы:

1. Стабильная амплитуда колебаний 12 миллиметров в сочетании с резонансным усилением импульса позволяет достичь максимальной точности разделения каменных материалов даже при работе с мелкими и влажными фракциями.
2. Резонансный принцип работы обеспечивает 1,5-2-кратное снижение энергопотребления и повышение производительности на 40 процентов по сравнению с традиционными инерционными аналогами.
3. Применение двухмассных резонансных систем увеличивает время нахождения материала на сите более чем в три раза, что гарантирует качественную очистку надрешетного продукта от мелких зерен.
4. Конструктивные особенности резонансных грохотов позволяют минимизировать вибрационную нагрузку на строительные конструкции и фундамент, значительно увеличивая общий срок службы оборудования.
5. Ключевым условием эффективности является внедрение автоматизированных систем контроля, которые адаптируют параметры вибрации под изменяющийся гранулометрический состав и влажность исходного сырья.

Таким образом, глубокое понимание взаимодействия параметров вибрации с физико-механическими свойствами материала позволяет кардинально повысить экономическую эффективность и экологическую устойчивость процессов грохочения в современной промышленности.

Литература:

1. Schabacker D. Advances in screening technology in the mining sector // AT Mineral Processing. 2019. no. 07–08. P. 34–45.

2. Емцов В. А., Зедгенизов В. Г. Применение многокритериального анализа с Z-оценками и взвешенной суммой для выбора оптимального грохота в промышленности // Научный форум: технические и физико-математические науки: сборник статей по материалам XC международной научно-практической конференции (Москва, 6 ноября 2025 г.). — М.: ООО «Международный центр науки и образования», 2025. — С. 19–25.

3. Герасимов М. Д. Теоретические и технические основы совершенствования вибрационных грохотов: монография. Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2015. 126 с.

4. Вайсберг Л. А. Проектирование и расчет вибрационных грохотов / Л. А. Вайсберг. – Москва: Недра, 1986. – 144 с.

5. Friebe P., Baron R., Sheketa V. Concept of a CDR resonance screen // Mining Machines. 2022. Vol. 40, no. 1. P. 8–18. DOI: 10.32056/KOMAG2022.1.2.

6. Morton J. Screening Innovations Increase Throughput, Efficiency // Engineering and Mining Journal (E&MJ). 2025. Vol. 226, No. 1. P. 38–41.

7. Грохот серии YZS [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://zenitrus.ru/produkciya/sortirovochnoe-oborudovanie/vibracionnye-grohoty/grohot-serii-yzs/. – Дата обращения: 08.03.2026.

8. Грохот серии YK [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://zenitrus.ru/produkciya/sortirovochnoe-oborudovanie/vibracionnye-grohoty/grohot-serii-yk/. – Дата обращения: 08.03.2026.

9. Грохот серии RT [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.pspeng.com/ru/screening-and-transport/detail/rt-resonance-screens/. – Дата обращения: 08.03.2026.

10. Грохот серии EDT [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.pspeng.com/ru/screening-and-transport/detail/edt-screens-with-elliptic-oscillating-motion/. – Дата обращения: 08.03.2026.

Prospects for the Application of Two-Mass Resonance Systems in Modern Technological Screening Processes

Emtsov V.A.[1,a], Zedgenizov V.G.[1,b]
[1]Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontov St., Irkutsk, Russia, 664074
[a]valeriy.emtsov2@mail.ru, [b]vzedgenizov@bk.ru

Keywords: resonance screens, vibration parameters, stone material separation, screening efficiency, two-mass systems.

The article examines the application of resonance vibration screens for the separation of stone materials. The influence of key vibration parameters, including amplitude, frequency, and direction of oscillations, on the overall efficiency of screening processes is analyzed. A detailed factor analysis is conducted, taking into account the grain-size distribution and moisture content of the raw material, as well as the design features of the equipment. A comparative evaluation of the RT series resonance systems and traditional inertial units of the YZS or EDT series confirms the technological superiority of the former. It has been established that the resonance mode provides a 1.5-2-fold reduction in energy consumption while increasing productivity by 40 percent. The use of two-mass systems with a stable amplitude of 12 millimeters allows for increasing the material's residence time on the screen up to 33 seconds, ensuring high separation accuracy even for complex fractions. The authors conclude that the implementation of automated vibration parameter control is a necessary condition for improving the economic efficiency and reliability of modern sorting systems.

УДК 67.05

Мощность привода бетоноотделочной машины с ленточно-валковым рабочим органом

Мамаев Л.А.[1,a], Герасимов С.Н.[1,b], Кашуба В.Б.[1,c], Востоков Н.В.[1,d]
[1]Братский Государственный Университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия
[a]mamaevla@yandex.ru, [b]sdm_gerasimov@ramber.ru, [c]kvb1964@yandex.ru, [d]vostokov12@mai.ru

Ключевые слова: привод, ленточно-валковый, отделка, бетон, мощность, процессы, составы, железобетон, заглаживание, формулы, характеристики, смеси, расчёт, мощность привода, заглаживающая способность, обработка бетонной поверхности.

В данной статье был произведён анализ энергозатрат возникающих в процессе обработки незатвердевшей бетонной поверхности с помощью ленточно-валкового рабочего органа. Произведён расчёт мощности привода ленточно-валкового рабочего органа с помощью методики А.В. Болотного. Найдено математическое выражение для определения длины пути трения ленточно-валкового рабочего органа по обрабатываемой поверхности с целью её использования для оценки износостойкости данного рабочего органа и определения интенсивности износа. Найдена зависимость для теоретического определения заглаживающей способности ленточно-валкового рабочего органа.

Исследование процессов, происходящих в бетонной смеси при ее контакте с поверхностью заглаживающих рабочих органов, показало, что природа этих процессов

сложна и разнообразна. Составы бетонных смесей, применяемых в строительстве, разнообразны. Это обстоятельство затрудняет возможность точного математического описания процесса, происходящего между трущейся поверхностью рабочего органа и бетонной смесью. В процессе трения заглаживающего органа по бетонной смеси происходит разрушение сложившейся после уплотнения структуры поверхностного слоя и соответственно перераспределение частиц заполнителя градиентного слоя с механическим вдавливанием в бетонную смесь крупных фракций. Попытки аналитически учесть в совокупности эти явления приводят к чрезвычайно громоздким математическим выкладкам и конечные формулы энергетических затрат на заглаживание получаются в виде, неприемлемом для их конкретного использования. Однако промышленность железобетона требует хотя бы приближенных, но верных данных для определения энергозатрат процесса заглаживания при условии удовлетворения необходимых требований к чистоте заглаживания и рельефообразованию поверхности изделий [1,3,6].

Анализ энергозатрат на процесс обработки бетонной поверхности и полученные результаты.

Одна из причин недостаточно удовлетворительной работы существующих многовалковых заглаживающих машин заключается в том, что в некоторых случаях неправильно выбрана мощность привода рабочего органа, из-за чего валки вращаются неравномерно, а иногда и вообще останавливаются. Кроме того, на качество заглаживания отрицательно влияет неравномерная скорость заглаживания, что возникает в случаях пробуксовки колес портала машины [6].

Расчет мощности привода ленточно-валкового рабочего органа и самой заглаживающей машины, произведём используя методику А.В. Болотного [1].

Суммарная мощность двигателей заглаживающей машины запишется в следующем виде:

$$N_{\Sigma} = N_1 + N_2 + N_3 + N_4, \quad (1)$$

где N_1 – мощность, расходуемая на вращение валка; N_2 – мощность, расходуемая на перемещение волны бетонной смеси; N_3 – мощность, расходуемая на передвижение машины; N_4 – мощность, расходуемая на перемещение валков, цепью объединённых в ленту.

Мощность, расходуемая на вращение валка определяется по формуле:

$$N_1 = \frac{P_{вр} \cdot B \cdot \upsilon_B}{R}, \quad (2)$$

где υ_B - окружная скорость валка, м/с; R_B - радиус валка, м; B – длина валка, м; $P_{вр}$ – сопротивление вращению валка, кг:

$$P = f_1 G;$$

где f_1– коэффициент трения бетонной смеси по стали (f_1 = 0,5..0,7); G – давление валка на бетонную смесь, определяемое по формуле

$$G = \frac{\eta \omega_B B h_{cp}^4}{H_c^3}, \quad (3)$$

здесь H_c - толщина слоя, в котором происходит перераспределение частиц бетонной смеси в процессе заглаживания (градиентный слой), м; ω_B - угловая скорость валка, $с^{-1}$; h_{cp} – толщина избыточного слоя бетонной смеси, срезаемой валком при заглаживании (обычно h_{cp} = 0,01 м); η - коэффициент вязкости бетонной смеси.

Мощность N_2 расходуемая на перемещение волны бетонной смеси (рис.1) определяется из размеров волны объемом $b \times h \times B$.

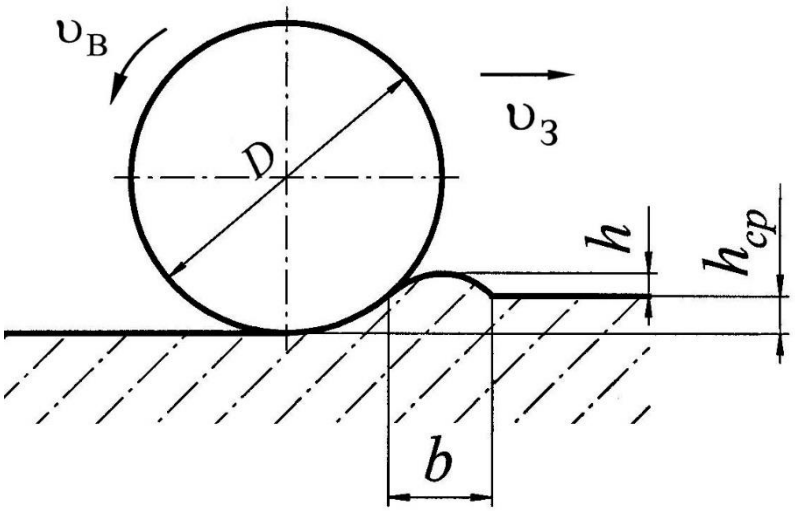


Рис.1. Схема к определению мощности привода валка ленточно – валкового рабочего органа

Вес этой волны выражается:

$$Q = \frac{bhB \cdot \rho_{бет}}{2}, \tag{4}$$

где $\rho_{бет}$ - плотность бетонной смеси, кг/м^3.

Сопротивление P_1 перемещению бетонной смеси

$$P_1 = Q f, \tag{5}$$

где f_1 = 0,5..0,6 – коэффициент внутреннего трения бетонной смеси.

Следовательно, мощность на перемещение волны бетонной смеси

$$N_2 = P_1 \upsilon_3, \tag{6}$$

где $\upsilon_з$ – скорость заглаживания, м/с.

Мощность, расходуемая на перемещение машины,

$$N_3 = \frac{P_K \upsilon_3}{\eta_1}, \tag{7}$$

где η_1 – КПД трансмиссии; $P_к$- сопротивление качению колес и трения в подшипниках.

$$P_K = \frac{G_м(2\mu + df_2 K_P)K_И}{D_K}, \tag{8}$$

где $G_м$– масса машины, Н; μ – коэффициент трения качения (0,03..0,05); d – диаметр подшипника ходового колеса, м; K_P – коэффициент трения скольжения в ребордах колес (1,45..2,20); f_2 – коэффициент трения в подшипниках (0,015..0,1); D_K – диаметр ходового колеса, м; $K_И$ – коэффициент инерции покоя (3,0..4,0).

Мощность, расходуемая на перемещение валков, цепью объединённых в ленту, может быть определена по известной [2] приближённой формуле, используемой при расчёте мощности ленточно – цепного конвейера:

$$N_4 = Qwl_л g/3.6, \tag{9}$$

где Q – массовая производительность конвейера, т/ч; w = 1.0-4.2 – обобщённый коэффициент сопротивления, зависящий от сопротивления опорных отклоняющихся и приводных элементов; $l_л$ – длина трущейся ветви ленты, м.

Массовая производительность ленточно – цепного конвейера определяется формулой:

$$Q = 3.6q\upsilon_л, \quad (10)$$

где q – масса одного погонного метра цепи и валков, кг/м; $\upsilon_л$ – скорость перемещения ленты, м/с.

Подставляя выражения (10) в формулу (9), окончательно получим:

$$N_4 = q\upsilon_л w l_л g \quad (11)$$

Теперь, подставив (2), (6), (7) и (11) в формулу (1), можно записать ее в общем виде:

$$N_\Sigma = \frac{P \cdot B \cdot \upsilon_В}{R_В} + P_1 \cdot \upsilon_З + \frac{P_К \cdot \upsilon_З}{\eta_1} + q\upsilon_л w l_л g \quad (12)$$

В ходе работы над статьей были достигнуты следующие результаты:

1) Получены формулы, позволяющие теоретически определить заглаживающую способность ленточно-валкового рабочего органа.

2) Получено выражение необходимое для определения мощности привода ленточно-валкового рабочего органа и внесена поправка в выражение для определения энергозатрат всей заглаживающей машины.

3) Найдено математическое выражение для определения длины пути трения ленточно-валкового рабочего органа по обрабатываемой поверхности с целью ее использования для оценки износостойкости данного рабочего органа и определения интенсивности износа.

Из всего сказанного выше можно сделать вывод, что попытки аналитически учесть в совокупности сложные процессы, происходящие в поверхностном слое бетонной смеси при её обработке приводят к чрезвычайно громоздким математическим выкладкам и конечные формулы энергетических затрат на заглаживание бетонной поверхности получаются в виде, неприемлемом для их конкретного использования.

Литература:

1. Болотный, А.В. Теория и процессы заглаживания: диссертация … доктора технических наук. – Л.: ЛИСИ, 1974.

2. Зенков, Р.Л. Машины непрерывного транспорта / Р.Л. Зенков, И.И. Ивашков, Л.Н. Колобов. – М.: Машиностроение, 1987. – 432 с.

3. Ахвердов, И.Н. Основы физики бетона. – М.: Стройиздат, 1981. – 464 с.

4. Ахматов, А.С. Молекулярная физика сплошных сред. – М., 1967.

5. Болотный, А.В. Заглаживание бетонных поверхностей. – Л.: Стройиздат, Ленинградское отделение, 1979. – 128 с.

6. Кононов, А.А. Определение рациональных параметров и режимов работы вибрационного валкового рабочего органа для обработки бетонных поверхностей: диссертация … кандидата технических наук: 05.05.04. – Братск, 2001. – 195 с.

Drive power of a concrete finishing machine with a belt-roller working element

Mamaev L.A.[1,a], Gerasimov S.N.[1,b], Kashuba V.B.[1,c], Vostokov N.V.[1,d]
[1]Bratsk State University, Makarenko St. 40, Bratsk, Russia
[a]mamaevla@yandex.ru, [b]sdm_gerasimov@ramber.ru, [c]kvb1964@yandex.ru, [d]vostokov12@mai.ru

Keywords: drive, belt-roller, finishing, concrete, power, processes, compositions, reinforced concrete, troweling, formulas, characteristics, mixtures, calculation, drive power, troweling ability, concrete surface treatment.

This article presents an analysis of energy expenditures arising in the process of treating an unhardened concrete surface using a belt-roller working tool. The power of the belt-roller working tool drive was calculated using the methodology of A.V. Bolotny. A mathematical expression was

found for determining the friction path length of the belt-roller working tool on the treated surface, with the aim of using it to assess the wear resistance of this working tool and to determine the wear intensity. A dependence was found for the theoretical determination of the smoothing capability of the belt-roller working tool.

УДК 622 24 053

Условия бездефектной обработки незатвердевшей бетонной поверхности ленточно-валкового рабочего органа

Мамаев Л.А.[1,a], Кашуба В.Б.[1,b], Востоков Н.В.[1,c]
[1]Братский Государственный Университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия,
[a]mamaevla@yandex.ru, [b]kvb1964@yandex.ru, [c]vostokov12@mai.ru

Ключевые слова: бетонная поверхность, дефекты на бетонной поверхности, ленточный рабочий орган, валковый рабочий орган, ленточно-валковый рабочий орган, условия бездефектной обработки поверхности, бетонная смесь.

В данной статье был произведён анализ характеристик взаимодействия ленточно-валкового рабочего органа с обрабатываемой поверхностью. Определён характер течения глубинного слоя смеси в зоне взаимодействия рабочего органа к поверхности. Определённо условное отсутствие дефектов в виде трещин на обрабатываемой поверхности в виде наплывов и гребней. Показано, что для рабочего органа с валками, объединёнными в ленту скорость заглаживания может быть существенно увеличено. В работе был сделан вывод о возможности существенного увеличения производительности бетоноотделочной машины с ленточно-валковым рабочим органом.

Доля заглаживающих машин с валковым рабочим органом не превышает 9% в общей массе эксплуатирующихся, а с ленточным рабочим органом не эксплуатируется вовсе, за исключением нескольких единиц, ранее вводившихся в опытную эксплуатацию. Опыт эксплуатации рассматриваемых машин показал, что обработка валовыми рабочими органами поверхностей изделий, отформованных из жёстких бетонных смесей с низким водоцементным отношением, не позволяет обеспечить достаточно интенсивное воздействие рабочего органа на обрабатываемую поверхность и тем самым перераспределить компоненты поверхностного слоя смеси в наиболее плотную упаковку, а к поверхности трения вытеснить необходимое для ее качественной обработки количество водопесчаного цементного молочка, что существенно снижает качество обработки поверхности и приводит к необходимости увеличения числа проходов рабочего органа по обрабатываемой поверхности [1,2,6]. Кроме этого, у ленточных рабочих органов в процессе работы даже на маложестких бетонных смесях, лента быстро изнашивается – на ней возникают задиры, в дальнейшем оставляющие следы на поверхности изделия, что приводит к существенному снижению качества обработки бетонной поверхности. Отмеченные недостатки обуславливают малое число заглаживающих машин, эксплуатирующихся с ленточными и валковыми рабочими органами.

Вместе с тем, данные рабочие органы обладают рядом преимуществ, а именно: применение валкового рабочего органа даёт возможность обрабатывать поверхность изделий за один проход, обеспечивает заглаживание криволинейных поверхностей, производит калибровку изделий с целью получения строгой геометрической формы. Ленточный рабочий

орган, хотя и не обеспечивает заглаживания криволинейных поверхностей, обладает более высокой производительностью по сравнению с валковым.

На кафедре СДМ БрГУ предложена конструкция ленточно-валкового рабочего органа, направленная на существенное снижение вышеуказанных недостатков. Соответственною определение условий бездефектной обработки поверхности данным рабочим органом является достаточно актуальной задачей.

Анализ режимов заглаживания и полученные результаты.

При взаимодействии вращающегося рабочего органа в виде валка и бетонной смеси в зоне их контакта образуется градиентный слой. Положение границы этого слоя будет определяться кривой $A_1C_1B_1$ (рис.1). При вращении валка и одновременном поступательном движении его конфигурация градиентного слоя будет несколько отличаться от слоя, определяемого кривой $A_1C_1B_1$.

Так как в силу некоторых особенностей, присущих тиксотропным структурам, время изотермического перехода ***гель*** ⇔ ***золь*** вполне определенно и зависит от прочности структуры и интенсивности воздействия. Данные по кинетике обратимого тиксотропного превращения для цементного теста приведены в табл.1 [2].

Таблица 1

Кинетика обратимого тиксотропного превращения для цементного теста

В/ц цем. теста	**Время полного разрушения структуры, сек**	**Время восстановления структуры после ее разрушения, сек**
0,28	25-30	25-30
0,35	10-15	10-15
0,40	6-10	6-10
0,45	1-2	1-2

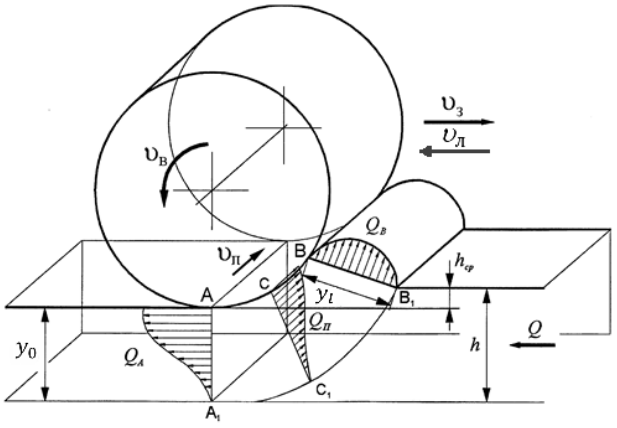


Рис.1. Расчетная схема для определения условий бездефектной Обработки бетонной поверхности

Позади рабочего органа остается слой разжиженного бетона толщиной АА1, а длина его определяется свойствами обрабатываемого материала.

Первое – это течение в градиентном слое, образующегося под действием вращения валкового рабочего органа в силу сцепления его с материалом. Направление скоростей частиц этого слоя, увлекаемого валковым рабочим органом, совпадает с направлением его движения. Второе – это течение материала в плоской щели под воздействием поступательного движения рабочего органа. Оно аналогично течению жидкости, находящейся между двумя пластинами при их сближении. В этом случае материал течет в двух взаимно противоположных направления, как бы вдавливается в обе стороны [6].

Таким образом, при воздействии рабочего органа на бетонную смесь, последняя, разжижаясь, течет в трех направлениях. Общий расход разжиженного материала равен сумме

расходов через сечение BB_1, AA_1 и через поперечное сечение $ACBB_1C_1A_1$. Обозначим их соответственно Q_B, Q_A и $Q_П$.

Причем

$$Q_A = \upsilon_а \cdot y_0, \quad (1)$$

где υ_a – средняя скорость движения смеси в сечении AA_1; y_0 – толщина разжиженного слоя, остающегося за рабочим органом при его поступательном движении;

$$Q_B = \upsilon_в \cdot y_l, \quad (2)$$

где $\upsilon_в$ – средняя скорость движения смеси в сечении BB_1; y_l – толщина разжиженного слоя в сечении BB_1.

$$Q_П = \upsilon_П \cdot y_{ср}, \quad (3)$$

где $\upsilon_п$ – средняя скорость движения смеси в поперечном сечении CC_1; $y_{ср}$ – средняя толщина разжиженного слоя в сечении CC_1

$$y_{ср} = \frac{y_0 + y_l}{2}. \quad (4)$$

На рабочий орган, при его поступательном движении набегает поток, характеризующийся размером $h = h_{ср} + y_0$, где $h_{ср}$ - толщина слоя материала перед органом. Расход набегающего потока, очевидно, будет равен $Q = \upsilon_З \cdot h$, где $\upsilon_З$ - скорость поступательного движения рабочего органа (скорость заглаживания). Ясно, что состояние поверхности заглаженного изделия будет зависеть от соотношения четырех расходов Q, Q_A, Q_B и $Q_П$. Сумма расходов Q_A, Q_B и $Q_П$ характеризует по существу «пропускную способность рабочего органа», и если эта способность соответствует расходу набегающего потока Q, то, в соответствии с условием неразрывности потока дефекты, такие как разрывы в виде трещин, на поверхности изделия возникать не будут. Они будут также отсутствовать и в случае $Q < Q_A + Q_B + Q_П$. Это условие будет лишь свидетельствовать о том, что «пропускная способность» рабочего органа больше расхода набегающего потока. В этом случае контакт рабочего органа со средой в некоторой части градиентного слоя может быть периодическим. Если же $Q > Q_A + Q_B + Q_П$ - трещины на поверхности изделия появятся неизбежно. Необходимо заметить, что обрабатываемая бетонная смесь предполагается уплотненной и несжимаемой [3,6].

Таким образом, условие отсутствия макродефектов поверхности заглаживаемого изделия можно записать в виде:

$$Q \leq Q_A + Q_B + Q_П. \quad (5)$$

Однако трещины на поверхности изделия не единственный макродефект. Могут иметь место наплывы и характерные волны. Рабочий орган при своем перемещении по поверхности обрабатываемого изделия со скоростью $\upsilon_З$ оставляет при бездефектном заглаживании ровный слой разжиженного бетона толщиной $y_{0(0)}$. Можно предположить, что в этом случае расход в сечении AA_1 будет равен $\upsilon_З \cdot y_0$.

Но нам известно, что расход в сечении AA_1 равен: $\upsilon_a \cdot y_0$. Поскольку валки объединены в ленту, поступательно движущеюся в сторону, противоположную направлению заглаживания, то средняя скорость движения смеси в сечении AA_1 будет определяться разницей скоростей заглаживания и линейного перемещения ленты

$$\upsilon_a = \upsilon_З - \upsilon_л, \quad (6)$$

где $\upsilon_л$ - линейная скорость перемещения ленты

Поэтому естественным условием бездефектности в данном случае будет равенство $\upsilon_а = \upsilon_З - \upsilon_л$.

Действительно, если средняя скорость разжиженного бетона в сечении AA_1 будет больше разницы скоростей $\upsilon_З - \upsilon_л$, бетон начнет выдавливаться из-под рабочего органа с образованием наплывов. Если же $\upsilon_а$ будет меньше $\upsilon_З - \upsilon_л$, то основная масса разжиженного бетона будет уносится рабочим органом в результате его вращения, и на поверхности изделия появятся характерные гребни [6].

Очевидно, что требуемое качество поверхности может быть получено лишь при условии, если

$$Q \le Q_A + Q_B + Q_П,$$
$$Q_A = (\upsilon_з - \upsilon_л)\cdot y_0$$

Опыт эксплуатации двух и трёх валковых заглаживающих машин показывает, что достаточный расход материала в сечении AA_1 формируется при скоростях заглаживания, понимаемых как скорость передвижения портала машины, на котором закреплён рабочий орган, не превышающих $\upsilon_з \le 0.08$ м/с и при обработке маложёстких и умеренно жёстких бетонных смесей составляет 0.05 м/с. При этом расход в сечении AA_1 определяется зависимостью $Q_A = \upsilon_З \cdot y_0$.

В случае использования ленточно-валкового рабочего органа расход в том же сечении будет определяться зависимостью $Q_A = (\upsilon_з - \upsilon_л)\cdot y_0$. При минимально допустимой линейной скорости перемещения ленты $\upsilon_л$ = 0,07-0,09 м/с и неизменной толщине градиентного слоя y_0 достаточный расход материала в том же сечении будет формироваться при значительно больших скоростях заглаживания в пределах 0.12-0.14 м/с. Поскольку производительность заглаживающей машины определяется главным образом скоростью перемещения рабочего органа по обрабатываемой поверхности, то есть скоростью заглаживания, можно предположить, что производительность машины с ленточно-валковым рабочим органом теоретически может быть существенно увеличена.

Из всего выше сказанного можно сделать выводы:

1) При механическом воздействии ленточно-валкового рабочего органа на структурированную систему, в частности на бетонные смеси, сопровождающимся деформациями сдвига, структурная вязкость системы понижается и в зоне контакта рабочего органа с бетонной смесью формируется градиентный слой.

2) В соответствии с условием неразрывности потока градиентного слоя, дефекты в виде трещин на обработанной поверхности не будут возникать при равенстве расхода набегающего на рабочий орган потока сумме расходов через сечение в зоне действия рабочего органа.

3) Дефекты в виде наплывов и гребней на обработанной поверхности будут отсутствовать только в том случае, когда расход в сечении AA_1 на границе обработанной и необработанной частей поверхности будет равен произведению разницы скоростей заглаживания и поступательного перемещения ленты на толщину разжиженного градиентного слоя.

4) Обеспечение достаточного расхода материала в сечении AA_1 на границе обработанной и необработанной частей поверхности изделия требует значительного увеличения скорости заглаживания, определяющей производительность машины. Последнее позволяет заключить, что производительность машины с ленточно-валковым рабочим органом теоретически может быть существенно увеличена.

Литература:

1. Мамаев, Л.А. Экспериментальные исследования в области обработки бетонных поверхностей / Л.А. Мамаев, В.Б. Кашуба, А.А. Кононов, С.Н. Герасимов. – Братск : Братский государственный университет, 2006. – 146 с.

2. Мамаев, Л.А. Взаимодействие вибрационных рабочих органов машин с поверхностью бетонных смесей. – Иркутск : Изд-во Иркутского гос. техн. ун-та, 2005. – 123 с.

3. Вайскранц, В.М. Повышение эффективности использования машин для земляных работ в условиях жаркого климата. – М. : Стройиздат, 1983. – 84 с.

4. Болотный, А.В. Заглаживание бетонных поверхностей. – М. : Стройиздат, 1979. – 128 с.

5. Болотный, А.В. Теория и процессы заглаживания бетонных поверхностей. – Л. : ЛИСИ, 1975. – 93 с.

6. Ахвердов, И.Н. Основы физики бетона. – М. : Стройиздат, 1981. – 464 с.

Кононов, А.А. Определение рациональных параметров и режимов работы вибрационного валкового рабочего органа для обработки бетонных поверхностей : диссертация … кандидата технических наук : 05.05.04. – Братск, 2001. – 195 с.

7. Основы гидравлики в строительстве // Spravochnick. – URL: https://spravochnick.ru/arhitektura_i_stroitelstvo/osnovy_gidravliki_v_stroitelstve/ (дата обращения: 15.03.2026).

Conditions for defect-free processing of unhardened concrete surface using a belt-roller working element

Mamaev L.A.[1,a], Kashuba V.B.[1,b], Vostokov N.V.[1,c]
[1]Bratsk State University, 40 Makarenko str., Bratsk, Russia
[a]mamaevla@yandex.ru, [b]kvb1964@yandex.ru, [c]vostokov12@mai.ru

Keywords: concrete surface, defects on concrete surface, belt working element, roller working element, belt-roller working element, conditions for defect-free surface treatment, concrete mixture.

This article analyzes the interaction characteristics of a belt-roller working element with the surface being processed. The nature of the flow of the deep mixture layer in the zone where the working element interacts with the surface is determined. A relative absence of defects, such as cracks and ridges, on the processed surface is confirmed. It is shown that the smoothing speed can be significantly increased for a working element with rollers combined into a belt. The study concludes that the productivity of a concrete finishing machine with a belt-roller working element can be significantly increased.

УДК 621.86

Разработка облегченной передвижной инструментальной тележки для выполнения ремонтных работ

Быценко М.В.[1,a], Любимый Н.С.[1,b], Клименко М.А.[1,c], Вычик В.П.[1,d]
[1]Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, ул. Костюкова 46, г. Белгород, Россия
[a]b.michutka2005@gmail.com, [b]nslubim@bk.ru, [c]mihail.klimenko.26@gmail.com,
[d] vladvychik@yandex.ru

Ключевые слова: ремонтная тележка, мобильность, эргономика, облегченная конструкция, организация инструмента.

В статье представлена разработка облегченной мобильной тележки для проведения ремонтных и технических работ. Рассмотрена конструкция тележки с многоуровневой системой хранения инструмента, выполненной из перфорированного листового материала. Проведен анализ эргономических характеристик и расчет массы конструкции. Показано, что применение перфорированных панелей позволяет снизить массу тележки до 30% при сохранении необходимой прочности. Предложенная конструкция обеспечивает рациональное размещение инструмента, сокращает время на его поиск и подготовку рабочего места, снижает физическую нагрузку на ремонтный персонал. Разработанная

тележка может быть рекомендована к применению на предприятиях при проведении технического обслуживания и ремонта оборудования.

Введение.

Эффективность проведения ремонтных и технических работ во многом определяется уровнем организации рабочего места и доступностью необходимого инструмента. В условиях современного производства, где требуется быстрое реагирование на неисправности оборудования, особую актуальность приобретают мобильные решения для транспортировки и хранения инструмента [1, 2].

Традиционные методы хранения инструмента в стационарных шкафах и ящиках не обеспечивают необходимой мобильности при проведении ремонтных работ в различных точках производственных помещений. Существующие мобильные тележки часто имеют избыточную массу, что затрудняет их перемещение и снижает эргономические характеристики [3, 4].

Целью данной работы является разработка конструкции облегченной мобильной тележки для проведения ремонтных работ с улучшенными эксплуатационными и эргономическими характеристиками.

Методика исследования.

Расчет массы конструкции проводился методом суммирования масс отдельных элементов. Для определения прочности и жесткости применялся инженерный расчет с использованием теории сопротивления материалов. Напряженно-деформированное состояние каркаса оценивалось при максимальной полезной нагрузке 100 кг с коэффициентом запаса прочности 1,5.

Эргономическая оценка выполнялась методом анализа соответствия конструктивных параметров антропометрическим характеристикам человека [5].

Экономическая эффективность рассчитывалась методом сравнительного анализа материальных затрат и эксплуатационных показателей с серийно выпускаемыми аналогами.

Результаты и обсуждение.

Разработанная тележка представляет собой многофункциональное мобильное средство для транспортировки и хранения инструмента.

Конструкция включает металлический каркас из профильных труб, три основных яруса для размещения инструмента, верхнюю площадку и систему колес для обеспечения мобильности (рис. 1).

Рис. 1. Модель разработанной инструментальной тележки

Основной особенностью конструкции является применение перфорированного листового металла толщиной 2-3 мм для изготовления боковых стенок и перегородок ярусов. Перфорация диаметром 8-10 мм с шагом 20 мм позволяет существенно снизить массу конструкции при сохранении необходимой жесткости и прочности.

Система хранения инструмента включает три основных наклонных яруса для размещения плоскогубцев, отверток, ключей и другого ручного инструмента, верхнюю горизонтальную площадку для часто используемого инструмента и деталей, а также боковые и вертикальные держатели для накидных, рожковых ключей и длинномерного инструмента.

Наклонное расположение ярусов (угол 20° к горизонтали) обеспечивает удобство визуального контроля наличия инструмента и быстрого доступа к нему. Тележка оснащена четырьмя поворотными колесами диаметром 125 мм, два из которых имеют тормозные устройства для фиксации положения при проведении работ.

Масса тележки рассчитывалась как сумма масс основных конструктивных элементов по формуле (1):

$$m = m_{кар} + m_{пан} + m_{кол}\ , \qquad (1)$$

где $m_{\text{кар}}$ – масса каркаса из профильных труб, $m_{\text{пан}}$ – масса перфорированных панелей, $m_{\text{кол}}$ – масса колесной системы.

При использовании профильной трубы 20×20×2 мм для каркаса общая масса каркаса составляет приблизительно 15 кг. Применение перфорированного листового металла вместо сплошного позволяет снизить массу панелей на 25-30% и составляет около 12 кг. Масса колесной системы не превышает 3 кг.

Общая масса разработанной тележки составляет приблизительно 30 кг, что на 35% меньше массы традиционных цельнометаллических тележек аналогичных размеров. Прочностной расчет показал, что при снижении массы за счет перфорации, конструкция сохраняет необходимую жесткость и способна выдерживать полезную нагрузку до 100 кг без остаточных деформаций.

Эргономический анализ тележки проводился по критериям удобства доступа, рациональности размещения инструмента и снижения физической нагрузки на оператора. Высота рабочей поверхности (850-900 мм), выбранная с учетом антропометрических данных человека среднего роста, позволяет работать без наклона корпуса, что способствует снижению утомляемости и повышению эффективности труда.

Размещение инструмента на наклонных поверхностях в зоне прямой видимости и досягаемости снижает количество наклонов и поворотов корпуса при работе, что уменьшает физическую нагрузку на оператора. Боковые держатели для ключей обеспечивают быстрый доступ к наиболее часто используемому инструменту, сокращая время поиска.

Экономический эффект от внедрения разработанной тележки обусловлен снижением материалоемкости конструкции на 25% за счет использования перфорированных элементов по сравнению с цельнометаллическими аналогами (рис. 2). Дополнительно достигается сокращение времени на подготовку рабочего места и поиск необходимого инструмента на 30–35%, что напрямую повышает производительность ремонтных работ.

Важным фактором эффективности является снижение утомляемости персонала за счет улучшенных эргономических характеристик, что косвенно уменьшает количество ошибок и простоев в работе.

Технический паспорт
Руководство по сборке

2.Технические характеристики и комплектность.
Технические характеристики тележки

Наименование		Значение параметра
		SELF
Масса изделия, кг		42
Габаритные размеры тележки инструментальной в сборе (ВхШхГ), не более		855x851x464
Габаритные размеры корпуса тележки (ВхШхГ), не более		730x775x450
Ящик Н-80	Внутренние размеры, мм.	75 x 645 x 400
	Количество, шт.	3
Ящик Н-170	Внутренние размеры, мм.	165 x 645 x 400
	Количество, шт.	2

Рис. 2. Характеристика массы стандартной цельнометаллической инструментальной тележки

Выводы.

Разработана конструкция мобильной тележки для проведения ремонтных работ с облегченной конструкцией на основе применения перфорированных металлических панелей. Применение перфорированных листовых материалов позволяет снизить массу тележки на 25% при сохранении необходимой прочности и жесткости конструкции. Многоуровневая система организации инструмента с наклонными поверхностями хранения обеспечивает рациональное размещение инструмента и сокращает время на его поиск.

Общая масса тележки составляет около 30 кг, что на 35% меньше массы традиционных аналогов, при этом полезная нагрузка составляет до 100 кг. Внедрение разработанной тележки позволяет повысить эффективность ремонтных работ за счет сокращения времени на подготовку рабочего места и снижения физической нагрузки на персонал.

Перспективным направлением дальнейших исследований является разработка модульной системы тележек и применение композитных материалов для дополнительного снижения массы.

Литература:

1. Еремеева, Е. Н. Организация рабочего пространства на основе принципов бережливого производства / Е. Н. Еремеева, А. Ю. Нечаева, С. С. Паршина // Академическая публицистика. – 2021. – № 12-2. – С. 136-140.

2. Joshi, M. A systematic review of comparative studies on ergonomic assessment techniques / M. Joshi, V. Deshpande // International Journal of Industrial Ergonomics. – 2019. – Vol. 74. – P. 102865.

3. Топологическая оптимизация элементов конструкции роботизированной ячейки / С. И. Анциферов, А. В. Карачевцева, Е. А. Сычев, А. А. Литвишко // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2023. – № 11. – С. 93-102. – DOI 10.34031/2071-7318-2023-8-11-93-102.

4. Оценка экономической эффективности технологии изготовления композитных металл-металлополимерных деталей в сравнении с аддитивной и субтрактивной технологиями / Н. С. Любимый, А. А. Польшин, А. А. Тихонов [и др.] // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2022. – № 5. – С. 91-105. – DOI 10.34031/2071-7318-2022-7-5-91-105.

5. ГОСТ Р ИСО 6385–2016. Эргономика производственных систем. Применение эргономических принципов при проектировании производственных систем. Москва, Стандартинформ, 2016.

Development of a lightweight mobile tool cart for repair work

Bytsenko M.V.[1,a], Lyubimiy N.S.[1,b], Klimenko M.A.[1,c], Vychik V.P.[1,d]
[1]Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 46 Kostyukov st., Belgorod, Russian Federation
[a]b.michutka2005@gmail.com, [b]nslubim@bk.ru, [c]mihail.klimenko.26@gmail.com, [d]vladvychik@yandex.ru

Keywords: repair cart, mobility, ergonomics, lightweight design, tool organization.

Abstract. The article presents the development of a lightweight mobile cart designed for repair and technical operations. The study examines a cart construction featuring a multi-level tool storage system manufactured from perforated sheet material. We conducted an analysis of ergonomic characteristics and calculated the structure mass. Results indicate that applying perforated panels reduces the cart weight by approximately 30% while preserving required strength and rigidity. The proposed design ensures rational tool organization, significantly shortens tool search time and workplace preparation, and reduces physical strain on repair personnel. Furthermore, the inclined shelves improve visual control and access. The developed cart is recommended for implementation in industrial enterprises during equipment maintenance and repair processes to enhance operational efficiency.

УДК 621.432/004.932

Анализ цифровых изображений хроматограмм моторного масла Shell Rimula 10W-40 в программе ImageJ с использованием инструмента Plot Profile

Корнеева В.К.[1,a], Капцевич В.М.[1,b], Цымбалюк А.И.[1,c], Пернач Е.Е.[1,d], Селицкий Е.И.[1,e]
[1]Белорусский государственный аграрный технический университет, пр. Независимости, 99, г. Минск, Республика Беларусь
[a]lerakor1974@mail.ru, [b]slavakap47@mail.ru

Ключевые слова: моторное масло, *Shell Rimula* 10*W*-40, капельная проба, хроматограмма, цифровая обработка изображений, *ImageJ*, *Plot Profile*, коэффициент деградации.

В статье представлены результаты исследования возможности применения компьютерного анализа цифровых изображений хроматограмм моторного масла Shell Rimula

10W-40 для оценки степени его деградации в процессе эксплуатации. Анализ проводился с использованием программы ImageJ и инструмента Plot Profile для получения профилей интенсивности окрашивания масляных пятен. Исследование выполнено на образцах масла с различной наработкой: 25, 70, 110, 153, 200 и 250 ч. В качестве диагностического параметра предложен безразмерный коэффициент деградации KD, определяемый как отношение разности максимальной и минимальной интенсивностей окрашивания профиля к их сумме. Значение KD увеличивается от 0,316 для свежего масла до 0,649 после 250 ч эксплуатации, что свидетельствует о накоплении высоковязких и полярных продуктов деградации в масле. Разработанная методика позволяет проводить экспресс-оценку состояния моторных масел без применения сложного лабораторного оборудования.

Введение.

Моторные масла являются незаменимым элементом современных двигателей внутреннего сгорания (ДВС), обеспечивая надежную смазку трибосопряжений, отвод тепла от нагретых деталей, защиту металлических поверхностей от коррозии, а также удаление продуктов износа и загрязнений из зоны трения [1]. В процессе эксплуатации автотракторной техники происходит постепенная деградация моторного масла под воздействием комплекса физико-химических факторов: высоких температур в цилиндропоршневой группе, механических нагрузок, контакта с атмосферным кислородом и продуктами неполного сгорания топлива. Продукты окисления, полимеризации и термического разложения базовых компонентов и присадок масла накапливаются в его объеме, изменяя химический состав и эксплуатационные характеристики смазочного материала, что непосредственно влияет на ресурс и работоспособность двигателя.

Контроль состояния моторного масла является важной задачей технического обслуживания и ремонта автотракторной техники. Своевременное выявление критической степени деградации масла позволяет предотвратить аварийный износ деталей ДВС, обеспечить надежную работу трибосопряжений и оптимизировать затраты на техническое обслуживание и ремонт [2]. Традиционные методы оценки качества моторных масел основываются на определении комплекса физико-химических показателей: вязкости при различных температурах, кислотного и щелочного чисел, содержания воды, механических примесей, нерастворимых осадков и других параметров. Однако реализация данных методов требует специализированного лабораторного оборудования, значительных временных затрат и квалифицированного персонала, что ограничивает их применение в условиях автотранспортных предприятий, ремонтных мастерских и станций технического обслуживания [3].

В последние годы интенсивно развиваются экспресс-методы оценки технического состояния моторных масел, позволяющие получить оперативную информацию о качестве смазочного материала без длительных лабораторных процедур [3]. Одним из наиболее доступных и информативных методов экспресс-оценки состояния работающего моторного масла является метод капельной пробы (метод *Blotter Spot*) [4], заключающийся в нанесении капли масла на фильтровальную бумагу и последующем анализе полученного масляного пятна (хроматограммы). Данный метод не требует дорогостоящего оборудования и реактивов, прост в исполнении и может применяться непосредственно в условиях эксплуатации техники. В сочетании с компьютерной обработкой цифровых изображений метод капельной пробы обеспечивает объективизацию результатов и возможность количественной оценки показателей состояния масла.

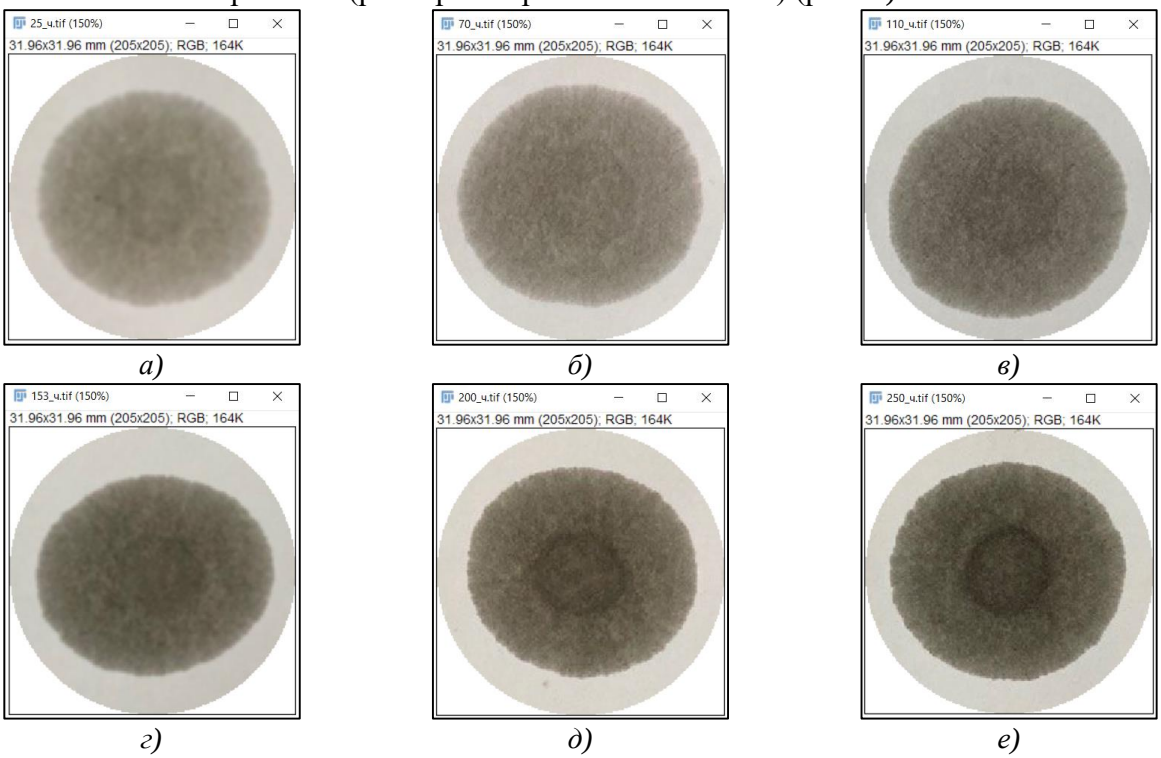
Программа *ImageJ* [5], разработанная Национальным институтом здравоохранения США (*NIH*), получила широкое распространение в научных исследованиях для обработки и анализа цифровых изображений благодаря своей свободной доступности и универсальности. Инструмент *Plot Profile* [6] позволяет получить график распределения интенсивности окрашивания вдоль произвольной линии на изображении, что особенно удобно для количественного анализа хроматограмм масляных пятен.

Целью настоящей работы является разработка и апробация методики экспресс-оценки степени деградации моторного масла на основе анализа цифровых изображений хроматограмм методом капельной пробы с использованием инструмента *Plot Profile* программы *ImageJ*, ориентированной на применение в условиях технической эксплуатации и ремонта машин и оборудования.

Материалы и методы.

В качестве объектов исследования выбраны цифровые изображения хроматограмм моторного масла марки *Shell Rimula* 10*W*-40 с наработкой 25, 70, 110, 153, 200 и 250 ч. Масло *Shell Rimula* 10*W*-40 является полусинтетическим смазочным материалом, предназначенным для применения в дизельных двигателях грузовых автомобилей, автобусов и др. Масло производится на основе высокоочищенных минеральных базовых масел с добавлением современного пакета присадок, включающего моющие, диспергирующие, антиокислительные, противоизносные и противокоррозионные компоненты. Класс вязкости 10*W*-40 обеспечивает надежную смазку двигателя в широком диапазоне температур окружающей среды.

Предварительно цифровые изображения хроматограмм открывали в *ImageJ и* выполняли масштабирование (размер изображения 32×32 мм) (рис. 1).



а) *б)* *в)*

г) *д)* *е)*

Рис. 1. Предварительная подготовка цифровых изображений хроматограмм моторных масел с различной наработкой в программе *ImageJ*:
а – 25 ч; *б* – 70 ч; *в* – 110 ч; *г* – 153 ч; *д* – 200 ч; *е* – 250 ч

Для анализа хроматограмм масляных пятен использовали инструмент *Plot Profile*, позволяющий получать график распределения интенсивности окрашивания вдоль произвольной прямой линии, проведенной на изображении. Для построения такого графика проводили линию на изображении хроматограммы, проходящую через центр масляного пятна, и выбором команд *Analyze* → *Plot Profile* получали окончательное изображение графика зависимости интенсивности окрашивания вдоль проведенной линии. На рис. 2 представлены полученные графики интенсивности окрашивания зон масляного пятна для хроматограмм моторного масла с различной наработкой.

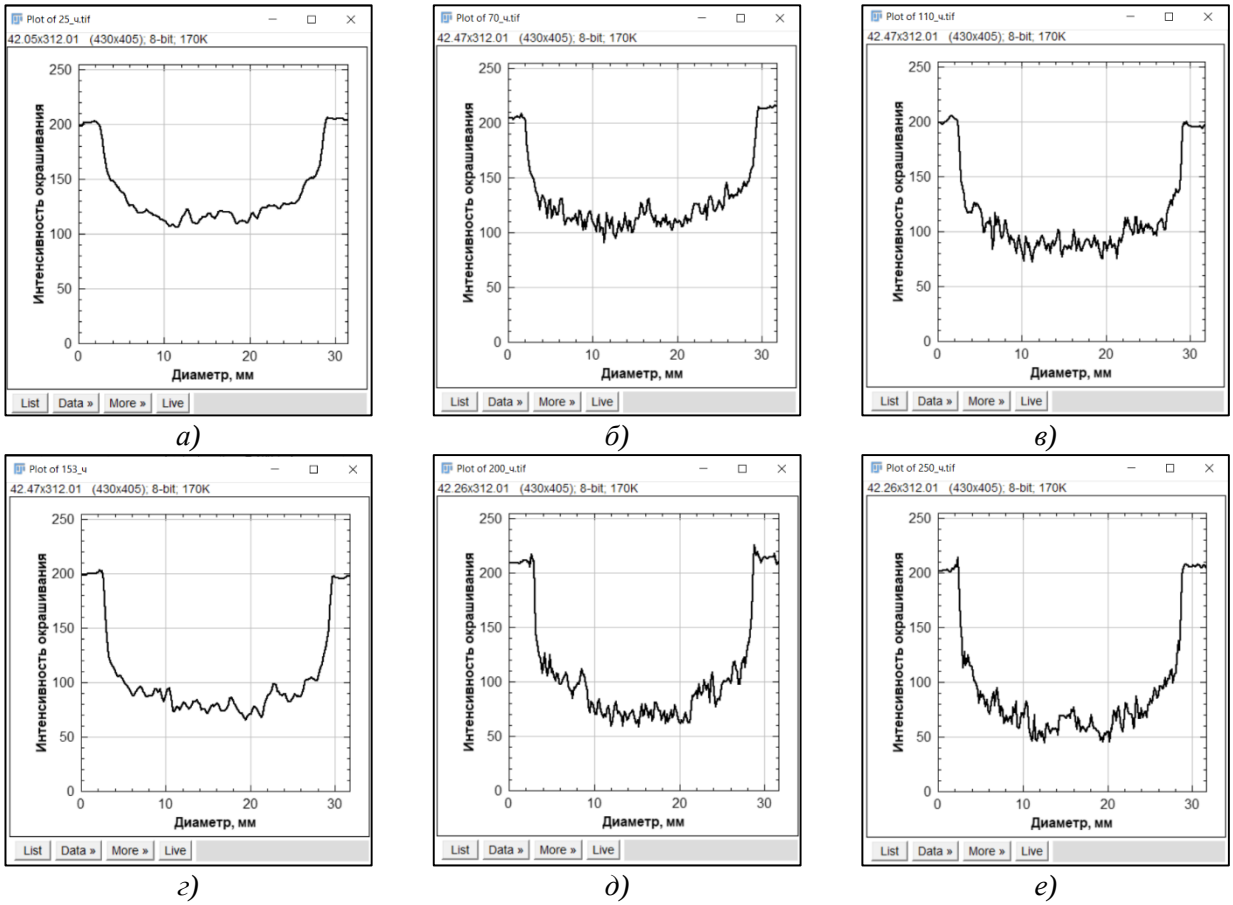
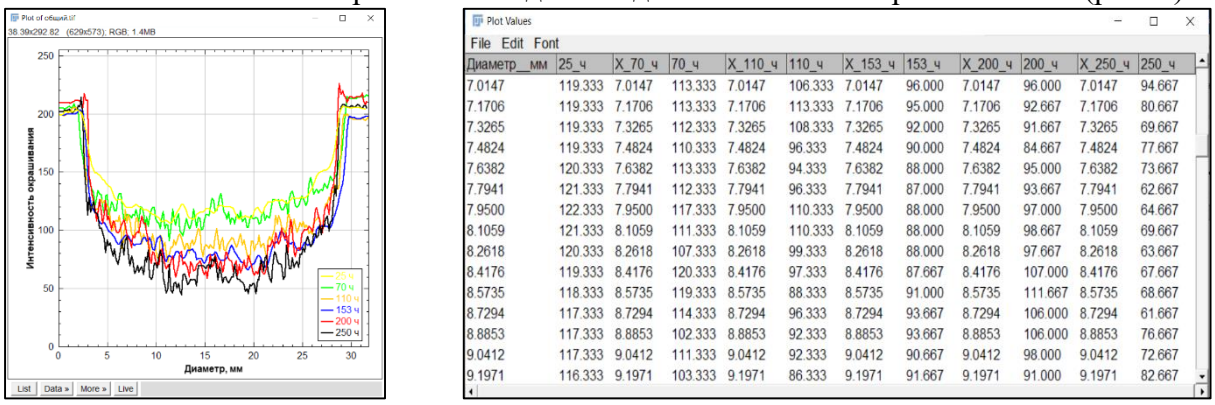


Рис. 2. Изменение интенсивности окрашивания по диаметру масляного пятна моторного масла с различной наработкой: *а* – 25 ч; *б* – 70 ч; *в* – 110 ч; *г* – 153 ч; *д* – 200 ч; *е* – 250 ч

Инструмент *Plot Profile* позволяет также сравнивать изменение интенсивностей окраски масляных пятен при различной наработке моторных масел путем представления их на одной координатной плоскости и одновременно получать табличные численные значения изменения интенсивности окрашивания вдоль выделенной линии через 1 пиксель (рис. 3).



Диаметр__мм	25_ч	X_70_ч	70_ч	X_110_ч	110_ч	X_153_ч	153_ч	X_200_ч	200_ч	X_250_ч	250_ч
7.0147	119.333	7.0147	113.333	7.0147	106.333	7.0147	96.000	7.0147	96.000	7.0147	94.667
7.1706	119.333	7.1706	113.333	7.1706	113.333	7.1706	95.000	7.1706	92.667	7.1706	80.667
7.3265	119.333	7.3265	112.333	7.3265	108.333	7.3265	92.000	7.3265	91.667	7.3265	69.667
7.4824	119.333	7.4824	110.333	7.4824	96.333	7.4824	90.000	7.4824	84.667	7.4824	77.667
7.6382	120.333	7.6382	113.333	7.6382	94.333	7.6382	88.000	7.6382	95.000	7.6382	73.667
7.7941	121.333	7.7941	112.333	7.7941	96.333	7.7941	87.000	7.7941	93.667	7.7941	62.667
7.9500	122.333	7.9500	117.333	7.9500	110.333	7.9500	88.000	7.9500	97.000	7.9500	64.667
8.1059	121.333	8.1059	111.333	8.1059	110.333	8.1059	88.000	8.1059	98.667	8.1059	69.667
8.2618	120.333	8.2618	107.333	8.2618	99.333	8.2618	88.000	8.2618	97.667	8.2618	63.667
8.4176	119.333	8.4176	120.333	8.4176	97.333	8.4176	87.667	8.4176	107.000	8.4176	67.667
8.5735	118.333	8.5735	119.333	8.5735	88.333	8.5735	91.000	8.5735	111.667	8.5735	68.667
8.7294	117.333	8.7294	114.333	8.7294	96.333	8.7294	93.667	8.7294	106.000	8.7294	61.667
8.8853	117.333	8.8853	102.333	8.8853	92.333	8.8853	93.667	8.8853	106.000	8.8853	76.667
9.0412	117.333	9.0412	111.333	9.0412	92.333	9.0412	90.667	9.0412	98.000	9.0412	72.667
9.1971	116.333	9.1971	103.333	9.1971	86.333	9.1971	91.667	9.1971	91.000	9.1971	82.667

а) *б)*

Рис. 3. Сводный график профилей интенсивности окрашивания масляных пятен (*а*) и табличные значения параметров профилей (*б*)

Результаты и обсуждение.

В табл. 1 систематизированы количественные параметры профилей интенсивности окрашивания для хроматограмм с различной наработкой: максимальная интенсивность I_{max}, минимальная интенсивность I_{min} и их разность (глубина центрального минимума) ΔI.

Таблица 1

Параметры профилей интенсивности окрашивания хроматограмм моторного масла Shell Rimula 10W-40

Наработка, ч	I_{max}	I_{min}	ΔI	Наработка, ч	I_{max}	I_{min}	ΔI
25	206,3	107,3	99,0	153	197,7	66,7	131,0
70	216,3	144,0	72,3	200	227,7	59,3	168,4
110	200,0	70,3	129,7	250	208,0	44,3	163,7

Анализ данных таблицы позволяет выявить следующие закономерности. Значение максимальной интенсивности I_{max} изменяется в диапазоне от 197,7 до 227,7 без выраженной корреляции с наработкой. Данный параметр характеризует общее количество масла в периферийной зоне пятна и в большей степени зависит от объема пробы и условий нанесения, чем от степени деградации. Значение минимальной интенсивности I_{min} закономерно снижается с увеличением наработки масла. Для свежего масла (25 ч) I_{min} составляет 107,3, что соответствует умеренной выраженности центрального минимума. После 250 ч эксплуатации значение I_{min} снижается до 44,3, что свидетельствует о существенном увеличении концентрации высоковязких компонентов в центральной зоне пятна. Глубина центрального минимума ΔI является наиболее информативным параметром для оценки степени деградации масла. Для образца с наработкой 25 ч ΔI составляет 99,0, увеличиваясь до 168,4 при 200 ч эксплуатации. Данная закономерность объясняется накоплением в масле продуктов окисления и полимеризации, обладающих высокой вязкостью и пониженной способностью к капиллярному распространению по волокнам фильтровальной бумаги.

Для практического применения разработанной методики необходимо ввести диагностический параметр, позволяющий однозначно и наглядно оценить степень деградации моторного масла. Такой параметр должен удовлетворять следующим требованиям: быть безразмерным для обеспечения сопоставимости результатов; иметь интуитивно понятную физическую интерпретацию; варьировать в ограниченном диапазоне значений; однозначно коррелировать со степенью деградации масла.

На основе анализа экспериментальных данных нами предложен безразмерный диагностический параметр – коэффициент деградации *KD*, определяемый по формуле:

$$KD = \frac{\Delta I}{I_{max} + I_{min}}. \quad (1)$$

Параметр *KD* представляет собой безразмерную меру контраста между центральной и периферийной зонами масляного пятна, нормализованную к суммарной интенсивности. Значение *KD* изменяется от 0 до 1, причём граничные значения имеют чёткую физическую интерпретацию:

– при $KD \rightarrow 0$ – центральная и периферийная зоны пятна имеют одинаковую интенсивность окрашивания (масляное пятно визуально однородно), что характерно для свежего масла с минимальным содержанием высоковязких и полярных компонентов;

– при $KD \rightarrow 1$ – центральная и периферийная зоны пятна имеют максимально различную интенсивность окрашивания, что характерно для сильно деградированного масла с преобладанием высоковязких продуктов окисления и полимеризации.

Выбор данной формулы нормализации обусловлен несколькими важными преимуществами. Во-первых, симметричная нормализация к сумме интенсивностей делает параметр *KD* независимым от условий получения цифровых изображений хроматограмм, т.к. при изменении общей яркости или контраста значения I_{max} и I_{min} изменяются пропорционально, а их отношение остаётся постоянным. Во-вторых, параметр *KD* инвариантен к абсолютному масштабу интенсивности, что позволяет сравнивать результаты, полученные на различных цифровых устройствах или при различных их настройках. В-третьих, нормализация к сумме обеспечивает сбалансированную оценку контраста без доминирования одного из компонентов (I_{max} или I_{min}).

Рассчитанные значения параметра *KD* для исследованных образцов масла с различной наработкой представлены в табл. 2.

Таблица 2

Значения диагностического параметра *KD*

Наработка, ч	25	70	110	153	200	250
KD	0,316	0,201	0,480	0,496	0,587	0,649

Анализ полученных результатов свидетельствует о выраженной корреляционной зависимости параметра *KD* от времени эксплуатации масла: *KD* увеличивается с 0,316 для свежего масла (25 ч) до 0,649 после 250 ч эксплуатации, что соответствует относительному изменению на 105 %. Данная закономерность свидетельствует о накоплении в масле высоковязких и полярных продуктов деградации.

Увеличение параметра *KD* с течением времени эксплуатации обусловлено следующими физико-химическими процессами. При работе двигателя масло подвергается интенсивному термоокислительному воздействию. При температурах 250–300 °С в зоне поршневых колец и 120–150 °С в поддоне картера происходит окисление углеводородов базового масла молекулярным кислородом с образованием полярных продуктов: спиртов, альдегидов, кетонов, карбоновых кислот, сложных эфиров. Эти соединения обладают существенно более высокой вязкостью и пониженной способностью к капиллярному распространению в фильтровальной бумаге. Одновременно происходит расходование антиокислительных присадок, входящих в состав масла *Shell Rimula* 10*W*-40. Фенольные и аминные антиоксиданты нейтрализуют свободные радикалы и гидропероксиды, предотвращая цепное окисление. По мере расходования присадок скорость окислительных процессов возрастает, что приводит к лавинообразному накоплению продуктов деградации. В свою очередь, высоковязкие и полярные продукты окисления концентрируются в центральной зоне масляного пятна, поскольку их молекулы обладают пониженной подвижностью в капиллярах фильтровальной бумаги. Это приводит к увеличению интенсивности окраски центральной зоны, что проявляется в уменьшении значения I_{min} и, следовательно, в увеличении параметра *KD*.

Выводы.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы. Разработанная методика анализа цифровых изображений хроматограмм с использованием программы *ImageJ* и инструмента *Plot Profile* позволяет проводить количественную оценку структуры масляного пятна по параметрам профиля интенсивности окрашивания.

Установлено, что профиль интенсивности окрашивания масляного пятна моторного масла *Shell Rimula* 10*W*-40 характеризуется наличием центральной зоны пониженной интенсивности, глубина которой закономерно увеличивается с ростом времени эксплуатации масла с 99,0 (25 ч) до 163,7–168,4 (200–250 ч).

В качестве диагностического параметра предложен безразмерный коэффициент *KD*, определяемый как отношение разности максимальной и минимальной интенсивностей к их сумме. Данный параметр представляет собой меру контраста между центральной и периферийной зонами масляного пятна, нормализованную к суммарной интенсивности. Значение *KD* увеличивается от 0,316 для свежего масла до 0,649 после 250 ч эксплуатации, что соответствует относительному изменению на 105 %. Увеличение параметра *KD* с течением времени эксплуатации обусловлено накоплением в масле высоковязких и полярных продуктов термоокислительной деградации (спиртов, альдегидов, кетонов, карбоновых кислот), которые концентрируются в центральной зоне масляного пятна вследствие пониженной способности к капиллярному распространению в фильтровальной бумаге.

Разработанная методика может быть рекомендована для экспресс-оценки состояния моторных масел в условиях автотранспортных предприятий, станций технического обслуживания

и при проведении полевых исследований, когда применение традиционных лабораторных методов затруднено или нецелесообразно.

Литература:

1. Венцель С.В. Применение смазочных материалов в двигателях внутреннего сгорания. М.: Химия. 1979. 240 с.

2. Fitch J., Troyer D. Oil analysis basics. 2 Ed. Tulsa: Noria Corporation. 2010. 198 p.

3. Капцевич В.М. Карпович С.К., Корнеева В.К., Закревский И.В. Экспресс-методы контроля свойств моторного масла автотракторных двигателей внутреннего сгорания в условиях организаций агропромышленного комплекса. Минск: БГАТУ. 2023. 120 с.

4. Standard Test Method for Measuring the Merit of Dispersancy of In-Service Engine Oils with Blotter Spot Method: ASTM D7899-19. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019. 7 p.

5. Ferreira T., Rasband W. ImageJ user guide /Fiji 1.46. 2012. 198 p.

6. Корнеева В.К., Капцевич В.М. Использование программного комплекса ImageJ для оценки интенсивности окрашивания и размеров зон масляного пятна на хроматограммах // Инженерное обеспечение сельского хозяйства: проблемы, достижения, перспективы: материалы II Международной научно-практической конференции, посвященной 75-летию инженерного факультета Алтайского ГАУ, Барнаул, 29-30 октября 2025 г. Барнаул: РИО Алтайского ГАУ. 2025. С. 116–119.

Analysis of digital images of Shell Rimula 10W-40 motor oil chromatograms in ImageJ using the Plot Profile tool

Korneeva V.K.[1,a], Kaptsevich V.M.[1,b], Tsymbalyuk A.I.[1,c], Pernach E.E.[1,d], Selitsky E.I.[1,e]

[1]Belarusian State Agrarian Technical University, 99 Nezavisimosti Ave., Minsk, 220012, Republic of Belarus

[a]lerakor1974@mail.ru, [b]slavakap47@mail.ru

Keywords: motor oil, Shell Rimula 10W-40, Blotter Spot, chromatogram, digital image processing, ImageJ, Plot Profile, degradation coefficient.

This article presents the results of a study examining the feasibility of using computer analysis of digital images of Shell Rimula 10W-40 motor oil chromatograms to assess its degradation during operation. The analysis was conducted using ImageJ and the Plot Profile tool to obtain oil slick color intensity profiles. The study was conducted on oil samples with varying operating hours: 25, 70, 110, 153, 200, and 250 hours. A dimensionless degradation coefficient, KD, defined as the ratio of the difference between the maximum and minimum color intensities of the profile to their sum, was proposed as a diagnostic parameter. The KD value increases from 0.316 for fresh oil to 0.649 after 250 hours of operation, indicating the accumulation of highly viscous and polar degradation products in the oil. The developed method allows for rapid assessment of the condition of motor oils without the use of complex laboratory equipment.

УДК 622.271:622.34

Селективная выемка полезных ископаемых. Поэтапность процессов отработки месторождений

Архипов А.Б.[1,a]

[1]Институт горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук, ул. Тургенева, 51, г. Хабаровск, Россия

[a]alekseyarhipov97@icloud.com

Ключевые слова: селективная выемка, открытые горные работы, карьерная техника, потери полезного ископаемого.

В статье рассмотрены особенности применения технологии селективной выемки при открытой разработке сложноструктурных металлорудных месторождений. Установлено, что применение технологии позволяет повысить качество добываемой рудной массы и снизить потери полезного ископаемого. Проанализированы основные этапы технологической цепочки открытых горных работ, включающей подготовку массива к выемке, выемочно-погрузочные работы, транспортирование и складирование горной массы. Отмечено, что сохранение селективности должно обеспечиваться на всех стадиях разработки месторождения. На примере Малмыжского месторождения приведены сведения о применяемом горнотранспортном оборудовании. Выполнен сравнительный анализ гидравлических экскаваторов одного технического класса, используемых при разработке месторождений. По результатам анализа обоснован выбор экскаватора Hitachi ZX300LC-7H как наиболее предпочтительной модели, обеспечивающей рациональное сочетание точности выемки, глубины копания и рабочего радиуса.

Введение.

Для значительной части металлорудных месторождений характерны изменчивое строение и невыдержанная мощность залежей, наличие внутриконтурных прослоев пустых пород и бедных руд. В таких условиях особое значение приобретает применение технологии селективной выемки, которая направлена на повышение качества добываемой рудной массы и более полного извлечения полезного компонента [1]. Для реализации такого подхода необходимо рассматривать весь технологический цикл разработки месторождения как единую систему взаимосвязанных процессов [1, 2].

При открытой разработке месторождений селективная выемка в отличии от валовой, ориентирована не столько на достижение высокой производительности, сколько на сохранение качества добываемого сырья [3]. Селективная выемка представляет собой технологию ведения горных работ с раздельным извлечением из недр каждой разновидности твёрдых полезных ископаемых [4]. Селективная выемка целесообразна при совместном залегании различных сортов полезного ископаемого, а также различных типов руд (сульфидные, окисленные, смешанные) [1,2].

Вопросами селективной выемки в разное время занимался ряд отечественных и зарубежных исследователей [1-5]. Академик К. Н. Трубецкой исходил из того, что селективная выемка важна при разработке месторождений сложной морфологической структуры, когда валовая выемка приводит к потере качества сырья и ухудшению технико-экономических показателей [1]. Позиция К. Н. Трубецкого сводится к тому, что селективность должна быть встроена в саму технологию разрушения массива, а не рассматриваться как отдельная операция.

Д. Р. Каплунов и М. В. Рыльникова рассматривали проблему шире, как комбинированную разработку рудных месторождений и полного, комплексного использования георесурсов [6]. Из материалов их работ следует, что они связывали эффективность освоения месторождений с рациональным сочетанием технологических процессов и оборудования разных классов, это означает что выборочная добыча нужна там, где без нее невозможно обеспечить полноту извлечения запасов, раздельную отработку участков разного качества и снижение потерь полезного компонента.

В публикациях [7, 8] говорится о выборе эффективных способов селективной выемки, систематизации объектов и схем такой выемки, технологиях разработки сложноструктурных месторождений, а также о том, что без необходимой глубины селекции при выемке

возрастают разубоживание и пересортица руд. Иными словами, селективная выемка — это не отдельный прием, а комплекс мероприятий для разработки месторождений со сложным оруденением, тонкими жилами, внутренними включениями пустых пород и контрастными по качеству рудами.

В исследованиях [5, 9] авторы развивают идею о том, что селективность должна обеспечиваться через комбинированную подготовку массива к выемке, разделению руд по ценности и прочностным свойствам и подбору такой технологической схемы, которая позволит раздельно извлекать разные сорта сырья. Обосновывается необходимость гибкого сочетания механических, взрывных и специальных методов дезинтеграции, а также селективной подготовки сложноструктурных руд к выемке. Таким образом, селективная выемка эффективна в том случае, когда она сопровождается специальной подготовкой массива, а не только точной работой экскаватора.

К числу факторов, определяющих необходимость применения технологии селективной выемки, также относятся высокая стоимость транспортирования и переработки добытой рудной массы в удаленных районах. Следовательно, селективная выемка оказывает влияние на результаты и эффективность дальнейший процессов транспортировки и переработки рудной массы [10].

При ведении горных работ используется достаточно широкий спектр различной техники, задействованной при выполнении различных процессов. Так для уборки вскрышных пород применяются экскаваторы, карьерные автосамосвалы, бульдозеры и фронтальные погрузчики [11]. Экскаваторы обеспечивают выемку и погрузку вскрышной массы, автосамосвалы ее транспортирование в отвалы, бульдозеры перемещение и планировку пород, а при необходимости, для предварительного разрушения прочных пород дополнительно используются буровые станки и рыхлительное оборудование [12].

В качестве примера техники, применяемой при уборке вскрышных пород, можно привести Малмыжское медное месторождение в Хабаровском крае, оператором которого является ООО «Амур Минералс», где при выполнении работ используются экскаваторы LiuGong, бульдозеры Shantui и карьерные самосвалы SANY, в том числе SANY SKT90S, а также БелАЗ 7513D [13].

В традиционной схеме открытых горных работ, применяются буровзрывные работы. Технологический процесс подготовки включает разметку взрывного блока, бурение скважин, размещение зарядов взрывчатого вещества, их забойку и последующее взрывание. При подготовке горных пород к выемке, на Малмыжском месторождении используются буровые установки Atlas Copco DM45 и DML 1200 [13]. В результате воздействия взрыва на массив, он разрушается и разрыхляется до состояния, обеспечивающего эффективную работу выемочно-погрузочного оборудования [14].

На данном этапе технологического процесса селективная выемка имеет принципиальное значение, поскольку именно в ходе экскавации, погрузки и транспортирования обеспечивается сохранение ранее достигнутого разделения по качеству горной массы. Нарушение селективности при выполнении этих операций приводит к смешиванию руд и вмещающих пород, что снижает эффективность последующей переработки.

Далее производятся выемочно-погрузочные работы, которые представляют собой комплекс операций по отделению рудной массы от массива, ее извлечению из забоя и погрузке в транспортные средства. После выемки горная масса при помощи автосамосвалов транспортируется к местам переработки или складирования [15]. При транспортировании должно сохраниться достигнутое ранее разделение горной массы по качеству.

Завершающим этапом технологической цепочки является складирование горной массы и отвалообразование. Кондиционная руда направляется на переработку на

обогатительные фабрики, металлургические заводы или гидрометаллургические предприятия, а бедная руда перерабатывается с применением кучного выщелачивания.

Для более подробного изучения техники используемой при добыче полезных ископаемых, был выполнен сравнительный анализ гидравлических экскаваторов (таблица). Указанные экскаваторы были выбраны для сравнения т.к. они относятся к одному техническому классу, имеют близкие технические характеристики и могут использоваться в сходных горно-технологических условиях при селективной выемке. Это делает их сопоставление корректным и обоснованным.

Таблица 1

Сравнительная оценка гусеничных гидравлических экскаваторов, применимых при селективной выемке

Показатель	**Komatsu PC300LC-8M0**	**Hitachi ZX300LC-7(H)**	**Cat 330**	**Develon DX300LC-7**
Эксплуатационная масса, кг	34100	31300	31700	33300
Мощность двигателя, кВт	187	186	223,8	199
Вместимость ковша, м³ (в зависимости от комплектации)	2,3	1,62	1,80	1,51
Максимальная глубина копания, мм	6540	7870	7250	7305
Максимальный радиус копания на уровне стояния, мм	10045	11100	10690	10530
Максимальная высота разгрузки, мм	6365	7540	6940	7280

*Составлено по официальным и дилерским спецификациям производителей [2].

Сравнение экскаваторов показало, что выбор рациональной модели определяется совокупностью технических показателей. Установлено, что экскаватор Hitachi ZX300LC-7H имеет преимущество по глубине копания, Cat 330 по энергетической оснащенности, Komatsu PC300LC-8M0 по сочетанию мощности и рабочего радиуса, а Develon DX300LC-7 по компромиссу между мощностью, техническими параметрами и вместимостью ковша.

Для отработки месторождения технологией селективной выемки наиболее предпочтительным экскаватором является Hitachi ZX300LC-7H. Данная машина характеризуется эксплуатационной массой 31300 т, мощностью двигателя 186 кВт, вместимостью ковша 1,62 м^3, максимальной глубиной копания 7870 мм и максимальным радиусом копания 11100 м. Такое сочетание параметров обеспечивает компромисс между производительностью и точностью выемки. По сравнению с аналогами, Hitachi ZX300LC-7H в меньшей степени ориентирован на валовую погрузку и в большей на точную отработку рудной массы, что позволяет рекомендовать его в качестве наиболее предпочтительной модели для селективной выемки.

Выводы.

В статье были рассмотрены взгляды отечественных исследователей на применение технологии селективной выемки. Описаны этапы разработки месторождений. В ходе анализа этапов была выявлена наиболее подходящая техника для отработки месторождений технологией селективной выемки. Предпочтительной техникой является экскаватор Hitachi ZX300LC-7H т.к он в меньшей степени ориентирован на валовую погрузку и в большей на точную отработку породы.

Литература:

1. Трубецкой, К. Н. Научное обоснование технологий комплексного ресурсосберегающего освоения месторождений стратегического минерального сырья / К. Н. Трубецкой, Д. Р. Каплунов, С. Д. Викторов, М. В. Рыльникова, Д. Н. Радченко // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2014. — № 12. — С. 5–12.

2. Открытые горные работы – XXI век. Справочник. Т. 1 / Ю. И. Анистратов, К. Ю. Анистратов [и др.] ; под ред. К. Ю. Анистратова. — Москва : Система максимум, 2019. — 640 с.

3. Чебан, А. Ю. Обоснование использования комбинированной подготовки к селективной выемке руд сложноструктурных месторождений / А. Ю. Чебан, Г. В. Секисов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. — 2020. — Т. 18, № 3. — С. 4–12.

4. Чебан, А. Ю. Способ подготовки прочных горных пород к выемке при ведении строительных и добычных работ / А. Ю. Чебан // Механизация строительства. — 2017. — Т. 78, № 9. — С. 20–23.

5. Секисов, Г. В. Малоотходная технология освоения сложноструктурных месторождений с применением комбинированных схем выемки и переработки руд / Г. В. Секисов, А. Ю. Чебан // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2021. — № 6. — С. 110–118.

6. Каплунов, Д. Р. Комбинированная разработка рудных месторождений : учебное пособие / Д. Р. Каплунов, М. В. Рыльникова. — Москва : Горная книга, 2012. — 344 с.

7. Чебан, А. Ю. Совершенствование геотехнологии выемки тонких рудных тел с применением стрелового комбайна / А. Ю. Чебан // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. — 2020. — № 1. — С. 340–348.

8. Чебан, А. Ю. Технология разработки крутопадающих рудных тел с применением дистанционно управляемого горного оборудования / А. Ю. Чебан // Маркшейдерский вестник. — 2019. — № 2(129). — С. 56–60.

9. Секисов, Г. В. Техническое вооружение горных предприятий Приморского края, занимающихся добычей строительных горных пород / Г. В. Секисов, А. Ю. Чебан // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2013. — № 11. — С. 283–287.

10. Чебан, А. Ю. Структурный анализ технических средств, задействованных при добыче строительных горных пород на юге Дальневосточного региона / А. Ю. Чебан, Г. В. Секисов, Н. П. Хрунина // Горная промышленность. — 2013. — № 4(110). — С. 26.

11. Гальперин, М. И. Строительные машины : учебник для вузов / М. И. Гальперин, Н. Г. Домбровский. — 3-е изд., перераб. и доп. — Москва : Высшая школа, 1980. — 344 с.

12. Чебан, А. Ю. Добычной комплекс для открытой разработки месторождений твердых полезных ископаемых / А. Ю. Чебан // Горное оборудование и электромеханика. — 2017. — № 3(130). — С. 8–11.

13. Амур Минералс : официальный сайт. — URL: https://amurminerals.ru/ (дата обращения: 25.03.2026).

14. Михайлов, Ю. В. Подготовка рудного тела к выемке полезного ископаемого комбинированным способом / Ю. В. Михайлов, А. Е. Васильев, С. В. Горный // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2003. — № 8. — С. 114–116.

15. Архипов, А. Б. Сравнительный анализ техники, применяемой при разработке месторождений открытым способом / А. Б. Архипов // Механики XXI веку. — 2025. — № 24. — С. 32–37.

Selective extraction of minerals. The stage-by-stage development of deposits

Arkhipov A.B.[1,a]

[1]Mining Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, MI FEB RAS, 51, Turgenev str., Khabarovsk, 680000, Russia

[a]alekseyarhipov97@icloud.com

Keywords: selective excavation, open-pit mining, quarry machinery, mineral losses.

The article discusses the features of the application of selective excavation technology in the open-pit mining of complex-structured metal ore deposits. It has been established that the use of technology makes it possible to improve the quality of the extracted ore mass and reduce the loss of minerals. The main stages of the technological chain of open-pit mining operations are analyzed, including the preparation of the massif for excavation, excavation and loading operations, transportation and storage of rock mass. It is noted that the preservation of selectivity should be ensured at all stages of field development. Using the example of the Malmyzhskoye field, information about the mining equipment used is provided. A comparative analysis of hydraulic excavators of the same technical class used in the development of deposits has been performed. Based on the results of the analysis, the choice of the Hitachi ZX300LC-7H excavator is justified as the most preferred model, providing a rational combination of excavation accuracy, digging depth and working radius.

УДК 621.225.2.001.24

Расчёт прогиба гидроцилиндра в результате его продольно нагружения

Жмуров В.В.[1,a], Герасимов С.В.[1,b], Кобзов А.Ю.[1,c], Жук Е.А.[1,d], Брагин С.Н.[1,e]

[1]Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия

[a]vladimir_zhmyrov@mail.ru

Ключевые слова: гидроцилиндр, деформация, продольное нагружение, прогиб, несущий элементы.

На дорожных и строительных машинах широкое распространение получили гидроцилиндры двустороннего действия с односторонним штоком. В процессе функционального продольно-поперечного нагружения гидроцилиндр деформируется в вертикальной продольной плоскости с образованием у него полного прогиба, являющегося плечом приложения эксплуатационного продольного сжимающего усилия. По мере изнашивания элементов направляющих герметизируемых сопряжений этот прогиб увеличивается, достигая предельных значений и приводя к отказу гидроцилиндра либо вследствие искривления штока, либо из-за увеличения реакций и, соответственно, сил трения и температур в его подвижных герметизируемых сопряжениях. С ростом мощностей машин названные негативные проявления обостряются, снижая её надёжностьы в целом. В этих условиях достоверное описание полного прогиба гидроцилиндра позволит уточнить действующие на него эксплуатационные нагрузки.

В процессе эксплуатации гидроцилиндр возвратно-поступательного перемещения с односторонним штоком в результате продольно-поперечно нагружения деформируется в вертикальной продольной плоскости с появлением у него полного прогиба, аналитически описываемого уравнением [1-3]:

$$y_T(x) = y_\alpha(x) + y_\beta(x) + y_\gamma(x) + y_\delta(x) + y_R(x) + y_Q(x) + y_P(x). \quad (1)$$

В нём: $y_\alpha(x)$ - прогиб гидроцилиндра вследствие наличия зазоров в уплотняемых сопряжениях; $y_\beta(x)$ - то же в результате возможного начального искривления его

длинномерных элементов; $y_\gamma(x)$ - то же вследствие эксплуатационного искривления его штока; $y_\delta(x)$ - то же в результате радиальной деформации под давлением его корпуса; $y_Q(x)$ - то же вследствие его поперечного нагружения, от действия веса гидроцилиндра; $y_R(x)$ - то же в результате наличия силового поворота в его опорных элементах; $y_P(x)$ - то же вследствие его продольного нагружения.

Известно [1, 2], что суммарный прогиб $y_T(x)$ гидроцилиндра в результате его продольно-поперечного нагружения (Рис. 1a) можно представить уравнением

$$EIy''_T(x) = -M_Q(x) - M_R(x) - Py_T(x) - Pe(x). \quad (2)$$

Тогда принимая во внимание, что $EIy''_Q(x) = -M_Q(x)$ и $EIy''_R(x) = -M_R(x)$, а $EIy''_\alpha(x) = 0$, $EIy''_\beta(x) = 0$, $EIy''_\gamma(x) = 0$ и $EIy''_\delta(x) = 0$, после введения коэффициента $k^2 = P(EI)^{-1}$, запишем дифференциальное уравнение (1) относительно прогиба $y_P(x)$ гидроцилиндра в результате его продольного нагружения в виде:

$$y''_P(x) + k^2 y_P(x) = -k^2\left[y_\alpha(x) + y_\beta(x) + y_\gamma(x) + y_Q(x) + y_R(x) + e(x)\right]. \quad (3)$$

Здесь $y_{T0}(x)$ – прогиб гидроцилиндра до приложения продольного сжимающего усилия (Рис. 1f), а EI - жёсткость конкретного его участка (Рис. 1b).

Согласно рисунку 1b гидроцилиндр в соответствии со значениями жёсткости его частей, по аналогии с известными работами [4, 5], может быть разбит на три участка. Границы первого участка с жёсткостью EJ_1 характеризуются абсциссами 0 и $(l_0 + z)$. Граница последнего участка с жёсткостью EJ_3 определяется как разность $\{[l_3 + (l_0 + z)] - (l_1 + l_2)\}$. Второй же участок с общей жёсткостью EJ_2 из-за наличия зазоров в подвижных герметизируемых сопряжениях гидроцилиндра [4] имеет точку пересечения кривых изогнутых осей элементов гидроцилиндра (Рис. 1f) и описывается различными уравнениями [5-10] в связи с чем, он должен быть разбит на два участка: справа - второй, слева, соответственно – третий. При этом граница второго с третьим, согласно рисунку 1f, должна определяться абсциссой $[(l_0 + z) + l_{T0}]$. Другими словами, исследование характеристик прогиба $y_P(x)$ должно предусматривать рассмотрение следующих участков гидроцилиндра:

- первый участок - $0 \le x \le (l_0 + z)$, жёсткость EJ_1;
- второй участок - $(l_0 + z) \le x \le [(l_0 + z) + l_{T0}]$, жёсткость EJ_2;
- третий участок - $[(l_0 + z) + l_{T0}] \le x \le (l_1 + l_2)$, жёсткость EJ_2;
- четвёртый участок - $(l_1 + l_2) \le x \le [(l_0 + z) + l_3]$, жёсткость EJ_3.

Вид зависимостей для нахождения прогибов $y_\alpha(x)$, $y_\beta(x)$, $y_\gamma(x)$, $y_\delta(x)$, $y_Q(x)$, $y_R(x)$ и эксцентриситета $e(x)$ [6, 8] позволяет представить правую часть уравнения (3) полиномом четвёртой степени:

$$y''_P(x) + k^2 y_P(x) = R_4x^4 + S_3x^3 + T_2x^2 + U_1x + V_0 \quad (4)$$

и, получить неоднородное линейное дифференциальное уравнение второго порядка с постоянными коэффициентами, структура общего решения которого имеет вид:

$$y_P(x) = \bar{y}_P(x) + y^*_P(x), \quad (5)$$

где: $\bar{y}_P(x)$ - общее решение однородного дифференциального уравнения второго порядка, например, для первого участка гидроцилиндра, то есть для его штока:

$$\bar{y}_{PI}(x) = C_1 \cos k_1x + C_2 \sin k_1x \quad (6)$$

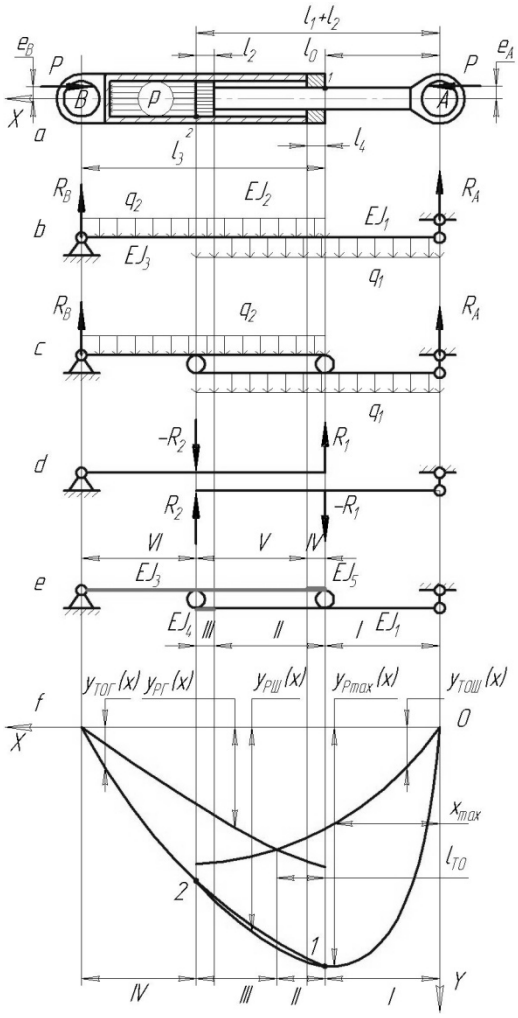


Рис. 1. Расчётная схема определения прогиба гидроцилиндра
в результате его продольно нагружения

а $y_P^*(x)$ - частное решение неоднородного дифференциального равнения, имеющее вид в соответствии с видом правой части выражения (4), например, для четвёртого участка гидроцилиндра, то есть для его корпуса:

$$y_{PIV}^*(x) = A_4^{IV}x^4 + A_3^{IV}x^3 + A_2^{IV}x^2 + A_1^{IV}x + A_0^{IV}\,, \qquad (7)$$

где: A_0^{IV} , A_1^{IV} , A_2^{IV} , A_3^{IV} и A_4^{IV} - неизвестные, определяемые по методу неопределенных коэффициентов из равенства:

$$\left(12A_4^{IV}x^2 + 6A_3^{IV}x^2 + 2A_2^{IV}\right) + k_3^2\left(A_4^{IV}x^4 + A_3^{IV}x^3 + A_2^{IV}x^2 + \right.$$
$$\left. + A_1^{IV}x + A_0^{IV}\right) = R_4^{IV}x^4 + S_3^{IV}x^3 + T_2^{IV}x^2 + U_1^{IV}x + U_0^{IV} \qquad (8)$$

после приравнивания коэффициентов при одинаковых степенях *x*.

Отсюда имеем выражения для нахождения значений прогиба $y_P(x)$ для каждого из рассматриваемых участков гидроцилиндра:

$$y_{PI}(x) = C_1\cos k_1x + C_2\sin k_1x + y_{PI}^*(x)\ ; \qquad (9)$$

$$y_{PII}(x) = C_3\cos k_2x + C_4\sin k_2x + y_{PII}^*(x); \qquad (10)$$

$$y_{PIII}(x) = C_5\cos k_2x + C_6\sin k_2x + y_{PIII}^*(x); \qquad (11)$$

$$y_{PIV}(x) = C_7 \cos k_3 x + C_8 \sin k_3 x + y^*_{PIV}(x). \quad (12)$$

и угла $y'_P(x)$ поворота его сечений в результате приложения продольного сжимающего усилия *P*:

$$y'_{PI}(x) = -k_1 C_1 \cos k_1 x + k_2 C_2 \sin k_1 x + y^*_{PI}(x)\ ; \quad (13)$$

$$y'_{PII}(x) = -k_2 C_3 \cos k_2 x + k_2 C_4 \sin k_2 x + y^*_{PII}(x)\ ; \quad (14)$$

$$y'_{PIII}(x) = -k_2 C_5 \cos k_2 x + k_2 C_6 \sin k_2 x + y^*_{PIII}(x)\ ; \quad (15)$$

$$y'_{PIV}(x) = -k_3 C_7 \cos k_3 x + k_3 C_8 \sin k_3 x + y^*_{PIV}(x)\ . \quad (16)$$

Постоянные C_1, C_2, …, C_8 интегрирования определяются из системы уравнений:

$$\begin{cases} y_{PI}(x) = 0, \text{ при } x = 0; \\ y_{PI}(x) = y_{PII}(x), \text{ при } x = (l_0 + z); \\ y'_{PI}(x) = y'_{PII}(x), \text{ при } x = (l_0 + z); \\ y_{PII}(x) = y_{PIII}(x), \text{ при } x = [(l_0 + z) + l_{T0}]; \\ y'_{PII}(x) = y'_{PIII}(x), \text{ при } x = [(l_0 + z) + l_{T0}]; \\ y_{PIII}(x) = y_{PIV}(x), \text{ при } x = (l_1 + l_2); \\ y'_{PIII}(x) = y'_{PIV}(x), \text{ при } x = (l_1 + l_2); \\ y_{PIV}(x) = 0, \text{ при } x = [(l_0 + z) + l_3], \end{cases} \quad (17)$$

составленной на основании отсутствия прогиба в точках крепления гидроцилиндра, а также равенства величин прогиба и значений углов поворота его сечений на границах соседних участков.

Однако, такой подход к изучению параметров прогиба $y_P(x)$, ранее описанному в работе [6], позволяя оценить несущую способность гидроцилиндра с точки зрения напряжённого состояния его несущих элементов, но не даёт возможности судить об их деформированном состоянии по отдельности, в частности, на втором и третьем участках гидроцилиндра. Так, на втором и третьем участках имеет место всего одна кривая, в то время как их должно быть две (рис. 1f): ось штока с поршнем и корпуса с крышкой.

Исключая этот недостаток при определении характеристик прогиба $y_P(x)$, длинномерные несущие элементы гильзы гидроцилиндра необходимо рассматривать по отдельности (Рис. 1c, 1d, 1e), в связи с чем гидроцилиндр по длине нужно разбить на шесть участков, каждый из которых будет характеризуется собственной жёсткостью и действующими нагрузками. В этом случае на втором и третьем участке будет расположено дополнительно две кривые с параметрами:

изогнутая ось штока с поршнем

$$y_{PШ}(x) = C_9 \cdot \cos k_1 \cdot x + C_{10} \cdot \sin k_1 \cdot x + y^*_{PШ}(x); \quad (18)$$

$$y'_{PШ}(x) = -k_1 C_9 \cdot \cos k_1 \cdot x + k_2 C_{10} \cdot \sin k_1 \cdot x + y'^*_{PШ}(x); \quad (19)$$

изогнутая ось гильзы, крышки и направляющей втулки

$$y_{PГ}(x) = C_{11} \cdot \cos k_3 \cdot x + C_{12} \cdot \sin k_3 \cdot x + y^*_{PГ}(x); \quad (20)$$

$$y'_{PГ}(x) = -k_3 C_{11} \cdot \cos k_3 \cdot x + k_3 C_{12} \cdot \sin k_3 \cdot x + y'^*_{PШ}(x). \quad (21)$$

Следовательно, количество необходимых для определения характеристик прогиба $y_P(x)$ констант C_i увеличивается с 8-ми в системе (17) до 12-ти в связи с увеличением числа рассматриваемых участков гидроцилиндра (Рис. 1e). Для их определения пригодны три системы из 12-ти уравнений:

$$\begin{cases} y_{PI}(x) = 0, \text{при } x = 0; \\ y_{PI}(x) = y_{PII}(x), \text{при } x = (l_0 + z); \\ y'_{PI}(x) = y'_{PII}(x), \text{при } x = (l_0 + z); \\ y_{PII}(x) = y_{PIII}(x), \text{при } x = [(l_0 + z) + l_{T0}]; \\ y_{PIII}(x) = y_{PIV}(x), \text{при } x = (l_1 + l_2); \\ y_{PIV}(x) = 0, \text{при } x = [(l_0 + z) + l_3]; \\ y_{PIII}(x) = y_{PIV}(x), \text{при } x = (l_1 + l_2); \\ y'_{PI}(x) = y'_{PIII}(x), \text{при } x = (l_0 + z); \\ y_{PIV}(x) = y_{PI\Gamma}(x), \text{при } x = (l_1 + l_2); \\ y'_{PIV}(x) = y'_{PI\Gamma}(x), \text{при } x = (l_1 + l_2); \\ y_{PIII}(x) = y_{PI\Gamma}(x), \text{при } x = (l_0 + z); \\ y_{PIII}(x) = y_{PI\Gamma}(x), \text{при } x = (l_1 + l_2). \end{cases} \quad (22)$$

$$\begin{cases} y_{PI}(x) = 0, \text{при } x = 0; \\ y_{PI}(x) = y_{PII}(x), \text{при } x = (l_0 + z); \\ y_{PII}(x) = y_{PIII}(x), \text{при } x = [(l_0 + z) + l_{T0}]; \\ y'_{PII}(x) = y'_{PIII}(x), \text{при } x = [(l_0 + z) + l_{T0}]; \\ y_{PIII}(x) = y_{PIV}(x), \text{при } x = (l_1 + l_2); \\ y_{PIV}(x) = 0, \text{при } x = [(l_0 + z) + l_3]; \\ y_{PI}(x) = y_{PIII}(x), \text{при } x = (l_1 + l_2); \\ y'_{PIV}(x) = y_{PIII}(x), \text{при } x = (l_0 + z); \\ y_{PIV}(x) = y_{PI\Gamma}(x), \text{при } x = (l_1 + l_2); \\ y'_{PIV}(x) = y'_{PI\Gamma}(x), \text{при } x = (l_1 + l_2); \\ y_{PIII}(x) = y_{PI\Gamma}(x), \text{при } x = (l_0 + z); \\ y_{PIII}(x) = y_{PI\Gamma}(x), \text{при } x = (l_1 + l_2). \end{cases} \quad (23)$$

$$\begin{cases} y_{PI}(x) = 0, \text{при } x = 0; \\ y_{PI}(x) = y_{PII}(x), \text{при } x = (l_0 + z); \\ y_{PII}(x) = y_{PIII}(x), \text{при } x = (l_0 + z + l_{\Sigma 0}); \\ y_{PIII}(x) = y_{PIV}(x), \text{при } x = (l_1 + l_2); \\ y'_{PIII}(x) = y'_{PIV}(x), \text{при } x = (l_1 + l_2); \\ y_{PIV}(x) = 0, \text{при } x = (l_0 + z + l_{\Sigma 0}); \\ y_{PI}(x) = y_{PIII}(x), \text{при } x = (l_0 + z); \\ y'_{PI}(x) = y_{PIII}(x), \text{при } x = (l_0 + z); \\ y_{PIV}(x) = y_{PI\Gamma}(x), \text{при } x = (l_1 + l_2); \\ y'_{PIV}(x) = y'_{PI\Gamma}(x), \text{при } x = (l_1 + l_2); \\ y_{PIII}(x) = y_{PI\Gamma}(x), \text{при } x = (l_0 + z); \\ y_{PIII}(x) = y_{PI\Gamma}(x), \text{при } x = (l_1 + l_2). \end{cases} \quad (24)$$

Составленные на основании совместного рассмотрения деформации гидроцилиндра и его отдельных элементов (рис. 1а и 1е), а также система из 8-ми уравнений, составленная на основании рассмотрения деформации только длинномерных элементов гидроцилиндра (рис. 1е):

$$\begin{cases} y_{PI}(x) = 0, \text{ при } x = 0; \\ y_{PI}(x) = y_{PШ}(x), \text{ при } x = (l_0 + z); \\ y'_{PI}(x) = y'_{PШ}(x), \text{ при } x = (l_0 + z); \\ y_{PIV}(x) = y_{PГ}(x), \text{ при } x = (l_1 + l_2); \\ y'_{PIV}(x) = y'_{PГ}(x), \text{ при } x = (l_1 + l_2); \\ y_{PШ}(x) = y_{PГ}(x), \text{ при } x = (l_0 + z); \\ y_{PШ}(x) = y_{PГ}(x), \text{ при } x = (l_1 + l_2); \\ y_{PIV}(x) = 0, \text{ при } x = [(l_0 + z) + l_3]. \end{cases} \quad (25)$$

Целью сопоставления этих систем будет является выбор одной из них, наиболее полно и точно описывающей процесс деформации несущих длинномерных элементов гидроцилиндра, и получение возможности описания рассматриваемого процесса системой уравнений (25), не учитывающей непосредственно ни влияния длины гидроцилиндра, а, следовательно, и его гибкости, ни характера контакта элементов друг с другом на изменение параметров прогиба $y_P(x)$.

Литература:

1. Справочник по сопротивлению материалов / Г.С. Писаренко, А.П. Яковлев, В.В. Матвеев. – Киев: «Наукова думка», 1988. – 736 с.

2. Беляев Н.М. Сопротивление материалов. – М.: главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1976. – 688 с.

3. Кобзов Д.Ю., Усова С.В. Экспресс-диагностика несущей способности гидроцилиндров машин. Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2009. – №3(23). – С. 174-179.

4. Марутов В.А., Павловский С.А. Гидроцилиндры. – М.: Машиностроение, 1966. – 171 с.

5. Фролов И.О. Влияние эксплуатационных повреждений на работоспособность гидроцилиндров и способы повышения их надёжности, применительно к одноковшовым строительным экскаваторам: Дисс. … к.т.н./ЛИСИ, Л., 1984. – 221 с.

6. Кобзов Д.Ю. Диагностирование гидроцилиндров рабочего оборудования одноковшовых строительных экскаваторов: Дисс. ... к.т.н./ЛИСИ, Л., 1987.-345 с.

7. Кобзов Д.Ю., Жмуров В.В., Кобзова И.О. Варианты расчёта продольного прогиба гидроцилиндра // Системы. Методы. Технологии. - 2011. -№2 (10). С. 45-49.

8. Кобзов Д.Ю., Тарасов В.А., Трофимов А.А. Гидроцилиндры дорожных и строительных машин. Ч. 2. Условия эксплуатации, рабочий процесс, режим работы и параметры нагружения // Братск. гос. техн. ун-т. Братск, 1999. 108 с., ил., библиогр. 179 назв. Рус. - Деп. в ВИНИТИ 01.12.1999, № 3552-В1999.

9. Кобзов Д.Ю., Лапшин В.Л., Тарасов В.А., Жмуров В.В. Гидроцилиндры дорожных и строительных машин. Ч. 3. Несущая способность // Братск. гос. ун-т. Братск, 2011. 88 с., ил., библиогр. 93 назв. Рус. - Деп. в ВИНИТИ РАН 27.01.2011, № 27-В2011.

10. Кобзов Д. Ю., Ереско С. П., Жмуров В. В. Гидроцилиндры дорожных и строительных машин. Ч. 6. Работоспособность. Надёжность. Варианты модернизации. - Братск: БрГУ, 2012. - 43 с.

Calculation of the hydrocylinder's deformation as a result of its longitudinal loading

Zhmyrov V.V.[1,a], Gerasimov S.V.[1,b], Kobzov A.Yu.[1,c], Zhuk E.A.[1,d], Bragin S.N.[1,e]
[1]Bratsk State University, 40 Makarenko st., Bratsk, Russian Federation
[a]vladimir_zhmyrov@mail.ru

Keywords: hydraulic cylinder, deformation, longitudinal loading, deflection, load-bearing elements.

Double-acting hydraulic cylinders with a single-ended rod are widely used on road and construction machines. During functional longitudinal and transverse loading, the hydraulic cylinder deforms in the vertical longitudinal plane, resulting in a full deflection that acts as a lever for applying the operational longitudinal compressive force. As the elements of the sealed joints wear out, this deflection increases, reaching its limit values and causing the hydraulic cylinder to fail either due to the rod bending or due to the increase in reactions and, consequently, the friction forces and temperatures in its movable sealed joints.

УДК 621.87

Обзор методов создания промежуточного слоя на границе контакта грунтов и рабочих органов землеройных машин

Виноградов Е.Д.[1,a], Зеньков С.А.[1,b], Дрюпин П.Ю.[1,c], Герляин И.А.[1,d], Быков П.Д.[1,e], Ревин Д.В.[1,f]
[1]Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия
[a]Egorricch@yandex.ru, [b]mf@brstu.ru

Ключевые слова: адгезия, грунт, липкость, гидрофобность, промежуточный слой.

В статье проведён обзор известных методов снижения адгезии и трения при разработке грунтов посредством создания промежуточного слоя на границе контакта грунтов и рабочих органов землеройных машин. Выявлены и рассмотрены такие методы как: использование полимерных покрытий, газовых и жидкостных смазок, поверхностно-активных веществ, противообледенительных жидкостей, твердых смазочных материалов, высокоэластичных покрытий.

Адгезия - одно из основных свойств грунта, проявляющееся в способности грунта прилипать (примерзать) к посторонним предметам. Адгезия приводит к дополнительному расходу энергии при механической обработке грунтов [1].

Многие исследователи, ссылаясь на электрическую теорию Дерягина – Кротовой, отмечают, что липкость – результат действия электромолекулярных сил в зоне контакта грунта с другими материалами [2]. Согласно Заднепровскому Р.П. [3] адгезия является отражением комплекса физических свойств системы грунт-вода-рабочая поверхность.

Липкость - способность грунта при определенной его влажности прилипать к поверхности различных предметов. Большая прилипаемость грунта усложняет разрабатываемость грунта, его выгрузку из ковша машины или кузова, условия работы

транспорта и др. Липкость определяют усилием, необходимым для отрыва прилипшего предмета от грунта (для глин липкость достигает 0,05 МПа) [4].

Рис. 1. Экскаваторный ковш с налипшим грунтом

Классификация методов снижения адгезии и трения при разработке грунтов предложеной Р. П. Заднепровским [5] разделяет методы на четыре группы. К первой группе относятся методы создания на границе контакта промежуточного слоя [6-9], который может служить для экранирования адгезионного взаимодействия фаз: грунта и рабочей поверхности. Её мы и рассмотрим.

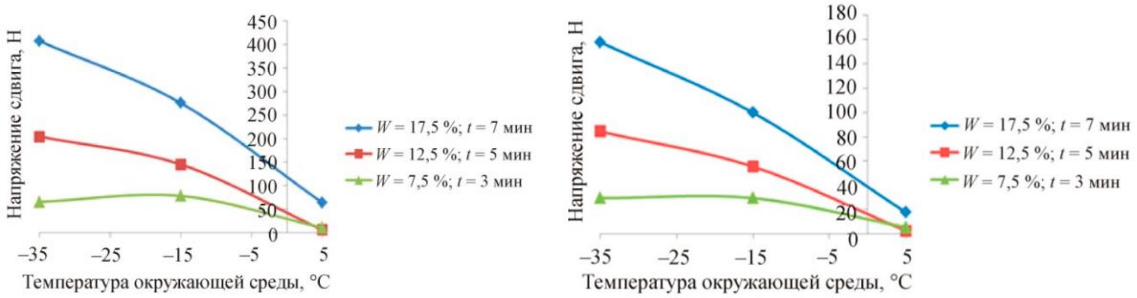
В общем случае силы прилипания и трения можно уменьшить образованием промежуточного слоя на границе раздела фаз системы рабочая поверхность - дисперсная масса. Этот слой должен играть роль экрана для сил межмолекулярного взаимодействия фаз, иметь малое адгезионное и когезионное взаимодействие и обладать "смазочным" действием, т.е. обеспечивать легкость относительного перемещения фазовых поверхностей. Слой может быть жидким, твердым и газообразным. Толщина слоя должна быть достаточной для проявления его объемных свойств.

В качестве антифрикции антикоррозионных покрытий могут быть использованы эпоксидные смолы с введением небольшого количества модификаторов, склонных к поверхностному диффузному насыщению (для этой цели перспективно использование кремнийорганических соединений); электролитические покрытия хромом, никелем, кадмием; полимерные покрытия и композиции: фторопласт, полиэтилен НД, полиуретан, резина, хлоркаучук, полипропилен [5]. Все полимеры обладают множеством полезных свойств при невысокой стоимости, в той или иной степени характеризуются хорошими эластичностью и прочностью. Например, политетрафторэтилен является термопластичным полимером. Фторопласт имеет отличную химическую стойкость, диэлектрические характеристики и одни из самых широких возможностей эксплуатации по температуре - от -270ºС до 260ºС. Материал имеет прекрасные антифрикционные и гидрофобные свойства, что обеспечивает его применение для выпуска различных покрытий и изделий для снижения их коэффициентов трения до минимальных значений [6].

Рис. 2. Экскаваторный ковш футерованый полимерными пластинами из поликерамопласта

Газовые и жидкостные смазки, в том числе поверхностно-активные вещества (кислоты, соли и вещества, химически реагирующие с грунтовой влагой) [5]. Для использования этого метода нужны специальные гидравлические системы для подачи газа или жидкости на рабочий орган. Они также могут делиться на системы открытого (с большим расходом жидкости) и закрытого (циклического) типа (расход меньше). В первом виде систем целесообразнее использовать более дешёвые жидкости, например техническую воду или отработанное машинное масло, а во втором возможно использовать и более дорогие и качественные аналоги с лучшими антиадгезионными свойствами. Поверхностно-активные вещества зачастую неблагоприятно влияют на почву, окружающую среду и здоровье технического персонала, следовательно их лучше применять в закрытой системе.

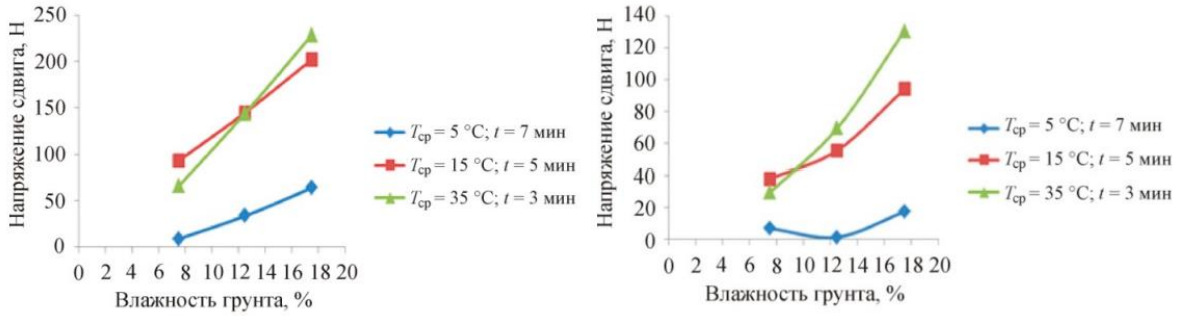
В соответствии с экспериментальными исследованиями [7] на сопротивление сдвигу грунта по металлической поверхности с использованием противообледенительной жидкой (ПОЖ) на стенде сдвигового типа построены квазиоднофакторные зависимости. Анализ данных на рис. 3 зависимостей показывает, что с понижением температуры окружающей среды напряжение сдвига увеличивается как с воздействием ПОЖ, так и без ее воздействия в 5–8 раз. С применением противообледенительной жидкости напряжение сдвига уменьшается в 2–2,5 раза.



а) *б)*

Рис. 3. Зависимости напряжения сдвига от температуры окружающей среды в натуральных значениях:
а – без воздействия; *б* – с применением ПОЖ

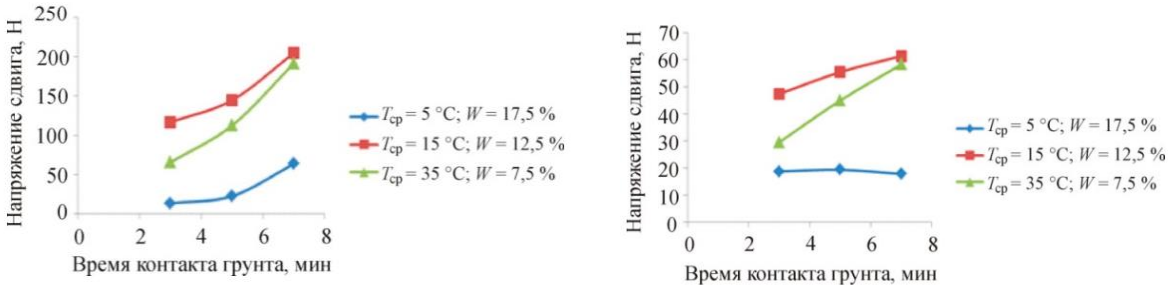
Анализ данных на рис. 4 зависимостей показывает, что с увеличением влажности грунта напряжение сдвига повышается. С применением противообледенительной жидкости напряжение сдвига уменьшается в 1,5–2 раза.



а) *б)*

Рис. 4. Зависимости напряжения сдвига от влажности грунта в натуральных значениях:
а – без воздействия; *б* – с применением ПОЖ

Анализ зависимостей, приведенных на рис. 5, показывает, что с увеличением времени контакта грунта с металлической поверхностью напряжение сдвига повышается (за исключением эксперимента с влажным грунтом при W = 17,5 %, Тср = 5 °С) в среднем в 1,2–2,3 раза. С применением противообледенительной жидкости напряжение сдвига уменьшается по сравнению с напряжением без жидкости в 1,4–3 раза.



а) *б)*

Рис. 5. Зависимости напряжения сдвига от времени контакта грунта в натуральных значениях:
а – без воздействия; *б* – с применением ПОЖ

Таким образом, применение ПОЖ на границе контакта позволяет снизить напряжение сдвига в 2–3 раза, соответственно предотвращая образование адгезионного слоя мерзлой влаги на границе контакта, которая выделяется при давлении груза на грунт. ПОЖ также растапливает адгезионный слой, преобразуя воду из замерзшего состояния в свободную, и при взаимодействии со свободной водой образует защитный слой на границе контакта, препятствующий примерзанию влажных масс при отрицательных температурах [7].

Существенный эффект дают так называемые твердые смазочные материалы: графит, сульфид молибдена, тальк. Графит и тальк пригодны для длительного контакта. Технология закрепления талька на поверхности не разработана. Угольные гидрофобные отложения можно образовать при обработке рабочей поверхности коптящим пламенем [5].

Высокая эффективность высокоэластичных покрытий (хлоркаучук, микропористая резина) при намерзании объясняется в основном их высокой деформацией под воздействием давления разрабатываемой массы и значительного объемного расширения при льдообразовании. Создающиеся при отрыве неоднородные деформации и напряжения снижают адгезию [5].

Литература:

1. Mingyang Y., Ze Z., Hang L., Zhiyuan W., Xiangxi M. Study on the adhesion law of rubber-soil interface under the influence of multiple factors // Journal of Terramechanics. - 2026. - №121. - С. 1-10.

2. Зимон А.Д. Что такое адгезия. – М: Книжный дом «Либроком», 2013.- 176 с.

3. Заднепровский Р.П. Адгезионные свойства глинистых пород и снижение трения и прилипания при их разработке.: Автореф. дис. … д-ра техн. наук.-Ленинград, 1085. – 416 с

4. Ахмед М.Д., Дагмара А.А. Учебное пособие по дисциплине «Технологические процессы в строительстве» Для обучающихся по направлению 08.03.01 Строительство профиль подготовки «Промышленное и гражданское строительство». - Махачкала: 2019. - 232 с.

5. Заднепровский Р.П., Дяшкин А.В. Материалы: физические и технологические свойства и их регулирование Учебное пособие в двух частях Часть 1. - Волгоград: ВолгГАСУ, 2012. - 117 с.

6. Механические, физические и химические свойства полимеров // ПластЭксперт URL: https://e-plastic.ru/spravochnik/materiali/svoistva-polimerov/ (дата обращения: 15.02.2026).

7. Зеньков С.А., Балахонов Н.А., Чубыкина Д.С. К вопросу о применении противообледенительной жидкости для снижения адгезии грунта к машинам // транспорт. Транспортные сооружения. Экология. - 2015. - №3. - С. 60-71.

8. Zenkov S.A., Kirichenko O.P., Mineev D.A. Reducing adhesion of soil to the earth-moving machines using piezoceramic transducers // Journal of Advanced Research in Technical Science. 2017. № 4. С. 56-58.

9. Зеньков С.А., Елохин А.В., Курмашев Е.В. К вопросу о применении ремонтно-восстановительных составов для снижения адгезии грунтов к рабочим органам СДМ // Механики XXI веку. 2009. № 8. С. 159-161.

Overview of methods for creating an intermediate layer at the contact boundary between soils and excavation machine working elements

Vinogradov E.D.[1,a], Zenkov S.A.[1,b], Dryupin P.Yu.[1,c], Gerlain I.A.[1,d], Bikov P.D.[1,e], Revin D.V.[1,f]

[1]Bratsk State University, 40 Makarenko st., Bratsk, 665709, Russian Federation

[a]Egorricch@yandex.ru, [b]mf@brstu.ru

Keywords: adhesion, soil, adhesiveness, hydrophobicity, intermediate layer.

The article provides an overview of known methods for reducing adhesion and friction during soil development by creating an intermediate layer at the interface between the soil and the working elements of earthmoving machines. The methods discussed include the use of polymer coatings, gas and liquid lubricants, surfactants, deicing fluids, solid lubricants, and highly elastic coatings.

УДК 624.131.439.5

Лабораторное оборудование для измерения силы адгезии грунтов для определения эффективности методов борьбы с ней

Зеньков С.А.[1,a], Дрюпин П.Ю.[1,b], Бондалет И.С.[1,c], Минеев Д.А.[1,d], Медведев С.Н.[1,e]

[1]Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия

[a]mf@brstu.ru

Ключевые слова: адгезия грунтов, лабораторный стенд, усилие сдвига.

В статье рассмотрена проблема снижения производительности землеройных машин при разработке влажных связных грунтов, обусловленная проявлением адгезионных сил. Показано, что эффективность методов борьбы с адгезией может быть достоверно

оценена только в ходе экспериментальных исследований, требующих применения специализированного лабораторного оборудования. Представлен анализ недостатков существующей лабораторной установки (сдвигового стенда), функционирующей в открытых условиях, где присутствуют неконтролируемые внешние факторы. В качестве решения предложен модернизированный лабораторный стенд, в котором сдвиговой механизм смонтирован внутри изолированной камеры, позволяющей стабилизировать условия проведения эксперимента. Обосновано, что применение изолированной камеры и системы точного измерения позволяет минимизировать влияние неучтённых факторов окружающей среды, повысить воспроизводимость результатов и объективно оценивать эффективность различных способов борьбы с адгезией грунтов.

Введение.

При выполнении работ, связанных с разработкой грунтов (копание, транспортировка и т.д.) на грунтах, которые обладают высокими адгезионными свойствами (чаще всего это влажные суглинистые и глинистые грунты), возникает проблема – снижение производительности землеройных машин. Это обусловлено тем, что возникшие адгезионные силы не дают разъединиться двум фазам (поверхность рабочего органа и грунтовая масса), в следствии чего полезный объем ковша уменьшается, возрастает энергоемкость разработки единицы объема грунта, увеличивается простой машины.

Данная проблема при разработки влажных связных грунтов не нова, и существует множество способов ее устранения. Так профессор Р.П. Заднепровский составил наиболее полную классификацию всех методов борьбы с адгезией грунтов. По его классификации, все методы делятся на 4 большие группы [1, 2]:

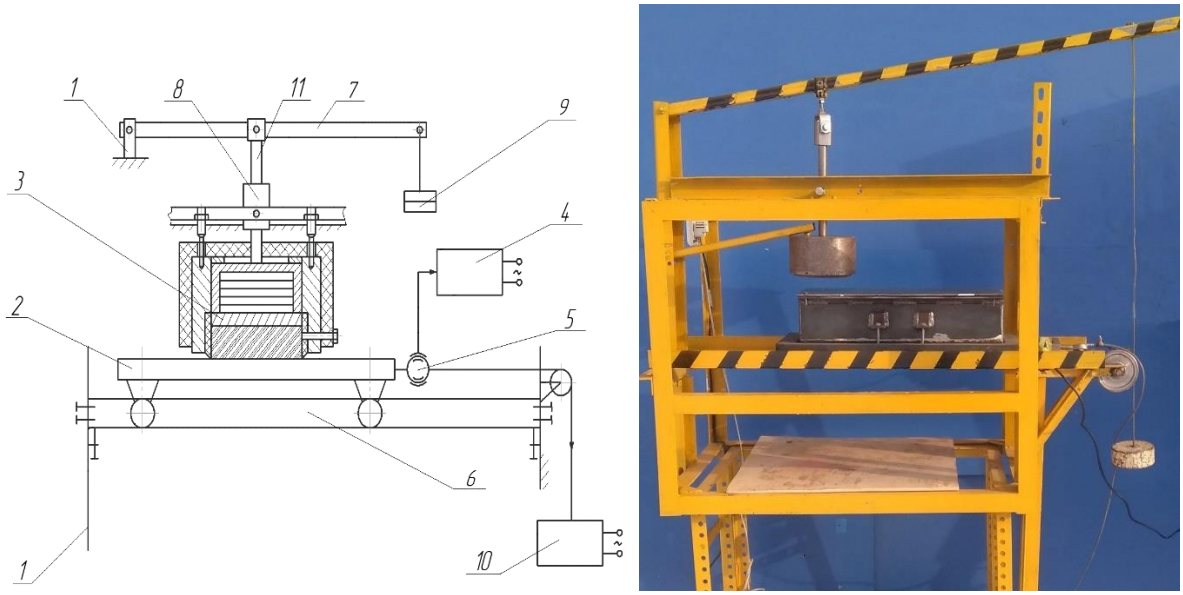
- Создание промежуточного слоя в зоне контакта;
- Воздействие на зону контакта для изменения физических свойств грунтов;
- Механический способ очистки рабочих органов или изменение их геометрических форм;
- Комбинация нескольких способов.

Основная часть. Определение эффективности того или иного метода борьбы с адгезией грунтов, а также определение факторов, влияющих на величину адгезии, возможно только экспериментальными исследованиями (научным экспериментом).

В научном эксперименте важную роль, помимо правильно составленного плана экспериментального исследования, играет и лабораторное оборудование. Оно должно минимизировать влияния человеческих факторов и влияния окружающей среды, а акцентироваться только на факторах, которые учтены планом эксперимента.

Лабораторная установка (рис. 1) позволяет проводить экспериментальные исследования по определению величины адгезии грунтов к имитаторам поверхности рабочего органа землеройных машин [3, 4]. Однако, недостатком данной установки является ее нахождение на открытом воздухе, что приводит к тому, что помимо рассматриваемых факторов на зону контакта оказывают влияние и факторы, которые невозможно контролировать или изменить (атмосферное давление, влажность окружающего воздуха, осадки, порывы ветра и др.).

На данной установки можно получить результаты, которые будут соответствовать результатам, полученным при использовании метода для борьбы с адгезией грунтов на производстве в реальных условиях. Однако, оценить значимость каждого фактора затруднительно, полученные данные имеют погрешность, в виду неучтенных и неконтролируемых воздействий.



а) *б)*

Рис. 1. Лабораторная установка – сдвиговой стенд:
а - принципиальная схема; *б* - сдвиговой стенд; 1 – рама; 2 – подвижная каретка; 3 – стакан; 4 – тензометрическая аппаратура; 5 – тензометрический датчик; 6 – направляющая; 7 – нагрузочный рычаг; 8 – втулка; 9 – груз; 10 – приводной механизм; 11 – тяга

Предлагаемая лабораторная установка (рис. 2) позволяет ограничить зону контакта имитатора рабочего органа и грунта от воздействия окружающей среды. Лабораторная установка для определения адгезии грунтов представляет собой сложную измерительную систему, в которой сочетаются силовые датчики, устройства для плавного нагружения, элементы крепления испытуемых образцов.

Рис. 2. Лабораторная установка

Лабораторный стенд представляет собой сдвиговой стенд (рис. 3), смонтированный в изолированную камеру/морозильник, что позволяет зафиксировать внешние (варьируемые) факторы на одном уровне и ограничить факторы, которые не учтены (влажность окружающей среды, порывы ветра и т.д.). Сдвиговой стенд представляет собой жестко смонтированную раму 1 выполненную из двух ярусов. На нижнем ярусе перемещается подвижная каретка 2, на которой закреплен имитатор рабочего органа, на который кладется обойма с образцом грунта 3. На верхнем ярусе рамы устанавливается поперечная

перекладина 4, на которой закреплен поршень 5, передающий усилие (давление) прижатия на образец грунта. Необходимое усилие (давление) прижатия достигается с помощью рычага 6 и подвешенного груза 7.

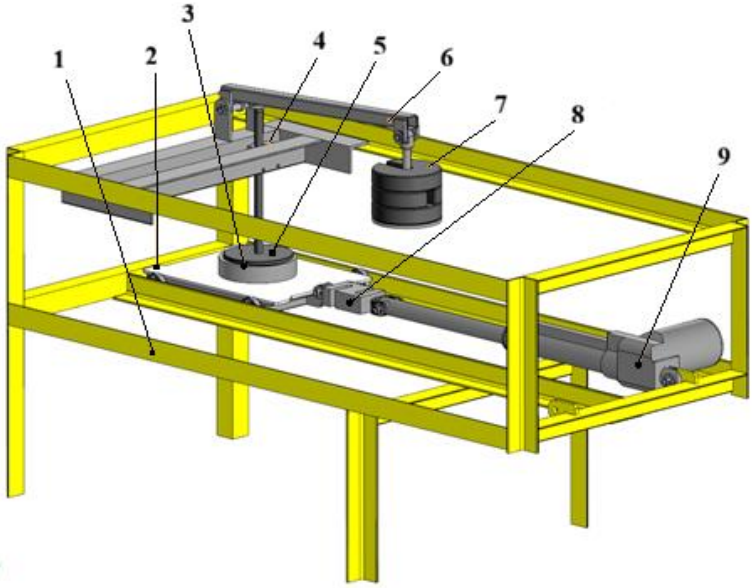


Рис. 3. Сдвиговой стенд:
1 – Рама; 2 – подвижная каретка; 3 – обойма с образцом грунта; 4 – перекладина;
5 – поршень; 6 – рычаг; 7 – груз; 8 – тензометрический датчик; 9 – линейный привод

Так же на нижнем ярусе закреплен механизм привода – линейный привод 9 (рис. 3), который соединен с подвижной кареткой через тензометрический датчик 8 (рис. 3). Усилие сдвига грунта с рабочей поверхности считывается тензометрическим датчиком (рис. 4, а) и фиксируется на электронном измерительном индикаторе (рис. 4, б).

а) *б)*

Рис. 4. Измерительное оборудование:
а- тензометрический датчик; *б* - измерительный индикатор

Управление линейным приводом осуществляется с помощью пульта управления (рис. 5). Данный пульт управления дает возможность изменять скорость выдвижения линейного привода с помощью регулятора 1 и выбрать направление движение, с помощью регулятора направления 3. Так же на пульте управления отображаются температуры внутри изолированной камеры (индикатор 4) и температура на поверхности контакта (индикатор 5).

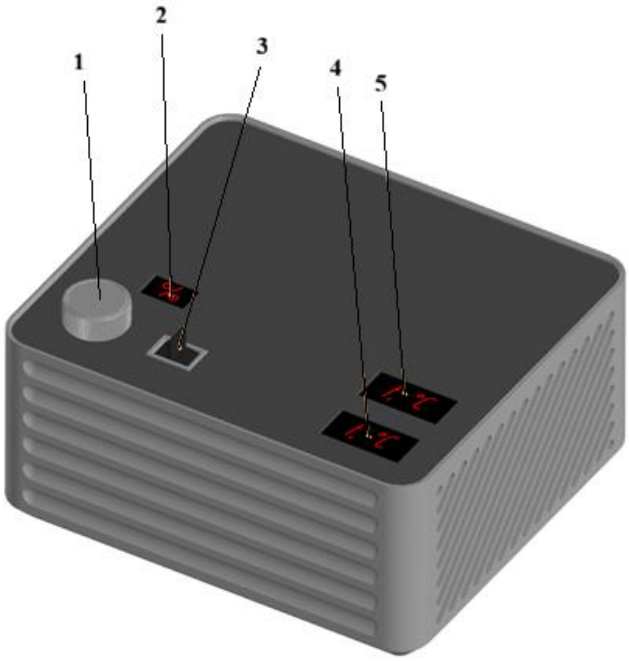


Рис. 5. Пульт управления:
1 – Регулятор скорости линейного привода; 2 – индикатор скорости; 3 – регулятор направления движения; 4 – индикатор температуры внутри камеры; 5 – индикатор температуры имитатора рабочего органа

Вывод.

Разработанная лабораторная установка, представляющая собой сдвиговой стенд, интегрированный в изолированную камеру, позволяет проводить экспериментальные исследования адгезии грунтов в контролируемых условиях. В отличие от существующего открытого стенда [3, 4], предлагаемое решение исключает влияние неконтролируемых факторов внешней среды (атмосферное давление, влажность, ветровые нагрузки и др.), что существенно повышает достоверность и воспроизводимость результатов. Применение тензометрического измерительного оборудования, линейного привода с регулируемой скоростью перемещения и системы контроля температуры обеспечивает точное дозирование и регистрацию параметров нагружения. Благодаря этому установка позволяет объективно оценивать эффективность различных методов борьбы с адгезией грунтов, а также выделять значимость отдельных факторов, влияющих на силу сдвига грунта с рабочими органами землеройных машин.

Литература:

1. Заднепровский Р.П. Рабочие органы землеройных и мелиоративных машин и оборудования для разработки грунтов и материалов повышенной влажности. М.: Машиностроение, 1992. 176 с.;

2. Заднепровский Р.П. Теория трения скольжения. Волгоград: Ofset. 2005. 51 с.;

3. Патент №1310696 СССР. Сдвиговой стенд / В.И. Баловнев, Ю.П. Бакатин, С.А. Зеньков, С.В. Журавчук – Заявка №3992052 от 12.12.1985; опубл. 15.05.1987, Бюл. №18.;

4. Патент №2460989 РФ. Стенд сдвиговый / С.А. Зеньков, Д.Ю. Кобзов, Е.В. Курмашев. – Заявка №2010139838/28 от 28.09.2010; опубл. 10.09.2012, Бюл. №25.

Laboratory equipment for measuring the adhesion force of soils to determine the effectiveness of methods to combat it

Zenkov S.A.[1,a], Dryupin P.Yu.[1,b], Bondalet I.S.[1,c], Mineev D.A.[1,d], Medvedev S.N.[1,e]
[1]Bratsk State University, 40 Makarenko st., Bratsk, Russian Federation
[a]mf@brstu.ru

Keywords: soil adhesion, laboratory stand, shear force

This article examines the reduced productivity of earthmoving equipment when mining wet cohesive soils due to adhesive forces. It is shown that the effectiveness of adhesion control methods can only be reliably assessed through experimental studies requiring specialized laboratory equipment. An analysis of the deficiencies of an existing laboratory setup (a shear rig) operating in open conditions with uncontrolled external factors is presented. As a solution, a modernized laboratory rig is proposed, in which the shear mechanism is mounted inside an isolated chamber, allowing for stabilization of experimental conditions. It is shown that the use of an isolated chamber and a precise measurement system minimizes the impact of unaccounted environmental factors, improves the reproducibility of results, and objectively evaluates the effectiveness of various soil adhesion control methods.

УДК 624.132

Обзор жидкостей для создания промежуточного слоя при борьбе с адгезией грунтов к рабочим органам землеройных машин

Зеньков С.А.[1a], Дрюпин П.Ю.[1,b], Герляин И.А.[1,c], Виноградов Е.Д.[1,d], Быков П.Д.[1,e], Ревин Д.В.[1,f]
[1]Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия
[a]mf@brstu.ru

Ключевые слова: адгезия грунтов, поверхностно-активные вещества, эластомерное покрытие.

Разработка влажных связных грунтов землеройными машинами осложнена их налипанием (и намерзанием в зимний период) на рабочие органы, что снижает производительность и увеличивает энергозатраты. В статье рассмотрены способы создания промежуточного слоя для уменьшения адгезии и трения в зоне контакта. Приведен обзор физико-химических свойств жидкостей DETERGENT и НИОГРИН-С, а также эластомерного покрытия MetaLine 795/980, используемых в качестве защитных составов. На основе анализа их характеристик (смачивающей способности, адгезионных и смазывающих свойств, устойчивости к внешним воздействиям) сделан вывод о преимуществах эластомерного покрытия MetaLine 795/980, обеспечивающего более продолжительный защитный эффект по сравнению с жидкими составами.

Введение.

Земляные работы являются одним из важнейших элементов любого строительства, а также, одними из самых трудоемких и могут составлять до 20% от общего объема

строительных работ. Цель земляных работ заключается в создании земляных сооружений, устройстве оснований зданий и инженерных сооружений и т.д. От качества выполнения и времени, затраченного на земляные работы, зависит и качество, и продолжительность всего строительства.

Однако, разработка влажных связных грунтов, особенно в зимний период, затруднено физическими свойствами данных грунтов. Для таких грунтов характерно налипание (а при отрицательной температуре ¬ намерзание) на поверхности рабочих органов землеройных машин. Это свойство данных грунтов приводит к уменьшению полезного объема ковша, увеличению энергозатратности разработки грунта, увеличению времени простоя машины и, как следствие, снижению производительности землеройных машин.

Налипание и намерзание грунтов к поверхностям землеройных машины обусловлено, помимо силы трения появлению (при налипании) и повышению (при намерзании) адгезионных сил. Данной проблемой занимаются как в России, так и за рубежом. Так наиболее подробная схема снижения адгезии представлена проф. Заднепровским Р. П. Исходя из его классификации все методы делятся на 4 большие группы [1]:

1. Создание промежуточного слоя в зоне контакта;
2. Воздействие на зону контакта для изменения физических свойств грунтов;
3. Механический способ очистки рабочих органов или изменение их геометрических форм;
4. Комбинация нескольких способов.

Несмотря на большое разнообразие этих способов, большинство из них или невозможно реализовать на практике, или их реализация требует больших финансовых затрат, или очень сильно усложняет конструкцию рабочих органов.

В данной статье рассмотрено, проанализировано и проведено сравнение жидкостей, которые могут быть использованы для создания промежуточного слоя между поверхностью рабочего органа и разрабатываемым грунтом.

Основная часть. Основной причиной, влияющей на появление адгезионных сил, является сила трения между контактирующей поверхностью рабочего органа и разрабатываемого грунта. Известно, что сила трения определяется как [2]:

$$F_{тр} = \mu \cdot N,$$

где μ – коэффициент трения; N сила нормального давления.

Из этого следует, что снижение силы трения приведет к увеличению эффективности и производительности землеройных машин. Для ее снижения необходимо или изменить физические свойства материала, из которого изготовляется рабочий орган, или изменить физико-химические свойства разрабатываемого грунта. Эти способы практически невозможно реализовать на практике, но возможно создать промежуточный (жидкий) слой, который будет разделять поверхность рабочего органа и разрабатываемый грунт. При выборе жидкости (раствора) необходимо учитывать ряд факторов, которые определяют эффективность и целесообразность их применения. Основными критериями, влияющими на выбор подходящих растворов, являются:

- Смачивающая способность. Раствор должен хорошо смачивать поверхность рабочих органов, обеспечивая равномерное распределение и прочное сцепление с металлом. Высокая смачивающая способность достигается за счет использования поверхностно-активных веществ (ПАВ), которые снижают поверхностное натяжение раствора.

- Адгезионные свойства. Раствор должен обладать высокой адгезией к металлическим поверхностям рабочих органов, что препятствует механическому отрыву частиц грунта. Адгезионные свойства зависят от химического состава раствора и могут быть улучшены за счет введения в состав специальных адгезионных добавок.

- Смазывающие свойства. Раствор должен обладать смазывающими свойствами, которые снижают трение между грунтом и рабочими органами. Это достигается введением в состав раствора, например, минеральных масел или синтетических полимеров.

- Устойчивость к внешним воздействиям. Раствор должен сохранять свои свойства в широком диапазоне температур и влажности, а также быть стойким к химическому и биологическому разложению. Это достигается подбором оптимального состава раствора и введением в него стабилизирующих добавок.

Ниже рассмотрены жидкости, которые могут быть использованы для данной задачи.

Раствор на основе DETERGENT – это композиция неионогенных поверхностно-активных веществ и функциональных добавок, которая применяется к буровым растворам. Данный раствор относится к 3 классу опасности (малоопасным химическим веществам). Не представляет опасности острого ингаляционного отравления [3].

Приготовление: введение реагента осуществляется либо непосредственно в штанги при наращивании, либо в циркуляционную ёмкость с буровым раствором в концентрации 0.5-1.5 л/м^3.

Физико-технические свойства раствора DETERGENT представлены в табл. 1.

Таблица 1

Физико-химические свойства раствора DETERGENT

№	Наименование показателя	Норма по ТУ
1	Физическое состояние	Прозрачная жидкость
2	Плотность	1,02-1,2 г/см^3
3	Биоразложимость	До 80%
4	Стойкость	Стоек и эффективен в нейтральных и щелочных средах
5	Диапазон температур	+50…-50
6	Расход	0,5 л/м^3

Профилактическая смазка НИОГРИН-С предназначена для покрытия металлических поверхностей вагонов-думпкаров, полувагонов и другого горно-транспортного, транспортного оборудования против примерзания и прилипания к ним вскрышных пород, угля, железной руды, руд цветных металлов, известняка, глины, мела, мергеля и прочих влажных сыпучих материалов, а также для предотвращения пылеобразования и смерзания перевозимого груза [4].

Одноразовая обработка ковша этим средством обеспечивает чистую поверхность ковша в течение 10-15 циклов экскавации в условиях налипания и 20-30 циклов в условиях примерзания.

Физико-технические свойства раствора НИОГРИН-С представлены в табл. 2.

Таблица 2

Физико-химические свойства раствора НИОГРИН-С

№	Наименование показателя	Норма по ТУ
1	Физическое состояние	Маслянистая легкоподвижная жидкость
2	Вязкость (при 50°С)	1,1-3,0
3	Температура застывания,	-45°С
4	Содержание воды, не более	1,3%

Эластомерное покрытие MetaLine 795/980 – полутвердый эластомерный материал, предназначенный для самостоятельного нанесения путем распыления, литья или инъекций. После затвердевания образуется резиновый материал, обладающий исключительной динамической износостойкостью к эрозии, коррозии, кавитации и износу [5].

Физико-технические свойства эластомерного покрытия MetaLine 795/980 представлены в табл. 3.

Таблица 3

Физико-химические свойства эластомерного покрытия MetaLine 795/980

№	Наименование показателя	Норма по ТУ
1	Температура при нанесении	+50…+70°С
2	Твердость (по Шору А)	95
3	Плотность	1,05 г/см^3
4	Прочность на растяжение	24 Н/мм^2
5	Сопротивление раздиранию	68 Н/мм
6	Относительное удлинение при разрыве	275%
7	Температура устойчивости	-50…+100°С
8	Коэффициент трения скольжения	0,6

Вывод.

Ранее на каф. СДМ Братского государственного университета проводились экспериментальные исследования по определению эффективности применения противообледенительных жидкостей «MaxFlight 04» и «Octaflo EG» для борьбы с адгезией грунтов [6-8]. Данные жидкости показали свою эффективность, однако применение данного вида покрытий затруднительно на практике. Из рассмотренных материалов, наиболее предпочтительным является эластомерное покрытие MetaLine 795/980, так как из-за своих физико-химических свойств создает более устойчивое к внешнему воздействию покрытие.

Литература:

1. Заднепровский Р.П. Рабочие органы землеройных и мелиоративных машин и оборудования для разработки грунтов и материалов повышенной влажности. М.: Машиностроение, 1992. 176 с.;

2. Заднепровский Р.П. Теория трения скольжения. Волгоград: Ofset. 2005. 51 с.;

3. ТехСервис ГНБ. Детергент для буровых растворов [Электронный ресурс]. – URL: https://tsgnb.ru/shop/spare-parts/polimery-dlya-gnb/detergent-dlya-burovyh-rastvorov-bentopro-detergent;

4. РН-ХИМ – Ао Инновационно-Промышленная компания. Профилактическая смазка Ниогрин-С [Электронный ресурс]. – URL: https://rtnh.ru/catalog/item?item=33;

5. MetaLine.com – Surface protection. MetaLine [Электронный ресурс]. – URL: https://metaline.com/files/V700UR-EN.pdf

6. Зеньков С.А., Балахонов Н.А., Чубыкина Д.С. Снижение адгезии грунта к машинам при применении жидкостного промежуточного слоя // Системы. Методы. Технологии. 2015. № 4 (28). С. 43-48.;

7. Зеньков С.А., Балахонов Н.А. Снижение адгезии грунта к металлическим поверхностям рабочих органов землеройных машин нанесением жидкостного промежуточного слоя // Вестник развития науки и образования. 2014. № 3. С. 32-37.

8. Зеньков С.А., Елохин А.В., Курмашев Е.В. К вопросу о применении ремонтно-восстановительных составов для снижения адгезии грунтов к рабочим органам СДМ // Механики XXI веку. 2009. № 8. С. 159-161.

A review of solutions for creating an intermediate layer when connecting soils with adhesion to the inclusion of earthmoving machines

Zenkov S.A.[1a], Dryupin P.Yu.[1,b], Gerlyain I.A.[1,c], Vinogradov E.D.[1,d], Bykov P.D.[1,e], Revin D.V.[1,f]

[1]Bratsk State University, 40 Makarenko st., Bratsk, Russian Federation

[a]mf@brstu.ru

Keywords: adhesion of primers, surfactants, elastomeric coating.

The development of wet, cohesive soils with earthmoving equipment is complicated by their adhesion (and freezing in winter) to the working parts, which reduces productivity and increases energy consumption. This article discusses methods for creating an intermediate layer to reduce adhesion and friction in the contact zone. It also provides an overview of the physicochemical properties of DETERGENT and NIOGRIN-S liquids, as well as the MetaLine 795/980 elastomeric coating, used as protective compounds. Based on an analysis of their characteristics (wetting ability, adhesion and lubricating properties, and resistance to external influences), it is concluded that the MetaLine 795/980 elastomeric coating offers advantages, providing a longer-lasting protective effect compared to liquid compounds.

УДК 621.879

Перспективы применения пьезокерамических преобразователей для снижения адгезии грунтов к машинам

Зеньков С.А.[1a], Минеев Д.А.[1b], Дрюпин П.Ю.[1,c], Бондалет И.С.[1,d], Медведев С.Н.[1,e]
[1]Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия
[a]mf@brstu.ru, [b]mineev_67@mail.ru

Ключевые слова: адгезия, пьезокерамические преобразователи, очистка, ковш, землеройные машины

Проблема налипания грунта на рабочие органы землеройных машин является одной из наиболее распространённых в строительстве и горнодобывающей промышленности. Она существенно влияет на эффективность работы техники, производительность и качество выполняемых операций. Существуют различные способы борьбы с адгезией грунта на рабочих органах землеройных машин. В данной статье рассматривается вопрос применения пьезокерамических преобразователей, как одного из комбинированных методов борьбы с адгезией грунта на рабочих органах землеройных машин. Представлен имитатор рабочего органа землеройной машины с набором пьезокерамических преобразователей CN4038-45LB-P4. Проведено исследование доказывающее использование пьезокерамических излучателей как комбинированного метода (теплового и вибрационного). Составлен план для определения эффективности, оптимальных параметров использования пьезокерамических преобразователей при помощи сдвигового стенда.

Введение. Землеройные машины, такие как экскаваторы, часто сталкиваются с проблемой налипания, намерзания грунта к рабочим органам (рис.1). В результате налипания снижается полезный объем ковша, увеличивается масса ковша, как следствие, нагрузки на гидравлику и ходовую часть, возрастает износ механизмов, повышается расход топлива и увеличивается время выполнения операций [1]. В современных условиях поиск инновационных решений для борьбы с адгезией является актуальной задачей.

Рис.1. Налипший грунт на ковш экскаватора

Существующие подходы к снижению адгезии грунтов к рабочим органам машин, согласно классификации Р.П. Заднепровского, можно разделить на четыре основные группы.

Первая группа включает методы, основанные на формировании промежуточного слоя на границе контакта, который выполняет роль барьера и препятствует прямому взаимодействию между почвой и поверхностью инструмента. В качестве таких слоев могут использоваться различные смазки, антиадгезионные покрытия, а также специальные пленкообразующие вещества, временно изолирующие рабочий орган от грунта.

Вторая группа объединяет способы, направленные на ослабление адгезионных связей посредством внешних воздействий, изменяющих свойства контактирующих фаз. К таким воздействиям относятся, например, тепловое, вибрационное или электромагнитное влияние. Эти методы позволяют не только уменьшить прилипание, но и повысить самоочищаемость рабочих органов в процессе эксплуатации.

Третья группа охватывает конструктивно-технологические решения и механические методы, предполагающие совершенствование конструкции рабочих органов и применение специальных устройств для удаления налипшего грунта. Сюда относятся оптимизация формы и материала рабочих поверхностей, внедрение самоочищающихся элементов, а также использование вибрационных или импульсных механизмов, способствующих сбрасыванию налипшей почвы.

Четвертая группа включает комбинированные методы, сочетающие элементы из перечисленных выше подходов для достижения максимального эффекта. Такой комплексный подход позволяет учитывать специфику условий эксплуатации и свойства грунта, обеспечивая более эффективное снижение адгезии за счёт синергии нескольких способов воздействия.

Традиционные методы борьбы с налипанием грунта на ковш экскаватора, не всегда эффективны и требуют дополнительных затрат [2,3,10].

На практике применяются следующие методы:

- механическая очистка (скребки, лом, кувалда);
- использование смазочных материалов;
- футеровочные покрытия;
- разогрев при помощи открытого огня.

Недостатки традиционных методов:

- ограниченная эффективность, особенно при интенсивной работе;
- необходимость регулярного обслуживания и обновления покрытий;
- дополнительные расходы на материалы и рабочую силу;

-экологические риски при использовании химических средств.

Основная часть. Одним из перспективных методов борьбы с адгезией грунта является использование пьезокерамических излучателей. Пьезокерамические излучатели работают на основе пьезоэлектрического эффекта - способности некоторых материалов изменять свою форму при приложении электрического поля и, наоборот, генерировать электрический заряд при механическом воздействии. В основе их действия лежит использование пьезоэлементов из керамических материалов, обладающих высокой пьезоэлектрической чувствительностью [4,5].

Когда на пьезоэлемент подается переменное электрическое напряжение, он начинает вибрировать с высокой частотой. Эти механические колебания распространяются в окружающую среду в виде ультразвуковых волн. В случае установки излучателей на ковш экскаватора эти ультразвуковые вибрации создают микроскопические механические колебания поверхности ковша, которые способны генерировать ультразвуковые колебания и тем самым уменьшать адгезию грунта к рабочим поверхностям [6].

Преимущества использования излучателей:

- экологическая безопасность;
- повышение производительности;
- долговечность;
- автоматизация процесса (возможность интеграции в системы автоматического управления экскаватором).

Конструкция пакетного пьезокерамического преобразователя, оптимально подходящего для применения на рабочих органах строительных и дорожных машин, изображена на рисунке 2. Преобразователь CN4038-45LB-P4 мощностью 60Вт и частотой 40 кГц включает две керамических пластины 1, верхнюю накладку 2 из дюралюминия Д16Т, нижнюю накладку 4 из стали 45 и прокладки 3 высотой 0,2-0,3 мм из фольги. Центральный болт 5 проходит в отверстия в пьезокерамических пластинах и накладках [7].

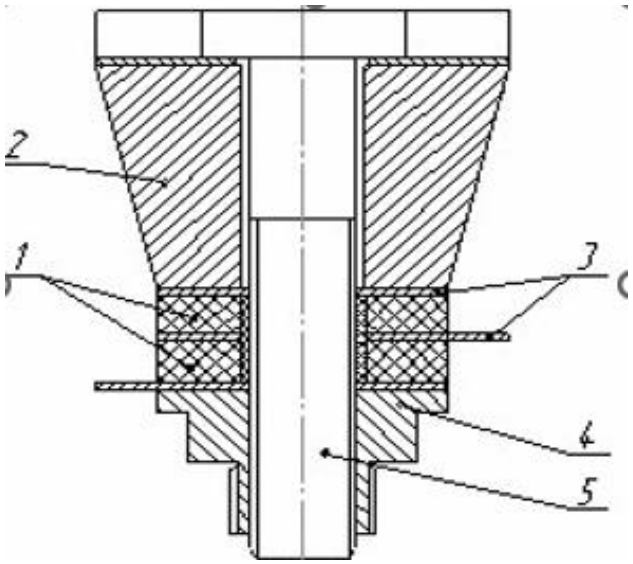


Рис.2. Конструкция пакетного преобразователя CN4038-45LB-P4 на частоту 40 кГц

На рисунке 3 представлен имитатор рабочего органа землеройной машины с набором пьезокерамических преобразователей. Он состоит: 1 пластина , 2 преобразователь, 3 ультразвуковая плата, 4 вентилятор охлаждения, 5 панель управления, 6 тумблер.

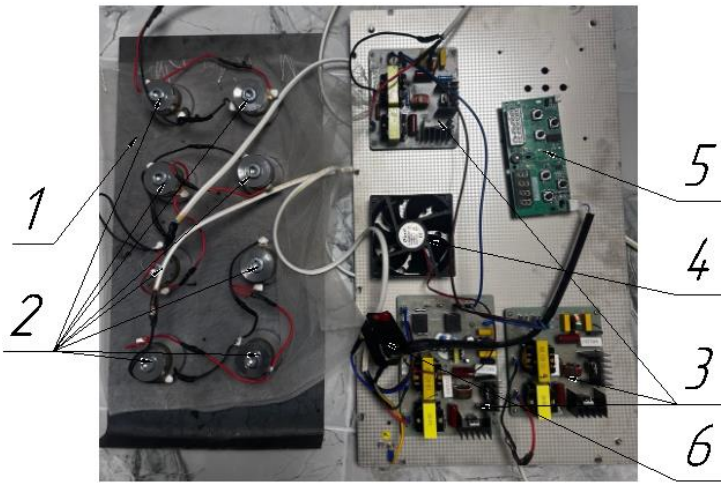


Рис. 3. Установка с использованием пьезокерамических преобразователей

С помощью лазерного инфракрасного пирометра произвели измерение температуры пластины 1 с использованием пьезокерамического преобразователя 2. На рисунке 4 указана температурно-временная характеристика, отражающая зависимость температуры нагрева пластины с использованием пьезокерамических преобразователей от времени.

Согласно полученным результатам, при работе пьезокерамические преобразователи нагреваются, также в свою очередь нагревают пластину 1, что в сочетании с высокочастотной вибрацией дает на выходе комбинированное воздействие.

Выводы. Для оценки эффективности планируется произвести эксперименты с использованием пакетного пьезокерамического излучателя CN4038-45LB-P4 мощностью 60Вт и частотой 40 кГц Планируемые эксперименты по определению эффективности пьезокерамических излучателей включают несколько этапов, направленных на оценку их влияния на производительность и качество работы экскаваторов при использовании данной технологии.

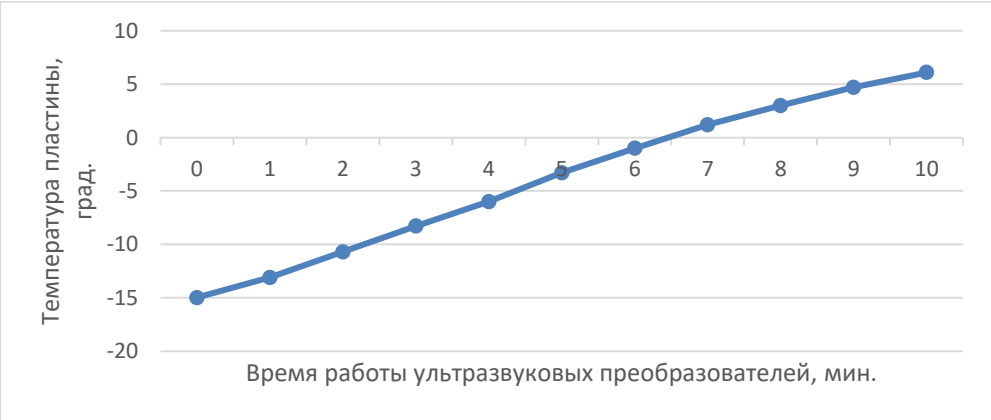
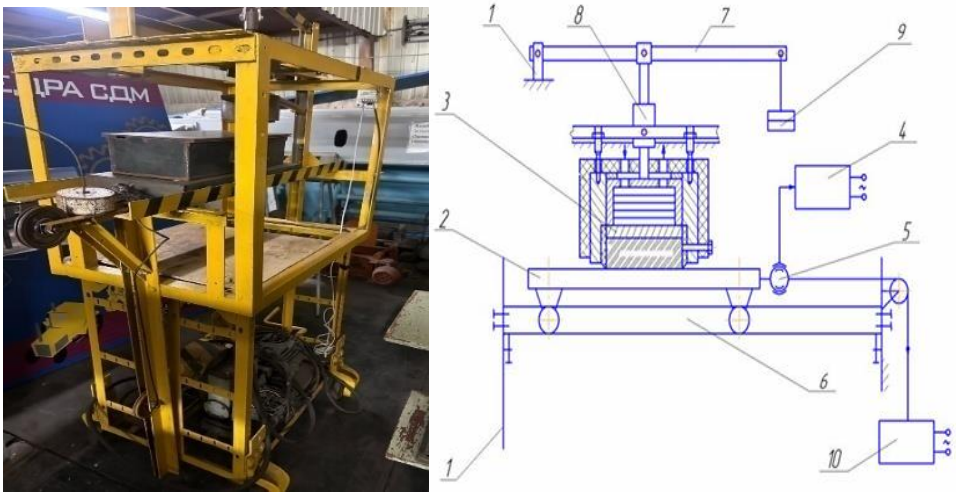


Рис. 4. График изменения температуры пластины
от времени работы излучателей

Первый этап предполагает лабораторные испытания, в ходе которых будут моделироваться условия работы ковша с налипанием грунта. В этом случае будут использоваться образцы грунта с различными физико-химическими свойствами, различной температурой, а также различные параметры работы излучателей - частота, мощность и режим работы. Цель - определить оптимальные параметры вибрационного воздействия для

минимизации налипания. Эксперименты планируются провести на стенде сдвигового типа (рис. 5) [8,9].



а) *б)*

Рис.5. Сдвиговой стенд:
а – лабораторная установка; *б* – принципиальная схема:
1 – рама; 2 – каретка; 3 – обойма; 4 – тензометрическая аппаратура; 5 – тензометрический датчик; 6 – направляющая; 7 – нагрузочный рычаг; 8 – втулка; 9 – груз; 10 – приводной механизм

Сдвиговой стенд позволяет определить сдвиговое усилие, которое возникает при взаимодействии грунта с имитатором ковша, когда на зону контакта не действует тепловое излучение, при различной внешней температуре и различном давлении прижатия и сравнить его со значениями сдвигового усилия при действии пакетного пьезокерамического излучателя.

Второй этап - анализ полученных данных и статистическая обработка результатов. Будут построены графики и диаграммы, показывающие зависимость производительности от использования излучателей, а также оценка экономической эффективности.

Цель всех этих экспериментов - определить параметры работы излучателей, которые обеспечивают максимальную эффективность борьбы с налипанием грунта и минимальные потери времени и ресурсов. Это позволит разработать рекомендации по внедрению технологии на рабочие органы землеройных машин и повысить их надежность и рентабельность.

Литература:

1.Средства и способы предотвращения прилипания и примерзания горной массы к металлическим рабочим поверхностям // Сборник научных трудов. – Челябинск: НИИОГР, 1972. 36 с.

2. Заднепровский Р.П. Теория трения скольжения. Волгоград: Ofset. 2005. 51 с.

3. Заднепровский Р.П. Рабочие органы землеройных и мелиоративных машин и оборудования для разработки грунтов и материалов повышенной влажности. М.: Машиностроение, 1992. 176 с.

4. Зеньков, С.А. о возможности применения пьезокерамических излучателей для снижения адгезии грунтов при их разработке/ Зеньков С.А., Минеев Д.А., Дрюпин П.Ю., Бондалет И.С., Быков П.Д. // Молодая мысль: наука, технологии, инновации. Материалы XVII (XXIII) Всероссийской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых. Братск, 2025. С. 83-87.

5.Зеньков, С.А. Устранение налипания грунта на рабочие органы землеройных машин с использованием пьезокерамических излучателей / С.А. Зеньков, К.А. Игнатьев, А.С. Филонов, Н.А.

Балахонов // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. 2013. Т. 1. С. 64-72.

6.Ультразвуковые процессы в производстве изделий электронной техники [Текст]: в 2-х т. / С.П. Кундас, В.Л. Ланин М.Д. Тявловский и др. Под общ. ред. акад. НАН Беларуси А.П. Достанко.– Мн.: Бестпринт, 2002.-404 с.

6.Бобцов А.А., Бойков В.И., Быстров С.В., Григорьев В.В., Карев П.В. Исполнительные устройства и системы для микроперемещений. – СПб:Университет ИТМО, 2017 – 134 с.

7. 4.Зеньков, С.А. Снижение адгезии грунтов к рабочим органам землеройных машин при помощи высокочастотного воздействия / С.А. Зеньков, А.С. Козик, О.А. Буйлов // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2011. Т. 2. С. 88-92.

8. Зеньков С.А., Кобзов Д.Ю., Курмашев Е.В. Стенд сдвиговый: пат. на изобретение RUS 2460989 28.09.2010; заявл. 28.09.2010; опубл. 10.09.2012.

9. Баловнев В.И., Бакатин Ю.П., Зеньков С.А., Журавчук С.В. Сдвиговой стенд: пат. на изобретение Рос. Федерация. № 1310696. 12.12.1985; заявл. 12.12.1985; опубл. 15.05.1987.

10. Zenkov S.A., Kirichenko O.P., Mineev D.A. Reducing adhesion of soil to the earth-moving machines using piezoceramic transducers // Journal of Advanced Research in Technical Science. 2017. № 4. С. 56-58.

Prospects for the use of piezoceramic transducers to reduce soil adhesion to machines

ZenkovS.A.[1,a], MineevD.A.[1,b], Dryupin P.Yu.[1,c], Bondalet I.S.[1,d], Medvedev S.N.[1, e]

[1]Bratsk State University,40 Makarenko st., Bratsk, 665709, Russian Federation

[a]mf@brstu.ru, [b]mineev_67@mail.ru

Keywords: adhesion, piezoceramic transducers, cleaning, bucket, earthmoving machines.

The problem of soil sticking to the working organs of earthmoving machines is one of the most common in the construction and mining industries. It significantly affects the efficiency of the equipment, productivity and quality of the operations performed. There are various ways to combat soil adhesion on the working bodies of earthmoving machines. This article discusses the use of piezoceramic transducers as one of the combined methods of combating soil adhesion on the working bodies of earthmoving machines. A simulator of the working body of an earthmoving machine with a set of piezoceramic converters CN4038-45LB-P4 is presented. A study was conducted proving the use of piezoceramic emitters as a combined method (thermal and vibration). A plan has been drawn up to determine the efficiency and optimal parameters of using piezoceramic transducers using a shear stand.

УДК 621.878.4

Сравнительный анализ применения универсальных малогабаритных погрузчиков в условиях Красноярского края

Минин В.В.[1,2,a], Петров А.И.[1,b], Юдаков К.С.[1,c]

[1]Сибирский Федеральный университет, Пр. Свободный, 79, Красноярск, Россия

[2]Российская инженерная академия, Газетный пер., д.9, к.4, г. Москва, Россия

[a] vminin@rambler.ru, [b] andrey20.90@inbox.ru, [c] kirill12qw@mail.ru

Ключевые слова: универсальные малогабаритные погрузчики, холодное фрезерование, Красноярский край, ресайклинг, технико-экономическая эффективность.

Рассмотрены региональные особенности эксплуатации универсальных малогабаритных погрузчиков с навесным фрезерным оборудованием в дорожно-строительном комплексе Красноярского края. Приведены результаты сравнительного анализа производительности, энергоемкости и себестоимости работ для моделей техники различных классов. Определены наиболее эффективные модели и условия их применения с учетом климатических факторов, сезонности и экономической специфики региона.

Введение.

Для проведения полного технико-экономического анализа эффективности работы универсальных малогабаритных погрузчиков (УМП) [1,2] с оборудованием для ресайклинга необходимо адаптировать теоретические расчеты к специфическим условиям Восточной Сибири. Эксплуатация навесного фрезерного оборудования в Красноярском крае характеризуется рядом следующих факторов. Во-первых, определяющее влияние оказывает резко континентальный климат региона. Длительный период отрицательных температур (с октября по апрель) не только сокращает активный дорожно-строительный сезон до 5 месяцев (май-сентябрь), но и существенно изменяет физико-механические свойства асфальтобетонного покрытия.

Для оценки производительности процесса холодного фрезерования вначале рассмотрим базовую теоретическую модель, описывающую работу навесного фрезерного оборудования в нормативных условиях эксплуатации [3,4].

Теоретическая производительность определяется как произведение геометрических и кинематических параметров процесса:

$$Q_{теор} = B \cdot h \tag{1}$$

где B – ширина захвата фрезы, м; h – глубина (толщина) снимаемого слоя, м; v – скорость перемещения машины, м/ч.

Данная зависимость справедлива для идеализированных условий эксплуатации [5,6] и не учитывает влияние внешних факторов, таких как климатические условия, состояние дорожного покрытия и организационные особенности выполнения работ. В реальных условиях эксплуатации универсальных малогабаритных погрузчиков в Красноярском крае указанные факторы оказывают существенное влияние на производительность процесса, что требует введения системы поправочных коэффициентов.

В задачах сравнительной оценки эффективности технических систем, функционирующих в различных условиях эксплуатации, широко применяется интегральный показатель, формируемый на основе совокупности частных критериев. Наиболее универсальным подходом является использование аддитивной модели, позволяющей учитывать разнородные факторы и их относительную значимость.

Интегральный коэффициент эффективности может быть представлен следующим образом:

$$K_{инт} = \sum_{i=1}^{n} (k_i \cdot d_i), \tag{2}$$

где k_i – нормированное значение i-го показателя; d_i – весовой коэффициент, отражающий значимость показателя; n – количество учитываемых факторов; i – порядковый номер частного показателя.

В рассматриваемом случае интегральный коэффициент, учитывающий реальные условия эксплуатации, определяется как произведение частных коэффициентов:

$$k_{сумм} = k_{кл} \cdot k_{покр} \cdot k_{орг}, \tag{3}$$

где $k_{кл}$ – климатический коэффициент (0,85-0,9); $k_{покр}$ – коэффициент, учитывающий тип и состояние дорожного покрытия (0,85); $k_{орг}$ – коэффициент организации труда и логистики (0,7-0,8).

В расчетах используются средние значения коэффициентов, определяемые как середина соответствующих интервалов, на основе указанных значений, факторов рассчитан интегральный региональный коэффициент эффективности:

$$k_{сумм} = 0{,}875 \cdot 0{,}85 \cdot 0{,}75 = 0{,}56.$$

С учётом введенного коэффициента эксплуатационная производительность (м^3/ч) процесса холодного фрезерования для условий Красноярского края определяется по формуле:

$$Q_{экспл} = B \cdot h \cdot v \cdot k_{сумм} \quad (4)$$

Зависимости между теоретическим потенциалом машин и их реальной выработкой в условиях Восточной Сибири представлены на рис.1

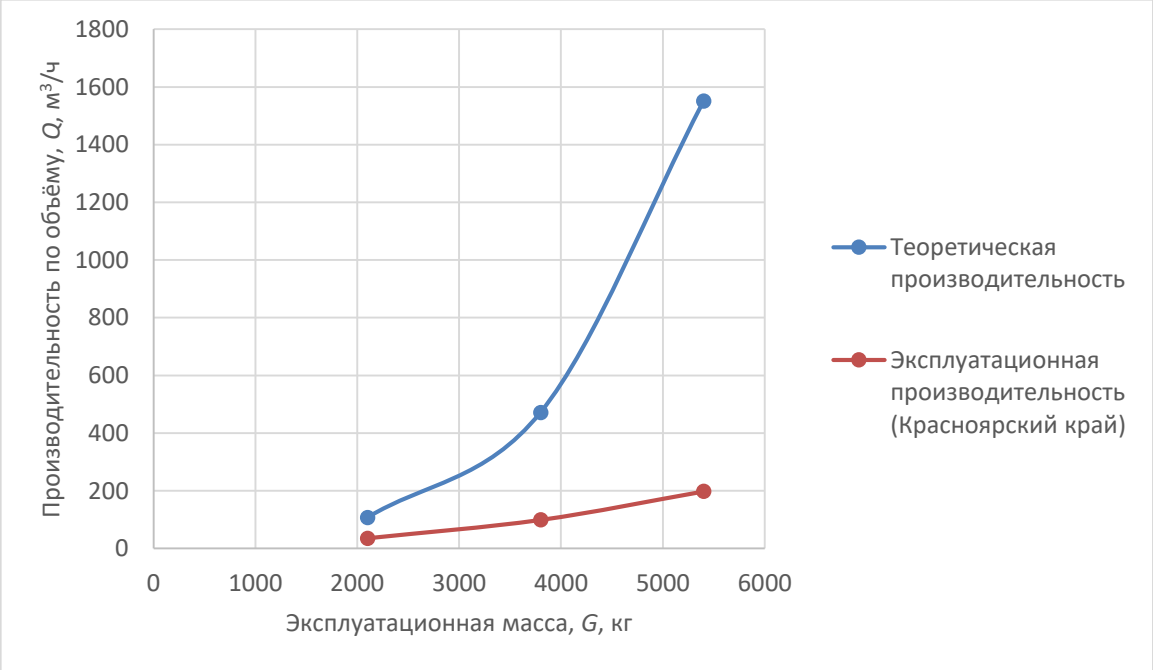


Рис. 1. Зависимости объемной эксплуатационной производительности Q от эксплуатационной массы УМП с фрезерным рабочим органом G в нормативных условиях и региональных (Красноярский край) условиях эксплуатации

Для оценки экономической эффективности применения эксплуатационных УМП выполнен расчет себестоимости процесса холодного фрезерования с учетом региональных цен на топливо [7].

На первом этапе определяется часовой расход топлива машины и соответствующие затраты:

$$C_{топл} = q \cdot C_{дт}, \quad (5)$$

где q – расход топлива, л/ч; $C_{дт}$ – стоимость дизельного топлива, руб./л (принята равной 62 руб./л).

Для перехода к удельной топливной себестоимости (на единицу объема выполненных работ) используется выражение:

$$C_{топл} = \frac{q \cdot C_{дт}}{Q_{экспл}} \quad (6)$$

Однако топливные затраты составляют лишь часть полной себестоимости эксплуатации техники. Для учета дополнительных расходов (заработная плата оператора, техническое обслуживание, амортизация и прочие эксплуатационные затраты) вводится коэффициент перехода к полной эксплуатационной стоимости:

$$C_{полн} = C_{топл} \cdot k_{пер}, \quad (7)$$

где $k_{пер}$ – коэффициент, учитывающий совокупность дополнительных затрат.

Значение коэффициента $k_{пер}$ принято на основе анализа структуры эксплуатационных расходов дорожно-строительных организаций и находится в диапазоне от 1,7 до 1,8.

Результаты расчета себестоимости фрезерования для различных моделей техники, результаты которого представлены в табл. 1.

Таблица 1

Себестоимость фрезерования асфальтобетона в ценах 2025г.

Модель [8]	Расход топлива, л/ч	Топливная себестоимость, руб./м^3	Полная себестоимость, руб./м^3
Bobcat S150	6.0	6.46	11.6
Bobcat S590	11.0	4.21	7.58
Bobcat S850	14.0	2.68	4.82

Полученные значения производительности учитывают различия в ширине фрезерования и мощности базовых машин, что приводит к нелинейному снижению удельных затрат топлива.

При средней рыночной расценке на холодное фрезерование в Красноярском крае 18-25 руб./м³, расчетная рентабельность применения техники составляет: 54-115% (для малого класса); 137-230% (для среднего класса); 272-418% (для тяжелого класса).

Несмотря на сверхвысокую рентабельность модели S850, основным сдерживающим фактором являются капитальные затраты. Стоимость новой техники (по данным дилеров на 2025 год) составляет: S150 – 5,2 млн руб.; S590 – 8,9 млн руб.; S850 – 12,5 млн руб.

Срок окупаемости тяжелой модели (S850) при полной загрузке минимален, однако высокие начальные инвестиции (12,5 млн) делают её доступной только для крупных подрядчиков. Для муниципальных нужд (жилищно-коммунального хозяйства) оптимален вариант S590, который при стоимости 8,9 млн руб. обеспечивает баланс между доступностью и низкой себестоимостью работ (7,58 руб./м³).

Для расчета сроков окупаемости инвестиций принят базовый тариф на фрезерование (доходная ставка) в размере 20 руб./м³ (за вычетом прямых затрат). Расчетный годовой фонд рабочего времени и финансовые результаты представлены в табл. 2.

Анализ показывает, что использование машин малого и среднего класса исключительно только для фрезерования экономически несостоятельно (срок окупаемости превышает срок службы машины).

Таблица 2

Себестоимость фрезерования асфальтобетона в ценах 2025г.

Модель	Годовая выработка, м^3/год	Прибыль, руб./год	Срок окупаемости, мес. (только фрезерование)
Bobcat S150	2000	257 000	240 мес.
Bobcat S590	6500	1 060 000	101 мес.
Bobcat S850	13000	2 590 000	58 мес.

Для повышения рентабельности парка УМП необходимо применять стратегию диверсификации загрузки: 50% времени – сезонные дорожные работы (фрезерование, ямочный ремонт); 50% времени – коммунальные работы в зимний период (уборка снега, погрузка реагентов). При такой стратегии эксплуатации (круглогодичная загрузка) срок окупаемости среднего класса сокращается до 3–4 лет, что является приемлемым показателем для муниципальных предприятий.

Важнейшим аспектом применения технологии холодного фрезерования является повторное использование материала. При переработке 1 м³ старого покрытия образуется

порядка 2,35 т рециклата (гранулята), пригодного для отсыпки обочин или приготовления новых смесей.

Здесь ресурсосбережение составляет экономию битума 25–30 кг на 1 м³, щебня – до 1,8 т/м³.; Сокращение выбросов CO_2 оценивается в 45 кг/м³ за счет исключения процессов добычи и нагрева новых материалов; Пример годового эффекта: При годовой выработке модели Bobcat S590 равной 6500 м³ предотвращенный экологический ущерб составляет за счет природных ресурсов (щебень) 11 700 т/год и снижение эмиссии парниковых газов (CO_2): 292 т/год.

Данные показатели полностью соответствуют целям национального проекта «Экология» и Транспортной стратегии РФ до 2030 года.

На основании вычисленного технико-экономического анализа и с учетом региональных коэффициентов ($k_{сумм}$=0,56), сформированы следующие рекомендации по формированию парка техники:

Для муниципальных предприятий ЖКХ (г. Красноярск, Канск, Ачинск) приоритетной моделю является Bobcat S590. Средний класс модели признан наиболее рациональной, так как она сочетает в себе компактность для работы в стесненных дворовых условиях и достаточную производительность для ямочного ремонта. Окупаемость достигается за 3–4 года при условии круглогодичного использования (летом – фрезерование, зимой – снегоочистка и погрузка).

Дорожным подрядчикам областного и федерального уровня рекомендуется тяжелый класс Bobcat S850. Модель показывает максимальную эффективность и минимальную себестоимость (4,82 руб./м³) достигаются именно на этой модели. Применение S850 оправдано только на крупных объектах с годовым объемом работ более 10 000 м³. Это позволяет сократить сроки перекрытия движения на оживленных трассах региона.

Малым строительным организациям и сельским поселениям целесообразно использовать Bobcat S150 с прицепом. Главное преимущество здесь – мобильность. Рекомендуется как вспомогательная единица для микроремонта и работы в труднодоступных местах. Экономическая эффективность в данном случае обеспечивается минимальными затратами на транспортировку и возможностью перевозки на обычном прицепе.

Выводы.

В ходе исследования эффективности эксплуатации УМП в условиях Красноярского края установлено, что наиболее рациональной для муниципальных нужд является модель Bobcat S590, сочетающая компактность и производительность, достаточную для ямочного ремонта. При этом использование тяжелых моделей (S850) оправдано только на объектах с высокой концентрацией работ (свыше 10 000 м³/год). Важно отметить, что механизация процесса ресайклинга не только снижает прямые затраты, но и обеспечивает выполнение экологических требований регионального законодательства. Для обеспечения максимальной экономической эффективности в условиях дорожного ремонтно-строительного управления Красноярского края рекомендуется круглогодичное использование техники, распределяя рабочее время в равных долях между дорожными работами и выполнением коммунальных задач, таких как уборка снега и погрузочные операции.

Литература:

1. Минин В.В. Концепция повышения эффективности универсальных малогабаритных погрузчиков: монография – Красноярск: Сиб. федер, ун-т, 2012. – 304 с.

2. Баловнев В.И., Глаголев С.Н., Кустарев Г.В. и др. Дорожно-строительные машины и комплексы: Изд-во БГТУ, 2020. – 526 с.

3. Методические рекомендации по применению технологии холодного ресайклинга при ремонте автомобильных дорог / ФКУ «РОСДОРНИИ», – М., 2023. – 86 с.

4. Иванов С. П., Петров А. Н. Технологии холодного ресайклинга в условиях Сибири // Дороги и мосты. – 2023. - № 2. – С. 33-40.

5. Кузнецов Н.А., Лебедев В.М. Эксплуатация дорожно-строительных машин в сложных климатических условиях. – М.: Машиностроение, 2019. – 312 с.

6. Федоров В.П., Сидоров А.Г. Оценка эффективности строительных машин: теория и практика. – СПб.: Политехника, 2021. – 278 с.

7. Цены на топливо по субъектам РФ (январь-октябрь 2025) [Электронный ресурс] // Федеральная служба государственной статистики (Росстат).

8. Bobcat Company. Attachment Performance Guide: Milling Attachments. – West Fargo, USA, 2024. – 42 p.

Comparative analysis of the use of universal compact loaders in the con ditions of the Krasnoyarsk krai

Minin V.V.[1,2,a], Petrov A.I.[1,b], Yudakov K.S.[1,c]
[1] Siberian Federal University, Svobodny Ave., 79, Krasnoyarsk, Russia
[2] Russian Engineering Academy, Gazetny per., 9, bldg. 4, Moscow, Russia
[a]vminin@rambler.ru, [b]andrey20.90@inbox.ru, [c]kirill12qw@mail.ru

Keywords: universal compact loaders, cold milling, Krasnoyarsk Krai, recycling, technical and economic efficiency.

The paper examines the regional features of operating universal compact loaders with mounted milling equipment in the road construction sector of the Krasnoyarsk Krai. The results of a comparative analysis of productivity, energy consumption, and cost of work for machinery models of various classes are presented. The most efficient models and conditions for their use are identified, taking into account climatic factors, seasonality, and the economic specifics of the region.

УДК 621.225.001.57

Методы математического моделирования динамических процессов гидроприводов в системах автоматического управления

Федоров В.С.[1,a], Тобоков Р.В.[1,b], Кашуба В.Б.[1, c]
[1] Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия
[a] fedorov-v-s@yandex.ru, [b] tobokov@bk.ru, [c] kvb1964@yandex.ru

Ключевые слова: гидропривод, динамические процессы, автоматическое управление, математическое моделирование, SimInTech, Matlab/Simulink.

В статье рассмотрены методы математического моделирования динамических процессов гидроприводов в системах автоматического управления. Представлены теоретические основы описания механической, гидравлической и управляющей подсистем гидропривода. Показано, что для анализа переходных процессов целесообразно сочетать модели состояния и передаточные функции. Приведены базовые зависимости для механической подсистемы привода поворота, объёмного гидропривода с приводным асинхронным двигателем и гидравлического механизма изменения подачи насоса.

Современные гидроприводы мобильных и строительных машин работают в условиях переменных нагрузок, нестационарных режимов и повышенных требований к точности управления. В этих условиях математическое моделирование выступает основным

инструментом анализа динамики, позволяющим ещё на этапе проектирования оценивать устойчивость системы, качество переходных процессов и чувствительность к изменению параметров.

Математическое моделирование гидроприводов строится на основе законов сохранения массы, энергии и импульса. Для описания динамики используются системы обыкновенных дифференциальных уравнений, передаточные функции и имитационные модели. Такой подход позволяет учитывать инерцию механических звеньев, упругость соединений, силы трения, утечки рабочей жидкости, её сжимаемость, а также характеристики исполнительных и управляющих элементов.

С практической точки зрения наибольший интерес представляет комплексная модель, объединяющая механическую подсистему, объёмный гидропривод и механизм изменения подачи насоса. Именно такая структура обеспечивает возможность исследования режимов разгона, торможения и установления скорости, а также анализа влияния коэффициента демпфирования и гидравлической жёсткости на характер движения.

Для механической подсистемы привода поворота исходная субмодель приведена на рисунке 1(с помощью ПО SimInTech). Она отражает взаимодействие трёх инерционных масс, упругих связей и моментов трения между ними:

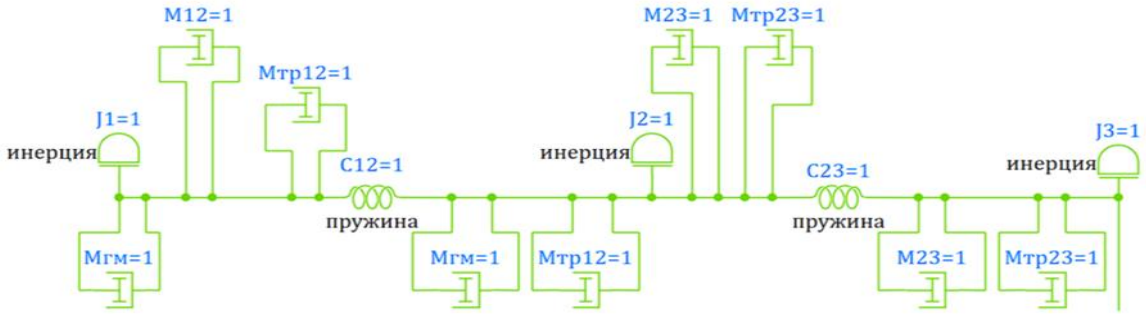


Рис. 1. Субмодель механической части привода поворота гидравлического экскаватора

Динамической схеме механической подсистемы соответствует система дифференциальных уравнений:

$$J_1 p\omega_1 = M_{\text{гм}} - M_{12} - M_{\text{тр}12},$$
$$J_2 p\omega_2 = M_{12} + M_{\text{тр}12} - M_{23} - M_{\text{тр}23},$$
$$J_3 p\omega_3 = M_{23} + M_{\text{тр}23},$$
$$M_{12} = (C_{12} / p)(\omega_1 - \omega_2),$$
$$M_{23} = (C_{23} / p)(\omega_2 - \omega_3),$$
$$M_{\text{тр}12} = K_{\text{тр}12}(\omega_1 - \omega_2),$$
$$M_{\text{тр}23} = K_{\text{тр}23}(\omega_2 - \omega_3),$$

где $K_{\text{тр}12}$ и $K_{\text{тр}23}$ – коэффициенты вязкого трения; J_1 – суммарный момент инерции гидромотора и редукторов; J_2 – момент инерции поворотной платформы; J_3 – момент инерции рабочего оборудования; C_{12} и C_{23} – жёсткости соединительных элементов; ω_1, ω_2, ω_3 – угловые скорости соответствующих масс.

Эквивалентная динамическая схема механической части привода поворота показана на рис. 2. Она удобна для физической интерпретации моментов упругости и сопротивления в системе.

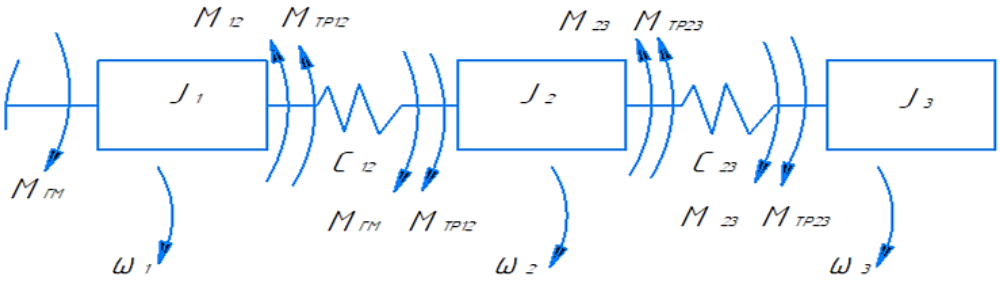


Рис. 2. Динамическая схема механической части привода поворота гидравлического экскаватора

Математическая модель объёмного гидропривода с приводным асинхронным двигателем насоса описывает баланс расходов, момент гидромотора и динамику электродвигателя. Расход жидкости гидромотором можно записать следующим образом:

$$Q_{\text{м}} = q_{\text{гм}} \frac{\omega_1}{2\pi} + r_{\text{м}} p_{\text{в}} + \frac{V_{\text{р}}}{E_{\text{р}}} \square p_{\text{в}},$$

где $q_{\text{гм}}$ – объемная постоянная гидромотора; $r_{\text{м}}$ – коэффициент пропорциональности между утечками в гидромоторе и перепадом давления в нем; $p_{\text{в}}$ – разница давлений жидкости в напорной и сливной магистралях; $V_{\text{р}}$ – объем жидкости; $E_{\text{р}}$ – модуль упругости жидкости; ω_1 – угловая скорость гидромотора.

Приведённая зависимость позволяет учесть объёмную постоянную гидромотора, утечки, сжимаемость рабочей жидкости, гидравлическую жёсткость системы, а также влияние параметра регулирования насоса на момент нагрузки электродвигателя.

Математическая модель гидравлического механизма изменения подачи насоса может быть определена через передаточную функцию, связывающую параметр регулирования $\gamma(p)$ с управляющим давлением $p_u(p)$. Начальную форму передаточной функции, можно получить из уравнения динамики сервопоршня с учетом силового баланса:

$$F_p = p_u A_p,$$
$$F_{\text{пр}} = C_p X_p.$$

Она будет иметь вид:

$$\frac{\gamma(p)}{p_u(p)} = K_{\text{дн}} \frac{\omega_{\text{оп}}^2}{p^2 + 2\xi_p \omega_{\text{оп}} p + \omega_{\text{оп}}^2},$$

где $K_{\text{дн}} = (K_p A_p)/C_p$ – статический коэффициент передачи, ξ_p — коэффициент затухания, $\omega_{\text{оп}}$ – частота собственных колебаний.

При нормировке знаменателя путем деления на $\omega_{\text{оп}}^2$ и введении постоянных времени:

$$T_2 = 1/\omega_{\text{оп}}^2,$$
$$T_1 = 2\xi_p/\omega_{\text{оп}}.$$

Функция приводится к стандартному виду второго порядка:

$$\frac{\gamma(p)}{p_u(p)} = \frac{K_{\text{дн}}}{T_2^2 p^2 + T_1 p + 1}.$$

Этот переход позволяет анализировать устойчивость системы и связать давление с подачей насоса:

$$Q_{\text{н}} = K_{\text{дн}} Q_{\text{ном}}$$

и скоростью жидкости в трубопроводе, приведенной к вращательному движению платформы:

$$\omega_{\text{г}} = K_{дн} \omega_{\text{д}}.$$

Для наглядного примера рассмотрим модель гидравлического механизма изменения подачи насоса, реализованную в среде SimInTech. Модель основана на преобразованной передаточной функции.

Таблица 1

Исходные данные модели

Параметр	$К_{дн}$	$\omega_{оп}$	$\xi_п$	$Q_{ном}$	$\omega_д$
Значение	0,5	10 об/с	0,07	0,3 л/с	20 об/с

Добавили наши исходные данные из табл. 1 в инструмент «Скрипт»:

```
1  Кдн=0.5;
   Qном=0.3;
   ωд=20;
   ωоп=10;
5  ξ=0.07;
```

Рис. 3. Окно «Скрипт» с введенными исходными данными

На рабочую область добавили необходимые блоки. Соединили их, указали свойства:

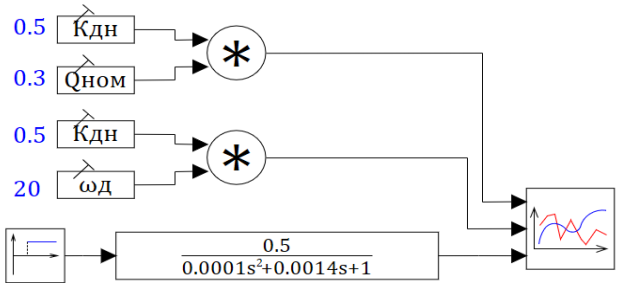


Рис. 4. Структурная схема исследуемой модели

На выходе получаем:

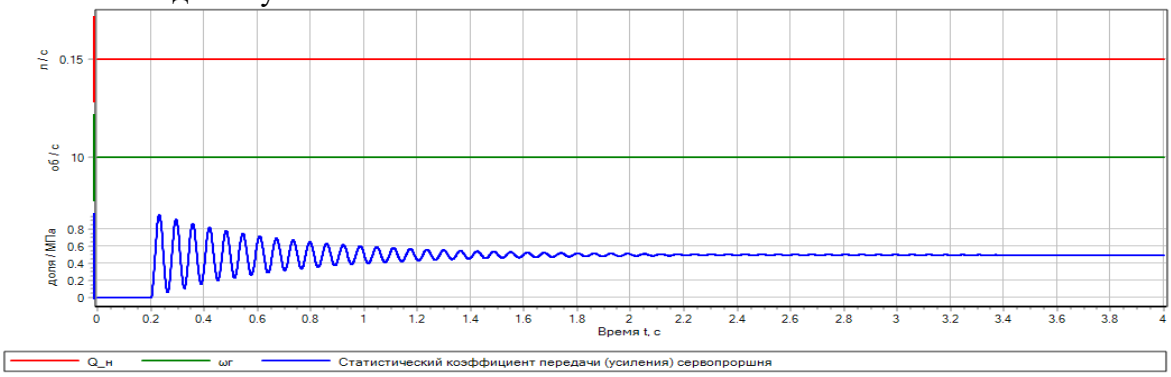


Рис. 5. Результаты моделирования гидравлического механизма изменения подачи насоса

Из полученных результатов можно сделать выводы:

– подача насоса (объём жидкости, который насос способен перекачать за единицу времени) равен 0,15 л/с (9 л/мин);

– максимальная скорость жидкости в трубопроводе, приведенная к вращательному движению платформы, равна 10 об/с (900 об/мин);

– коэффициент усиления сервопоршня в установившемся режиме равен 0,5 доли/МПа (норма от 0 до 1);

– максимальные значения колебаний (на первых 0,2 – 0,4 с) составили ± 0,4 доли/МПа;

– время, по достижению которого насос выполняет цикл (достигает установившегося значения), составило 3,4 с;

– транспортная задержка равна 0,2 с (задана ступенчатым воздействием), что обусловленно временем становления начальных переходных процессов в гидравлической системе и необходимостью наблюдения чистой реакции сервопоршня на ступенчатое воздействие.

Анализ результатов показывает, что математическая модель позволяет выявлять параметры, определяющие качество переходных процессов: коэффициент демпфирования, гидравлическую жёсткость, уровень утечек и транспортную задержку. Благодаря тому, что вся система описывается в виде модели, изменение любого параметра занимает доли секунды, а результат пересчёта появляется практически мгновенно.

Математическое моделирование гидроприводов – эффективный инструмент для повышения точности, надежности и адаптивности систем управления. Оно позволяет анализировать динамику, выявлять перегрузки и износ, а также оптимизировать работу гидросистем без испытаний на реальном оборудовании. На сегодняшний день перспективным направлением является использование искусственного интеллекта и машинного обучения для создания цифровых двойников, способных адаптироваться к условиям работы и поддерживать предиктивное обслуживание. Это обеспечит более высокую надежность оборудования и уменьшает расходы на его обслуживание.

Методы математического моделирования динамических процессов гидроприводов в системах автоматического управления позволяют точно описывать поведение систем с использованием уравнений моментов инерции, демпфирования и жесткости, а также гидравлических характеристик расхода и давления. Модели можно реализовать в программных комплексах SimInTech и Matlab/Simulink, данные программные комплексы обеспечивают достаточную верификацию параметров. В целом, эти методы повышают эффективность проектирования и управления гидроприводами в технике, подтверждая их применимость через численные эксперименты и сравнение с реальными данными.

Литература:

1. Никитин О. Ф. Гидравлика и гидропневмопривод: учеб. пособие для студентов, обучающихся по специальности «Автомобиле- и тракторостроение». – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012. – 430 с.

2. Башта Т. М. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы: учебник. – М.: Машиностроение, 1982. – 423 с.

3. Кудинов В. А. Гидравлика. – М.: Юрайт, 2023. – 256 с.

4. Щерба В. Е., Павлюченко Е. А., Носов Е. Ю., Григорьев А. В. Гидравлика и гидропривод: практикум. – Омск: ОмГТУ, 2020. – 100 с.

5. Герман-Галкин С. Г., Карташов Б. А., Литвинов С. Н. Модельное проектирование электромеханических мехатронных модулей движения в среде SimInTech. – М.: ДМК Пресс, 2021. – 494 с.

6. Крауиньш П. Я., Смайлов С. А., Мойзес Б. Б. Гидравлика и гидропривод: учеб. пособие. – Томск: Томский политехнический университет, 2006. – 223 с.

7. Veselovská A. et al. Development of the mathematical model of the hydraulic drive of the lift mechanism of the working equipment of a front loader // Scientific Journal of Silesian University of Technology. – 2016. – Vol. 91. – P. 123–132.

Methods of mathematical modeling of dynamic processes in hydraulic drives in automatic control systems

Fedorov V.S.[1,a], Tobokov R.V.[1,b], Kashuba V.B.[1,c]
[1] Bratsk State University, 40 Makarenko st., Bratsk, 665709, Russian Federation
[a]fedorov.v.s@yandex.ru, [b] tobokov@bk.ru, [c] kvb1964@yandex.ru

Keywords: hydraulic drive, dynamic processes, automatic control, mathematical modeling, SimInTech, Matlab/Simulink.

The article examines methods of mathematical modeling of dynamic processes in hydraulic drives within automatic control systems. Theoretical foundations for describing the mechanical, hydraulic, and control subsystems of hydraulic drives are presented. It is shown that for analyzing transient processes, it is advisable to combine state-space models and transfer functions. Basic dependencies are provided for the mechanical subsystem of the turning drive, a volumetric hydraulic drive with a drive asynchronous motor, and a hydraulic mechanism for changing the pump feed.

УДК 666.97.031

Определение мощности привода бетоносмесителя с дополнительным магнитным активатором

Шаура А.С.[1,a], Фёдоров В.С.[1,b], Портнягина А.В[1,c.], Аскеров Р.Т.[1,d]
[1] Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия
[a] shauraas00@mail.ru, [b] fedorov.v.s@yandex.ru, [c] portnyagina_1408@mail.ru

Ключевые слова: бетоносмеситель, магнитный активатор, постоянные магниты, реологические свойства, предел текучести, пластическая вязкость.

Рассматривается методика определения требуемой мощности привода бетоносмесителя принудительного действия при оснащении его дополнительным магнитным активатором на постоянных магнитах, установленным на лопастях и корпусе смесителя. Показано, что влияние магнитного поля на энергетические параметры процесса перемешивания реализуется через изменение реологических характеристик бетонной смеси, описываемой бинговской моделью. На основе связи между пределом текучести, пластической вязкостью и моментом сопротивления вращению рабочих органов получены выражения для расчёта мощности привода с учётом магнитной активации. Приведены соотношения для учёта дополнительного гидродинамического сопротивления в зоне магнитного активатора.

Повышение энергоэффективности оборудования для приготовления бетонных смесей остаётся одной из приоритетных задач современной строительной индустрии. Одним из перспективных направлений является использование различных способов активации воды затворения и бетонной смеси, в том числе магнитной и электромагнитной обработки. Такие методы позволяют изменить структуру цементных систем, повысить прочность и долговечность бетона, сократить расход вяжущего и продолжительность тепловлажностной обработки изделий. [1, 2] В последние годы возрастающий интерес вызывает применение магнитных активаторов на постоянных высокоэнергетических магнитах, размещаемых непосредственно на лопастях и внутренней поверхности корпуса смесителя. Такое конструктивное решение позволяет создавать магнитное поле непосредственно в зоне интенсивного сдвига и перемешивания, что усиливает влияние на структуру смесь–вода–цемент при отсутствии затрат электрической энергии на создание магнитного поля. [3] При этом изменяются реологические свойства бетонной смеси и характер гидродинамического течения в рабочем пространстве, что приводит к изменению силовой нагрузки на привод

смесителя и требует уточнённой методики определения требуемой мощности привода. Целью настоящей работы является разработка математического описания влияния магнитного поля, создаваемого постоянными магнитами на лопастях и корпусе смесителя, на требуемую мощность привода и формулировка расчётных соотношений для инженерной практики.

В традиционных методиках расчёта бетоносмесителей принудительного действия мощность привода определяется через крутящий момент сопротивления перемешиванию и частоту вращения рабочих органов по соотношению

$$N_{\text{вал}} = M\,\omega = \frac{2\pi n M}{60}, \quad (1)$$

где M – крутящий момент на валу смесителя, n – частота вращения, ω – угловая скорость. Требуемая мощность электродвигателя выбирается с учётом КПД привода η по формуле: [1]

$$N_{\text{дв}} = \frac{N_{\text{вал}}}{\eta} = \frac{2\pi n M}{60\,\eta}. \quad (2)$$

Крутящий момент обычно рассчитывается как сумма составляющих, связанных с сопротивлением смеси вращению лопастей и кронштейнов, трением в опорах, потерями в передаче и пусковыми перегрузками. При этом сопротивление смеси оценивается по эмпирическим зависимостям в функции массы загрузки, типа смесителя и частоты вращения [1]. Вопрос влияния магнитной активации, реализуемой через постоянные магниты на лопастях и корпусе, на мощность привода в подобных методиках, как правило, не рассматривается. Использование магнитных активаторов учитывается преимущественно через выбор повышенного запаса по мощности без явной связи с реологическими параметрами бетонной смеси и конфигурацией магнитного поля. [3]

Незатвердевшая бетонная смесь относится к классу вязкопластичных материалов и с достаточной для инженерных расчётов точностью описывается бинговской моделью (модель Шведова–Бингама):

$$\tau = \tau_0 + \eta_m \dot{\gamma}, \quad (3)$$

где τ – напряжение сдвига, τ_0 – предел текучести, η_m – пластическая (эффективная) вязкость, $\dot{\gamma}$ – скорость сдвига. [4, 5]

Экспериментальные исследования реологических свойств бетонных смесей показывают, что параметры τ_0 и η_m существенно зависят от состава, подвижности, возраста смеси и режимов обработки. Магнитная активация воды затворения и самой смеси, осуществляемая в том числе при прохождении вдоль поверхностей, оснащённых постоянными магнитами, приводит к изменению структуры водной фазы и цементного теста. Это проявляется в снижении предела текучести и эффективной вязкости, а также в росте подвижности при неизменном водоцементном отношении. [2, 4, 6]

Для описания влияния магнитного поля вводятся зависимости:

$$\tau_0 = \tau_0(B),\ \eta_m = \eta_m(B), \quad (4)$$

где B – магнитная индукция в зоне активатора. В инженерной форме удобно использовать безразмерные коэффициенты:

$$\tau_0(B) = \tau_{0,0} k_\tau(B),\ \eta_m(B) = \eta_{m,0} k_\eta(B), \quad (5)$$

где $\tau_{0,0}, \eta_{m,0}$ – значения параметров без магнитной обработки. [6]

С точки зрения пространственного распределения поля установка магнитов на лопастях и корпусе формирует периодически изменяющееся во времени и координатах магнитное поле в зоне интенсивного сдвига. Это позволяет более эффективно воздействовать на структуру смеси по сравнению с внешними стационарными активаторами в магистралях подачи. [3]

Рассмотрим взаимодействие лопасти бетоносмесителя с бетонной смесью в приближении плоского сдвигового потока. Пусть лопасть площадью A движется в слое смеси толщиной зазора h на радиусе R с частотой вращения вала n. Тогда характерная скорость сдвига оценивается выражением:

$$\dot{\gamma} \approx \frac{v}{h} \approx \frac{2\pi Rn}{60\,h}. \quad (6)$$

Напряжение сдвига на поверхности лопасти при наличии магнитной активации:

$$\tau(B) = \tau_0(B) + \eta_m(B)\frac{2\pi Rn}{60\,h} \quad (7)$$

Сила сопротивления, действующая на лопасть:

$$F(B) \approx \tau(B)A \quad (8)$$

Крутящий момент от одной лопасти на валу смесителя:

$$M_\ell(B) \approx RF(B) = RA\left[\tau_0(B) + \eta_m(B)\frac{2\pi Rn}{60\,h}\right] \quad (9)$$

Учитывая суммарный эффект всех лопастей и конструктивных элементов, сопротивляющихся сдвигу, момент сопротивления смеси можно представить в виде

$$M(B) = C_1\tau_0(B) + C_2\eta_m(B)n, \quad (10)$$

где C_1, C_2 – геометрические коэффициенты, зависящие от числа лопастей, их размеров и формы, радиусов действия и глубины погружения в смесь [1, 4].

Подстановка зависимостей $\tau_0(B)$, $\eta_m(B)$ даёт:

$$M(B) = C_1\tau_{0,0}k_\tau(B) + C_2\eta_{m,0}k_\eta(B)n \quad (11)$$

В отсутствие магнитной активации ($B = 0$, $k_\tau = k_\eta = 1$) имеем базовый момент:

$$M_0 = C_1\tau_{0,0} + C_2\eta_{m,0}n \quad (12)$$

Таким образом, влияние магнитного активатора на момент сопротивления вращению смесителя при установке магнитов на лопастях и корпусе полностью описывается через функции $k_\tau(B)$ и $k_\eta(B)$.

Мощность на валу смесителя при наличии магнитного активатора:

$$N_{\text{вал}}(B) = \frac{2\pi n}{60}M(B) = \frac{2\pi n}{60}[C_1\tau_{0,0}k_\tau(B) + C_2\eta_{m,0}k_\eta(B)n] \quad (13)$$

Требуемая мощность электродвигателя с учётом КПД привода:

$$N_{\text{дв}}(B) = \frac{N_{\text{вал}}(B)}{\eta} = \frac{2\pi n}{60\,\eta}[C_1\tau_{0,0}k_\tau(B) + C_2\eta_{m,0}k_\eta(B)n] \quad (14)$$

Для анализа удобно ввести коэффициент влияния магнитного поля на мощность:

$$k_N(B) = \frac{N_{\text{дв}}(B)}{N_{\text{дв},0}} \quad (15)$$

где $N_{\text{дв},0}$ – мощность привода без магнитной активации. Тогда

$$k_N(B) = \frac{C_1\tau_{0,0}k_\tau(B) + C_2\eta_{m,0}k_\eta(B)n}{C_1\tau_{0,0} + C_2\eta_{m,0}n} \quad (16)$$

Если магнитная обработка приводит к снижению τ_0 и η_m, то $k_\tau(B) < 1$, $k_\eta(B) < 1$, следовательно, $k_N(B) < 1$, что отражает потенциальное уменьшение требуемой мощности привода при фиксированных геометрических и кинематических параметрах смесителя.[2, 6]

Конструктивное исполнение магнитного активатора в виде постоянных магнитов на лопастях и корпусе может порождать дополнительное гидродинамическое сопротивление течению смеси за счёт изменения профиля лопастей, появления локальных зон ускоренного сдвига и турбулизации потока вблизи магнитных элементов. Для его учёта введём итоговый момент сопротивления

$$M_{\text{общ}}(B) = M(B) + M_{\text{акт}}(B), \quad (17)$$

где $M_{\text{акт}}(B)$ – момент, обусловленный протеканием смеси в изменённой геометрии рабочего пространства, связанной с установкой магнитов. [3]

В инженерной практике удобно объединить влияние магнитной активации на реологию и дополнительного сопротивления в единый коэффициент по моменту:

$$M_{\text{общ}}(B) = k_M(B)M_0 \quad (18)$$

Тогда мощность привода запишется как:

$$N_{\text{дв}}(B) = k_M(B)N_{\text{дв},0} \quad (19)$$

На стадиях эскизного проектирования и подбора оборудования при отсутствии детальных данных о $k_\tau(B)$, $k_\eta(B)$ и $M_{\text{акт}}(B)$ коэффициент $k_M(B)$ может приниматься в

диапазоне 1,1–1,2, после чего уточняться по результатам экспериментальных испытаний опытного образца установки. [1, 3]

Построенная схема показывает, что влияние магнитного активатора на основе постоянных магнитов, установленных на лопастях и корпусе смесителя, на мощность привода реализуется не напрямую через дополнительное потребление электроэнергии на создание поля, а через изменение реологических параметров бетонной смеси и гидродинамического сопротивления в рабочем пространстве. При этом суммарный эффект может быть как снижением требуемой мощности (за счёт снижения τ_0 и η_m), так и её незначительным увеличением при неблагоприятной конструкции активатора, создающей избыточное сопротивление потоку. [2, 3]

Использование параметров $k_\tau(B)$, $k_\eta(B)$ и $k_M(B)$ позволяет увязать выбор мощности привода с конкретными экспериментальными данными по реологии и конструкции активатора, что повышает надёжность расчёта по сравнению с традиционной практикой выбора завышенного запаса по мощности. Такая постановка задачи особенно актуальна для современных энергоэффективных производств, где снижение удельных энергозатрат на единицу продукции является одним из ключевых критериев конкурентоспособности. [1, 2]

Выводы:

1. Предложена математическая модель влияния магнитного активатора на основе постоянных магнитов, установленных на лопастях и корпусе смесителя, на требуемую мощность привода бетоносмесителя, основанная на бинговском описании реологических свойств бетонной смеси и связи её параметров с крутящим моментом сопротивления вращению рабочих органов.
2. Получены выражения для мощности привода в функции предела текучести и пластической вязкости бетонной смеси с учётом их зависимости от магнитной индукции в зоне активатора и пространственного распределения поля.
3. Введены коэффициенты $k_\tau(B)$, $k_\eta(B)$ и $k_M(B)$, позволяющие по результатам реологических и эксплуатационных испытаний оценивать влияние магнитной активации на силовую загрузку и мощность привода бетоносмесителя.
4. Сформулированный подход может служить основой для дальнейшего построения инженерных методик расчёта мощности привода с учётом конкретной геометрии лопастей, схемы размещения магнитов и характеристик обрабатываемых бетонных смесей.

Полученные зависимости и теоретические соотношения могут быть использованы на этапах проектирования и модернизации бетоносмесительных установок, ориентированных на применение магнитной активации бетонных смесей.

Литература:

1. Rheology of fresh cement and concrete: сайт. – URL: https://www.structuremag.org/article/rheological-properties-of-concrete (дата обращения: 25.03.2026). – Текст: электронный.
2. Ferraris C. F., de Larrard F. Testing and modeling of fresh concrete rheology.: Washington, 1998. – 50 p.
3. Rheological properties of concrete: сайт. – URL: https://www.structuremag.org/article/rheological-properties-of-concrete (дата обращения: 25.03.2026). – Текст: электронный.
4. ГОСТ 10181-2014. Смеси бетонные. Методы испытаний: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 11.12.14 N 1972-ст: дата введения 2015-07-01. – URL: https://internet-law.ru/gosts/gost/58506 (дата обращения: 02.04.2026).
5. A bibliometric analysis and comprehensive review of magnetized water effects on concrete properties: сайт. – URL: https://link.springer.com/article/10.1007/s42107-024-01096-8 (дата обращения: 25.03.2026). – Текст: электронный.

6. Zhao W. et al. Effect of magnetized water on the fundamental grouting properties of cement grout under varying magnetization conditions // Scientific Reports, 2025. с 1-14
7. Influence of magnetic water on concrete properties: сайт. – URL: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9227616 (дата обращения: 25.03.2026). – Текст: электронный.
8. ГОСТ Р 52956-2008. Материалы магнитотвёрдые спечённые на основе сплава неодим-железо-бор. Классификация. Основные параметры: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 18.09.08 N 203-ст: дата введения 2009-01-01. – URL: https://internet-law.ru/gosts/gost/47595/ (дата обращения: 02.04.2026).

Determination of the drive power of a concrete mixer with an additional magnetic activator

Shaura A.S.[1,a], Fedorov V.S.[1,b], Portnyagina A.V.[1,c], Askerov R.T.[1,d]
[1]Bratsk State University, 40 Makarenko Street, Bratsk, Russia
[a]shauraas00@mail.ru, [b]fedorov.v.s@yandex.ru, [c]portnyagina_1408@mail.ru

Keywords: concrete mixer, magnetic activator, permanent magnets, rheological properties, yield point, plastic viscosity.

The paper considers a method for determining the required drive power of a forced-action concrete mixer when it is equipped with an additional magnetic activator based on permanent magnets installed on the blades and the mixer body. It is shown that the influence of the magnetic field on the energy parameters of the mixing process is realized through changes in the rheological characteristics of the concrete mixture, which are described by the Bingham model. Based on the relationship between the yield point, plastic viscosity, and the resistance torque of the mixing tools, expressions for calculating the drive power are obtained, taking into account the magnetic activation. The paper presents the following equations:

УДК 614.8.084:621.87:001.4

Специализированная площадка для грузовых испытаний кранов, как фактор повышения достоверности экспертизы промышленной безопасности

Лоншаков В.А.[1,a], Шатило Д.С.[1,b], Калугин А.В.[1,c]
[1]Забайкальский государственный университет, ул. Александро-Заводская, 30, г. Чита, Россия
[a]lonshakov_viktor@mail.ru, [b]dmitrrydchatilo@yandex.ru, [c]kav8007@mail.ru

Ключевые слова: подъёмные сооружения, экспертиза промышленной безопасности, грузовые испытания, испытательная площадка, Ростехнадзор, устойчивость.

В статье рассматриваются проблемы обеспечения достоверности результатов экспертизы промышленной безопасности (ЭПБ) стреловых самоходных кранов и кранов-манипуляторов. На основе анализа деятельности Ростехнадзора выявлена прямая зависимость между нарушениями условий установки подъемных сооружений (ПС) и уровнем аварийности. Проведен сравнительный анализ отечественных требований к диагностированию ПС и зарубежных стандартов. Выявлен нормативный пробел в регламентации параметров испытательных площадок. Обоснована необходимость формирования специализированных инженерных площадок как обязательного элемента

технической базы экспертных организаций для повышения точности оценки остаточного ресурса и устойчивости ПС.

Введение.

Эксплуатация грузоподъёмных кранов в строительстве связана с воздействием значительных нагрузок, сложными кинематическими схемами и высокой зависимостью от условий установки. В соответствии с Федеральным законом № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» такие технические устройства относятся к категории повышенной опасности [1].

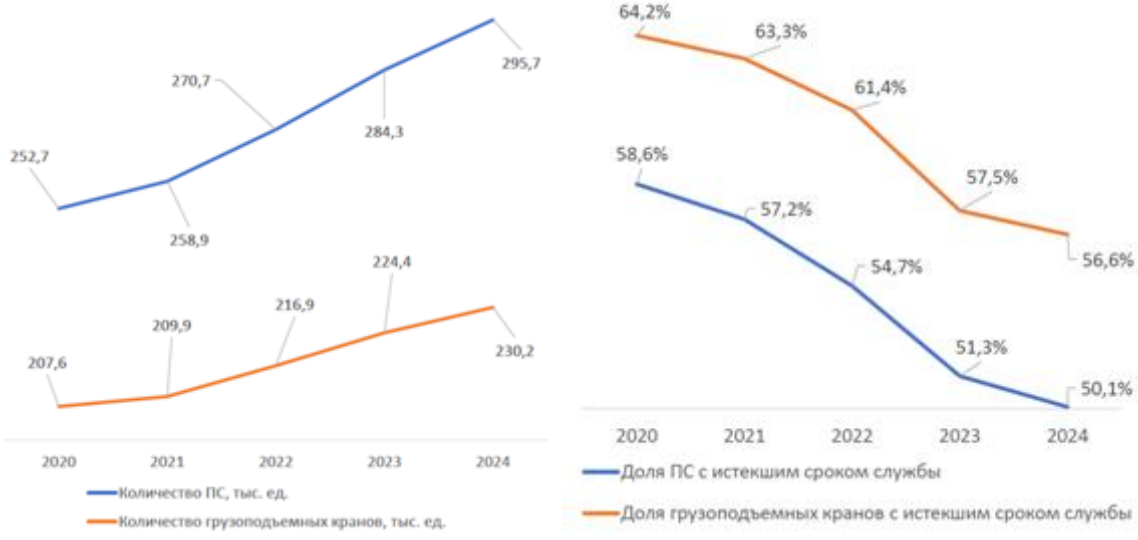
Ключевым инструментом обеспечения безопасной эксплуатации является экспертиза промышленной безопасности (ЭПБ), регламентируемая нормативными актами Ростехнадзора [2],[3]. Для ПС с истекшим сроком службы ЭПБ является единственным легитимным инструментом продления ресурса. Одним из центральных элементов ЭПБ выступают грузовые испытания, результаты которых напрямую зависят от параметров «инженерной среды» – испытательной площадки.

Анализ состояния парка ПС и динамики аварийности.

Согласно данным Ростехнадзора, в период 2020-2024 гг. доля ПС, отработавших нормативный срок службы, постепенно снижается: с 58,6% в 2020 г. до 50,1% в 2024 г. [5]. Доля грузоподъемных кранов от общего количества ПС в 2020 составляла 82,1%, к 2024 она составила – 77,8%. При этом количество грузоподъемных кранов за рассматриваемый период возросло на 22,64 тыс. ед. при общем количестве ПС – 295,7 тыс. ед. Несмотря на это, уровень аварийности стабилизировался на отметке 30 случаев ежегодно [5-9].

Несмотря на снижение доли устаревшей техники, абсолютное количество таких машин остаётся значительным, что формирует устойчивые риски.

Техническое расследование причин аварий показывает, что до 30% инцидентов обусловлено организационными факторами, включая низкий уровень производственного контроля и нарушения требований по установке кранов на не подготовленных площадках [6,7,9].



а *б*

Рис. 1. Динамика за 2020-2024:
а – рост общего количества ПС и количества грузоподъемных кранов в составе ПС;
б – снижение общей доли ПС и доли грузоподъемных кранов с истекшим сроком службы в составе ПС

Аварийность обусловлена не только техническим состоянием ПС, но и условиями их эксплуатации, включая текущие параметры площадки.

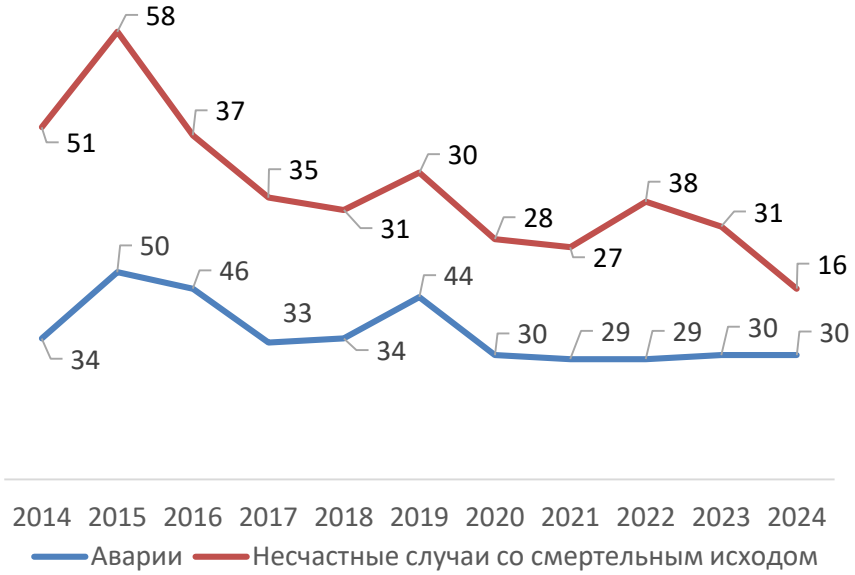


Рис. 2. Динамика аварийности и смертельного травматизма (2014-2024 гг.)

Анализ статистических данных Ростехнадзора показывает устойчивый уровень аварийности при значительной вариативности тяжести последствий [5].

Проблемы достоверности экспертизы промышленной безопасности.

Грузовые испытания являются ключевым инструментом оценки технического состояния ПС. Однако их проведение в реальной практике характеризуется следующими проблемами:

– отсутствие контроля несущей способности основания;
– отсутствие стандартизации условий установки;
– вариативность распределения нагрузок под опорами;
– влияние внешних факторов (уклон, деформация грунта и др.).

В результате:

- снижается воспроизводимость результатов;
- увеличивается влияние субъективного фактора;
- ограничивается доказательная ценность экспертных заключений.

Верификация систем надзора: РФ в сравнении с зарубежным опытом.

Сравнительный анализ показывает концептуальные различия в подходах к контролю условий эксплуатации и испытаний ПС.

Отечественная система. Акцент сделан на регламентацию самой процедуры ЭПБ и квалификацию эксперта [3]. Требования к инфраструктуре площадки носят фрагментарный характер и распределены между ФНП и рекомендательными документами [10,11].

Зарубежные системы (LOLER - Великобритания, OSHA - США, DGUV - Германия). В данных моделях «инженерная среда» рассматривается как первичный фактор обеспечения безопасности. Например, в системе LOLER параметры площадки и контроль распределения нагрузок под выносными опорами являются обязательными элементами документирования каждого осмотра, что обеспечивает высокую воспроизводимость данных.

Таблица 1

Сравнительный анализ отечественной и зарубежных систем надзора

Критерий	Россия	LOLER / HSE (Великобр.)	OSHA (США)	DGUV (Германия)
1	2	3	4	5
Концепция регулирования	Промышленная безопасность ОПО, экспертиза промышленной безопасности	Безопасность подъемных операций	Охрана труда и производственная безопасность	Интегрированная система предотвращения травматизма
Ключевой механизм контроля	Экспертиза промышленной безопасности (ЭПБ)	Метод «тщательного осмотра»	Инспекционный контроль и допуск компетентных лиц	Система страхового и производ. контроля
Роль экспертизы/ контроля	Центральный элемент допуска к эксплуатации	Периодический обязательный контроль	Проверка условий безопасной эксплуатации	Встроенный элемент системы безопасности
Наличие института ЭПБ	Да (обязательный элемент системы)	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует
Регламентация испытаний	ГОСТ 34687-2020, ФНП	Через процедуры контроля и проверок	Через требования безопасности и инструкций	Через технические и страховые регламенты
Регламентация условий проведения испытаний	Частичная, фрагментарная	Высокая степень детализации	Высокая степень детализации	Высокая степень детализации
Контроль испытательной площадки	Не систематизирован	Обязательный элемент контроля	Обязательный элемент допуска работ	Интегрирован в систему безопасности
Требования к основанию	Частично отражены	Обязательны	Обязательны	Обязательны
Контроль распределения нагрузок	Не унифицирован	Стандарт	Обязателен	Обязателен
Документир. условий	Ограничено	Обязательно	Обязательно	Обязательно
Роль инженерной среды	Вторичная (де-факто значимая)	Первичная	Первичная	Первичная
Воспроизвод. результатов испытаний	Ограниченная	Высокая	Высокая	Высокая

Сопоставление показывает, что российская система промышленной безопасности сильна в части институционализации: она чётко выделяет ОПО, устанавливает обязательность ФНиП, закрепляет процедуру ЭПБ и формирует самостоятельную экспертную модель допуска технического устройства (ТУ) к дальнейшей эксплуатации [1-3], [10-11].

Именно в этом состоит её ключевое отличие от зарубежных систем, где преобладает логика периодического осмотра, эксплуатационного контроля и обеспечения безопасности труда без столь выраженного самостоятельного института ЭПБ.

В российской системе ЭПБ выполняет не только диагностическую, но и разрешительную функцию. Она выступает инструментом, определяющим возможность дальнейшей эксплуатации технического устройства, что придаёт ей статус ключевого элемента всей системы промышленной безопасности. Это формирует высокий уровень формализации процедур, наличие чётко регламентированных этапов обследования, испытаний и анализа, а также закрепляет ответственность экспертной организации за принимаемые решения.

Одновременно зарубежные модели выглядят более зрелыми в части контроля условий, в которых выполняются грузоподъёмные операции, как в процессе работы, так и испытаний. В рамках систем LOLER, OSHA и DGUV контроль распространяется не только на техническое состояние ПС, но и на параметры среды его эксплуатации. Площадка для установки крана в этих системах рассматривается как неотъемлемый элемент обеспечения безопасности, а требования к подготовке её основания, обеспечению горизонтальности установки, контроля распределения нагрузок через выносные опоры и сохранение устойчивости ТУ являются обязательными и подлежат документированию.

Действующая нормативно-правовая база РФ по ЭПБ содержит ряд требований к площадкам для установки ПС, однако они не систематизированы:

1. ФНП [2]: устанавливает общую норму об установке ПС на «подготовленной площадке» с учетом категории грунта и уклона, указанного в паспорте. Методики инструментальной проверки плотности грунта в ФНП не раскрыты.
2. Методические рекомендации [10,11]: содержат конкретные параметры: площадка должна быть горизонтальной, с твердым покрытием, уклоном не более ±0,5% и несущей способностью от 686 до 980 кПа в зависимости от грузоподъемности машины. Однако данные документы носят рекомендательный характер.
3. ГОСТ 34687-2020: регламентирует твердое покрытие площадки с отклонением в зоне установки крана не более 0,5%.

Требования к испытательному грузу. Испытательный груз является частью процесса грузовых испытаний. Может быть выполнен в виде монолитного блока или состоять из отдельных элементов, также допускается применения контейнеров, наполненных водой, песком или другим материалом с равномерной плотностью. При этом приводится методика измерения массы испытательного груза, а применение маркированного испытательного груза рассматривается как допуск! [4]. Тогда как масса испытательного груза не должна отличаться от расчетной более чем на 3%.

Обоснование необходимости специализированной площадки.

Специализированная площадка должна рассматриваться не просто как место установки самоходного стрелового крана или крана-манипулятора, а как техническое средство экспертной организации, обеспечивающее стабильность параметров основания.

Ключевые требования к специализированной площадке:

- известная несущая способность**:** наличие основания, исключающего нелинейные деформации в процессе цикла нагружения.
- инструментальный контроль: обязательное применение динамических плотномеров для верификации готовности основания перед каждым испытанием.
- стандартизация нагружения: использование тарированных грузов с погрешностью по массе не более 3% [4] или 1% [11].

Заключение и предложения.

Резюмируя проведенное исследование, необходимо констатировать, что текущее состояние нормативной базы РФ в области промышленной безопасности ПС характеризуется

«инфраструктурным разрывом» между жесткой регламентацией процедур ЭПБ и отсутствием требований к инженерной среде их проведения.

Трансформация испытательной площадки из пассивного места проведения работ в активное техническое средство экспертной организации является единственным вектором повышения достоверности ЭПБ. Реализация предложенных мер позволит:

1. Легитимизировать статус ОПО: обеспечить выполнение требований ФНП в части идентификации стационарных ПС через параметры подготовленной базы.
2. Объективизировать экспертную оценку: исключить влияние субъективных факторов и случайных характеристик грунта на расчет коэффициента грузовой устойчивости согласно ГОСТ 34687-2020.
3. Обеспечить доказательную ценность ЭПБ: сформировать верифицируемую базу данных для продления срока службы ТУ, соответствующую требованиям ФНП и интересам национальной безопасности на ОПО.

Предлагаемое внесение изменений в ФНП и переход к аттестации специализированных площадок создаст необходимый фундамент для цифровизации экспертной деятельности и перехода к предиктивным методам контроля технического состояния грузоподъемной техники в РФ.

Литература:

1. О промышленной безопасности опасных производственных объектов : Федеральный закон от 21.07.1997 № 116-ФЗ : [ред. от 08.08.2024]. – Текст : электронный // КонсультантПлюс : [сайт].
2. Об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности опасных производственных объектов, на которых используются подъемные сооружения» : Приказ Ростехнадзора от 26.11.2020 № 461 : [ред. от 22.01.2024]. – Текст : электронный // Официальный интернет-портал правовой информации.
3. Об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила проведения экспертизы промышленной безопасности» : Приказ Ростехнадзора от 20.10.2020 № 420 : [ред. от 20.02.2024]. – Текст : электронный // Официальный интернет-портал правовой информации.
4. ГОСТ 34687-2020. Краны грузоподъемные. Правила и методы испытаний : межгосударственный стандарт : введен в действие 01.07.2021. – Москва : Стандартинформ, 2020. – 30 с. – (ISO 4310:2009, NEQ)
5. Годовой отчет о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2024 году. – Москва : Ростехнадзор, 2025. – 415 с. (проектные данные).
6. Годовой отчет о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2020 году. – Москва : Ростехнадзор, 2021. – 372 с.
7. Годовой отчет о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2021 году. – Москва : Ростехнадзор, 2022. – 407 с.
8. Годовой отчет о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2022 году. – Москва : Ростехнадзор, 2023. – 380 с.
9. Годовой отчет о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2023 году. – Москва : Ростехнадзор, 2024. – 410 с.
10. РД 10-112-1-04. Рекомендации по экспертному обследованию грузоподъемных машин. Общие положения : [одобрены Федеральной службой по технологическому надзору 26.04.2004]. – Москва : НТЦ «Промышленная безопасность», 2004.
11. РД 10-112-2-09. Методические рекомендации по экспертному обследованию грузоподъемных машин. Часть 2. Краны стреловые общего назначения и краны-манипуляторы грузоподъемные : [утв. ООО «НИИкраностроения» 27.03.2009]. – Москва, 2009.

Specialized Site for Crane Load Testing as a Factor in Increasing the Reliability of Industrial Safety Expertise

Lonshakov V.A.[1,a], Shatilo D.S.[1,b], Kalugin A.V.[c,1]
[1]Transbaikal State University, 30 Aleksandro-Zavodskaya St., Chita, Russia.
[a]lonshakov_viktor@mail.ru, [b]dmitrrydchatilo@yandex.ru, [c]kav8007@mail.ru.

Keywords: lifting structures, industrial safety expertise, load testing, testing site, Rostekhnadzor, stability

The article examines the challenges of ensuring the reliability of industrial safety expertise (ISE) results for mobile jib cranes and loader cranes. Based on an analysis of Rostekhnadzor's activities, a direct correlation between violations of lifting structures (LS) installation conditions and the accident rate has been identified. A comparative analysis of domestic requirements for LS diagnostics and international standards has been performed. A regulatory gap in the regimentation of testing site parameters has been revealed. The necessity of forming specialized engineering sites as a mandatory element of the technical base of expert organizations to increase the accuracy of assessing residual life and LS stability is justified.

УДК 621.873, 614.8**.**

Определение соответствия параметров крана-манипулятора требованиям Ростехнадзора в процессе экспертизы промышленной безопасности

Перминов А.В.[1,a], Масленников В.Г.[1,b], Калугин А.В.[1,c].
[1]Забайкальский государственный университет, ул. Александро-Заводская, 30, г. Чита, Россия
[a]perminov.1996@internet.ru, [b]maslennikov.vasiliy@yandex.ru, [c]kav8007@mail.ru

Ключевые слова: транспортное средство, крано-манипуляторная установка, кран-манипулятор, расчет нагрузок, устойчивость, программное обеспечение.

В статье рассматривается вопрос оценки правильности монтажа крано-манипуляторной установки (КМУ) на автомобильное шасси. Проведен анализ действующей нормативно-правовой базы, включая требования Федеральных норм и правил и технических регламентов Таможенного союза. Описан алгоритм расчетов распределения осевых нагрузок и устойчивости крана-манипулятора.

Введение.

Нормативной основой обеспечения безопасной эксплуатации выступает Федеральный закон № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов». Он определяет правовые, экономические и социальные основы обеспечения безопасной эксплуатации опасных производственных объектов (ОПО). В рамках данного закона КМУ рассматриваются как технические устройства (ТУ), применяемые на опасных производственных объектах, что обуславливает необходимость соблюдения требований промышленной безопасности, проведения экспертизы промышленной безопасности (ЭПБ) в установленных случаях, а также обеспечения производственного контроля со стороны эксплуатирующей организации [1].

Деятельность по разработке проектов на изготовление (монтаж), наладке, ремонту, реконструкции или модернизации подъемных сооружений (ПС), к которым относятся и краны-манипуляторы (КМ), осуществляется специализированными организациями [2]. Однако, существуют моменты, когда эксплуатация КМ осуществляется без полного набора документации. Установленный пакет эксплуатационных документов может отсутствовать либо иметься не в полном объеме.

Пакет эксплуатационной документации КМ представляет собой совокупность обязательных документов, обеспечивающих идентификацию, безопасную эксплуатацию и прослеживаемость технического состояния подъёмного сооружения (ПС). Его состав определяется требованиями технического регламента ТР ТС 010/2011 [3], стандартов ЕСКД [4] и федеральных норм и правил в области промышленной безопасности (ФНП) [2]. Отсутствие или неполнота эксплуатационной документации является критическим фактором, ограничивающим или исключающим возможность допуска КМ к эксплуатации без проведения экспертизы промышленной безопасности (ЭПБ).

Автоматизация экспертной деятельности является необходимым условием повышения объективности оценки состояния ТУ. В данной работе рассматриваются предпосылки для разработки программного обеспечения с целью установления соответствия объекта – «кран-манипулятор» требованиям Ростехнадзора.

Основная часть.

Эксплуатация КМУ, установленных на шасси грузовых автомобилей, относится к числу комплексно регулируемых видов деятельности, находящихся на стыке промышленной, транспортной и технической безопасности. Это обусловлено двойственной природой КМ: с одной стороны, он является ПС, подпадающим под требования промышленной безопасности, с другой – частью колесного транспортного средства (ТС), эксплуатация которого регулируется нормами транспортного законодательства. В связи с этим нормативное обеспечение эксплуатации КМ формируется совокупностью взаимосвязанных документов различного уровня.

Допуск к эксплуатации КМ при отсутствии сведений о его изготовлении осуществляется на основании заключения ЭПБ, проводимой в соответствии с требованиями нормативных документов Ростехнадзора. В рамках данной процедуры формируется новая доказательная база безопасности, включающая результаты обследования, расчетов и испытаний, что позволяет обосновать возможность дальнейшей эксплуатации оборудования при отсутствии исходной технической документации [1,2,5].

Краны-манипуляторы относятся к ТУ, применяемым на ОПО IV класса опасности – опасные производственные объекты низкой опасности и подлежат оценке соответствия [1].

Оценка соответствия обязательным требованиям, предъявляемым к КМ, как к ТУ, применяемым на ОПО, и формы оценки их соответствия указанным требованиям устанавливаются техническими регламентами, т.к. именно эти правовые документы, согласно действующему российскому законодательству, имеют в своём составе комплекс требований к продукции и процессам производства, а также эксплуатации, транспортировке, хранению, реализации и утилизации. Использование подобных регламентов на территории Российской Федерации осуществляется в соответствии с законодательством о техническом регулировании [6].

Экспертиза промышленной безопасности представляет собой процедуру оценки соответствия ТУ требованиям промышленной безопасности, проводимую в случаях, установленных законодательством, прежде всего Федеральным законом № 116-ФЗ. В отличие от подтверждения соответствия по линии технического регулирования, регламентируемого Федеральным законом № 184-ФЗ и техническими регламентами, ЭПБ применяется преимущественно на стадии эксплуатации оборудования, а не на этапе его выпуска в обращение.

Экспертиза промышленной безопасности в отношении ПС, включая КМ, не является прямой «заменой» процедур, установленных [1,6], однако в ряде практических ситуаций она функционально компенсирует или восполняет отдельные элементы этих процедур.

В классической модели регулирования жизненного цикла ПС функции распределяются следующим образом: подтверждение соответствия (сертификация или декларирование) обеспечивает допуск оборудования на рынок, тогда как требования промышленной безопасности регулируют его дальнейшую эксплуатацию. Однако в реальной практике эксплуатации ПС возникают ситуации, при которых процедуры, предусмотренные системой технического регулирования, оказываются неполными или неприменимыми. Именно в этих случаях ЭПБ начинает выполнять компенсирующую функцию.

Таким образом, экспертиза промышленной безопасности выступает как механизм вторичной (эксплуатационной) оценки соответствия ПС, который в определенных условиях компенсирует процедуры, предусмотренные системой технического регулирования. Она не заменяет их формально, но фактически обеспечивает достижение той же цели – подтверждение безопасности оборудования – на основе анализа его реального технического состояния и условий эксплуатации.

Для оценки технического состояния КМ на транспортном средстве, установления соответствия конструктивного исполнения узлов, применяемых в процессе размещения КМУ на шасси, в части безопасности выполненного монтажа, необходимо установить, какие линейные и массовые параметры присущи каждой составляющей системы «кран-манипулятор» в отдельности, а затем выявить те, которые присущи КМ как единому объекту.

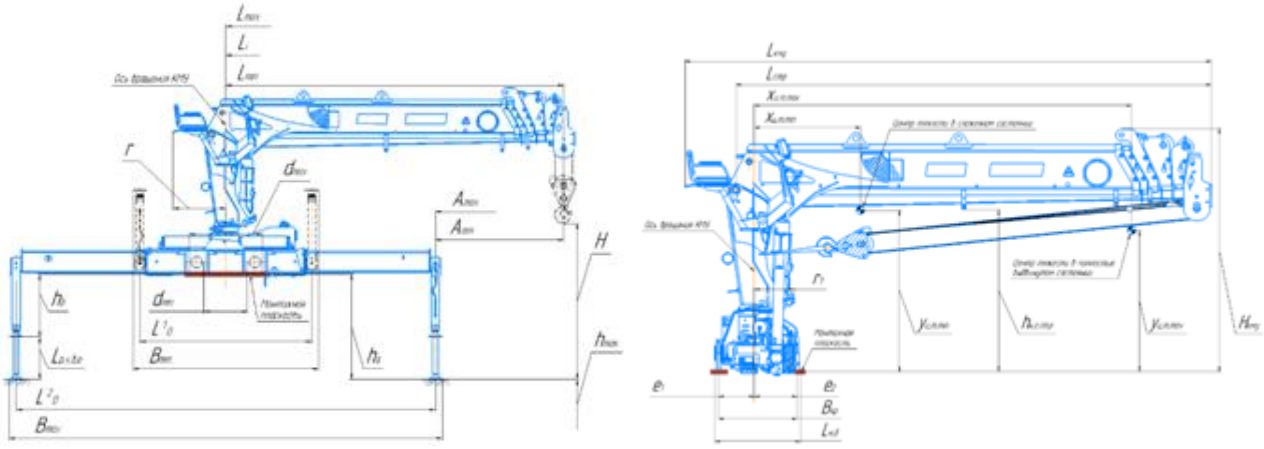
Методика расчета параметров состоит из следующих пунктов:

1. определение в качестве исходных данных в соответствии с установленной терминологией линейных и массовых характеристик КМУ и шасси ТС;
2. определение центра тяжести (ЦТ) каждого объекта (КМУ, шасси ТС) при отсутствии данных от заводов-изготовителей;
3. выполнение предварительного компоновочного решения надрамника на шасси ТС с целью определения допустимой длины заднего свеса;
4. определение массогабаритных размеров надрамника (внесение данных по профилям основных элементов металлоконструкции надрамника);
5. предварительное компоновочное решение КМ;
6. выполнение расчета распределения нагрузок по осям шасси ТС от массы КМУ;
7. определение величины остаточной грузоподъемности шасси ТС при смонтированной КМУ;
8. определение устойчивости КМ при выполнении грузоподъемных работ.

Для формирования общего представления об алгоритме расчётной модели необходимо кратко рассмотреть каждый пункт описанной методики расчета в отдельности.

1. Определение в соответствии с установленной терминологией линейных и массовых характеристик КМУ и шасси ТС.

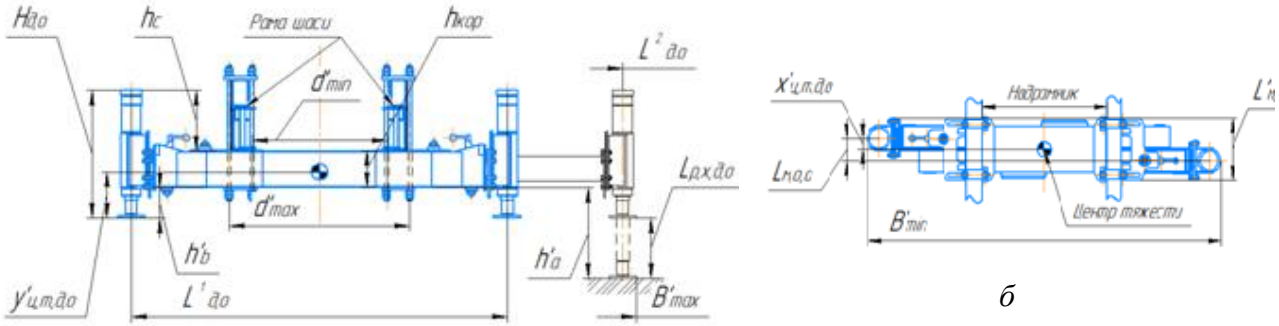
Для рассмотрения возможности размещения КМУ в составе КМ необходимо выявить данные заводов-изготовителей. При этом необходимо точно следовать терминологии, которая применяется для обозначения линейных размеров КМУ [7] и ТС [8]. Схема, на основании которой вносятся значения линейных размеров для рабочего положения КМУ, рис. 1а, для КМУ в сложенном состоянии, рис. 1б.



а *б*

Рис. 1. Общий вид КМУ, с обозначением линейных размеров:
а – рабочее положение; б – транспортное положение

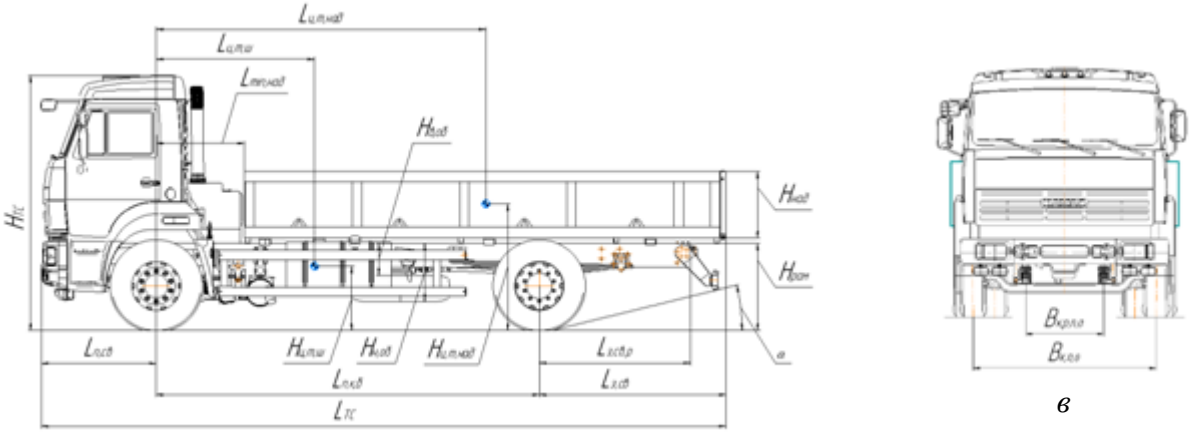
В случае, когда КМ для обеспечения устойчивости оборудован дополнительными (задними) выносными опорами расчет дополняется данными согласно схемам, рис. 2.



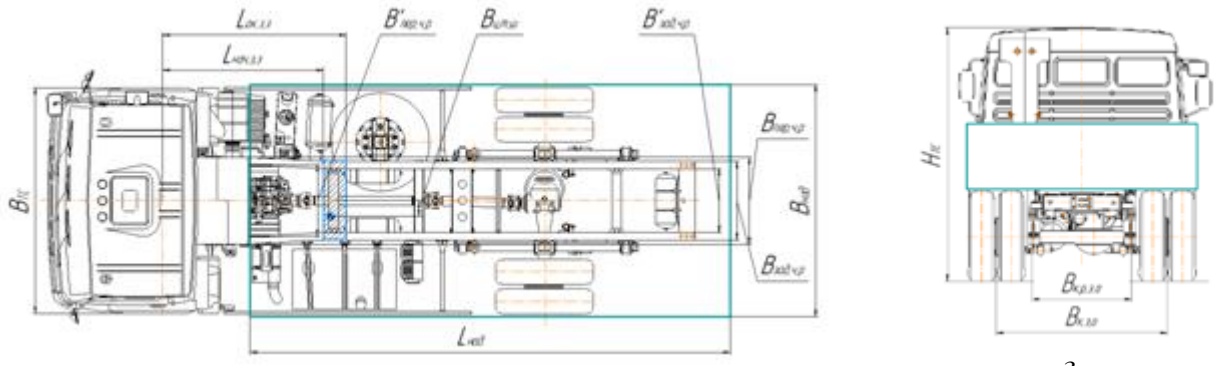
а *б*

Рис. 2. Общий вид дополнительных выносных опор, с обозначением линейных размеров:
а – вид спереди; *б* – вид сзади.

Далее выявляются значения линейных размеров для ТС, рис. 3.



а *в*



б *г*

Рис. 3. Общий вид ТС, с обозначением линейных размеров
а – вид сбоку; *б* – вид сверху; *в* – вид спереди; *г* – вид сзади

2. Определение центра тяжести (ЦТ) каждого объекта (КМУ, шасси ТС) при отсутствии данных от заводов-изготовителей.

В большинстве случаев заводами-изготовителями КМУ на схемах в эксплуатационной документации указывается месторасположение ЦТ, т.к. вариантов исполнения КМУ в одном модельном ряду не так много. В случае с шасси ТС ситуация несколько иначе, т.к. вариантов комплектования шасси элементами (мосты, кабины, топливные баки, аккумуляторные ящики и т.п.) существует во множественном числе. При отсутствии сведений о месторасположении ЦТ шасси ТС необходимо определять дополнительные линейные размеры расположения ЦТ каждого элемента, исходя из заводских чертежей, рис. 4.

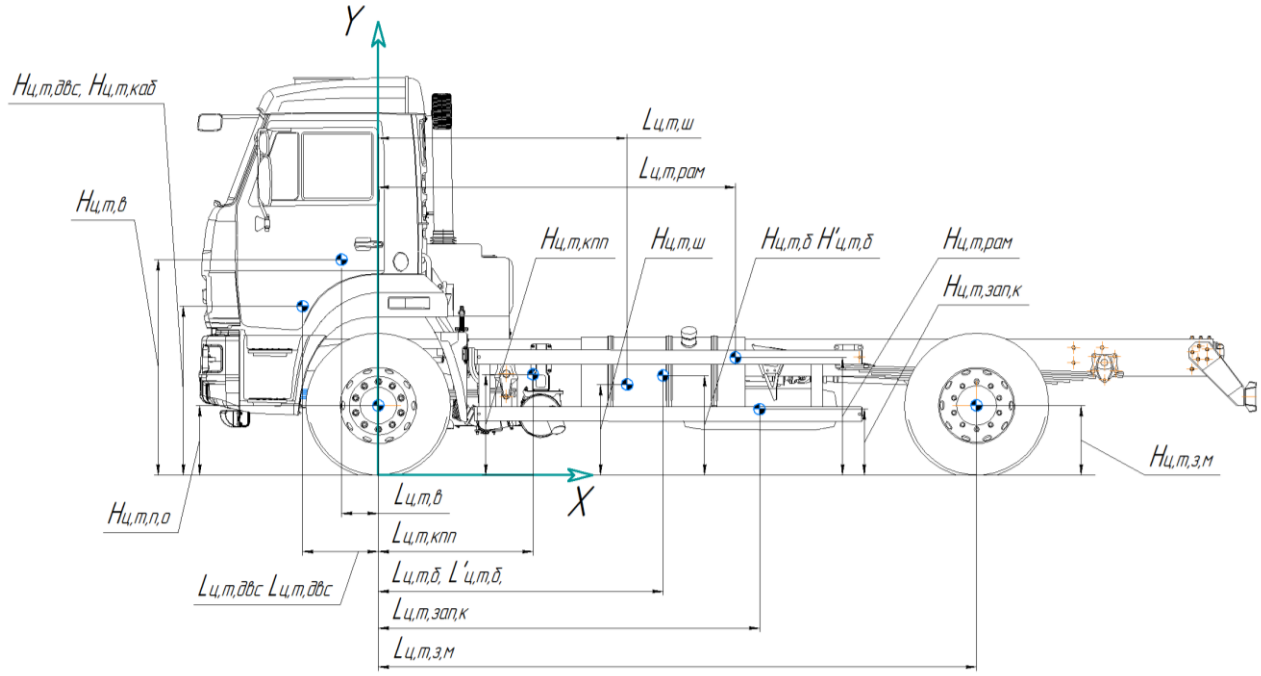


Рис. 4. Схема шасси ТС, с обозначением линейных размеров, для определения ЦТ

3. Выполнение предварительного компоновочного решения надрамника на шасси ТС с целью определения допустимой длины заднего свеса.

Для снижения напряжений в раме шасси и уменьшения колебаний рамы, которые отрицательно сказываются на комфорте, очень важно, чтобы передний конец надрамника располагался как можно ближе к переднему мосту автомобиля. На автомобилях с передней

рессорной подвеской передний конец надрамника должен располагаться не далее центра кронштейна крепления заднего конца передней рессоры.

Длина свеса в любом случае должна устанавливаться с учетом допустимых нагрузок на задний мост (заднюю тележку, при трехосном варианте шасси ТС) и при минимальной нагрузке на передний мост. Общая длина надрамника принимается с учетом соблюдения максимальной длины заднего свеса.

Для этого осуществляется предварительное размещение надрамника на шасси ТС, с учетом минимально допустимого расстояния от передней части надрамника до центра кронштейна крепления заднего конца передней рессоры шасси, рис. 5. При монтаже КМУ на шасси непосредственно за кабиной необходимо обеспечить возможность подъема кабины ТС при бескапотной компоновке, а также обеспечить расстояние от задней точки опоры неповоротной рамы КМУ до бортовой платформы. Поэтому необходимо учесть смещение бортовой платформы, или уменьшение ее длины.

При смещении бортовой платформы изменится и длина заднего свеса, изначально установленная заводом-изготовителем для данного ТС, в соответствии с установленными требованиями [9]. На практике возможно применение иных значений длины заднего свеса, как допустимые и предельные уровни при расчетном обосновании устойчивости и безопасности транспортного средства, в том числе при внесении изменений в его конструкцию. Их применение возможно исключительно при условии подтверждения соответствия требованиям безопасности, включая оценку распределения нагрузок по осям и устойчивости транспортного средства [10].

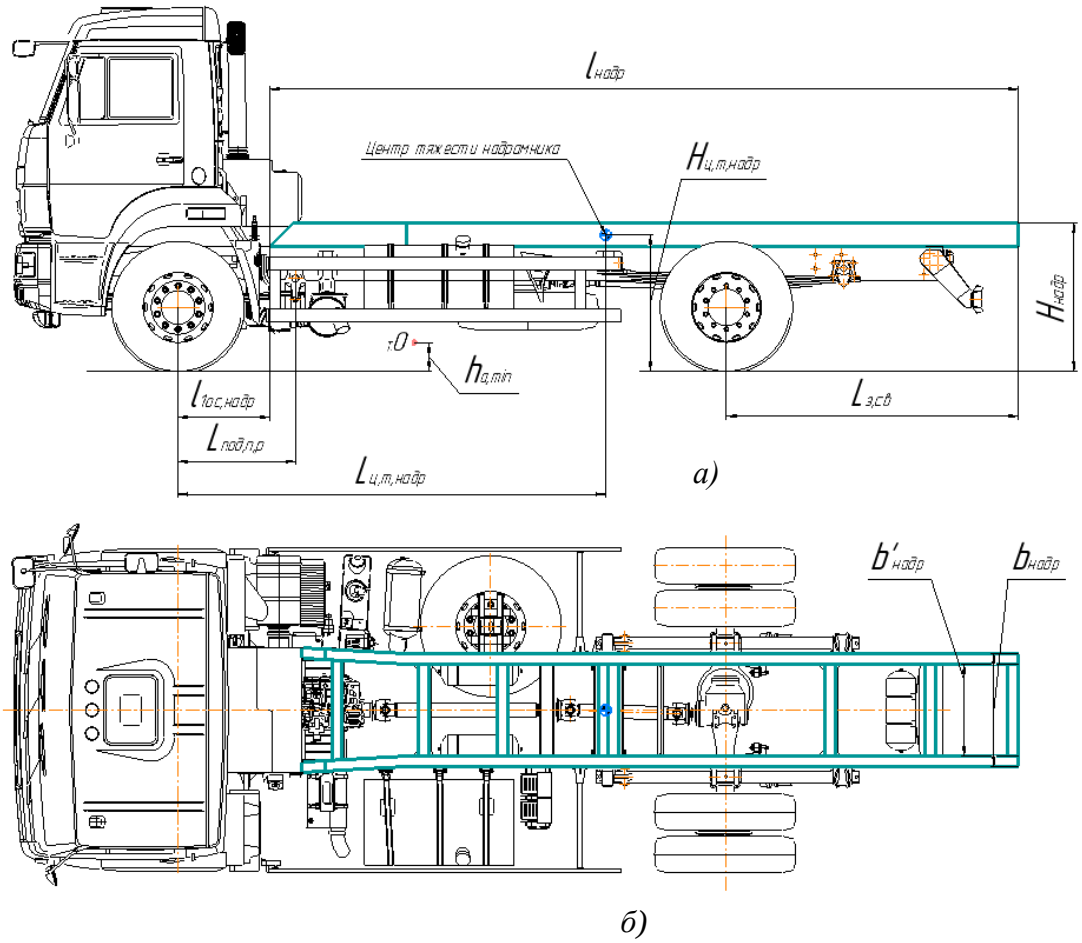


Рис. 5. Компоновочное решение размещения надрамника на шасси ТС
а – вид сбоку; *б* – вид сверху

4. Определение массогабаритных размеров надрамника (внесение данных по профилям основных элементов металлоконструкции надрамника).

Для надежного присоединения КМУ к шасси ТС должен быть предусмотрен надрамник. Данный тип ПС относится к категории надстроек с высоким расположением ЦТ и сильной точечной нагрузкой, поэтому необходимо применение конструкции надрамника сплошной длины [10].

Структура надрамника включает два основных лонжерона и несколько поперечин. При отсутствии специальных технологических предписаний изготовителей по изготовлению надрамников для определенных типов кузовов и надстроек, поперечины надрамника должны быть расположены над поперечинами рамы шасси.

На основании конструктивного устройства шасси ТС по данным завода-изготовителя определяются размеры сечения рамы шасси, рис. 6.

Лонжерон надрамника должен быть ровным, соответствовать конфигурации рамы, ширина полки лонжерона принимается равной ширине полки рамы. Толщина профиля основного лонжерона надрамника принимается не меньше толщины профиля рамы шасси ТС [11].

Профиль для поперечин принимается на один типоразмер меньше профиля основного лонжерона надрамника. Это условие необходимо для обеспечения внутреннего захода профиля поперечины в профиль лонжерона надрамника. Геометрические размеры сечения профиля поперечин указаны на рис. 6.

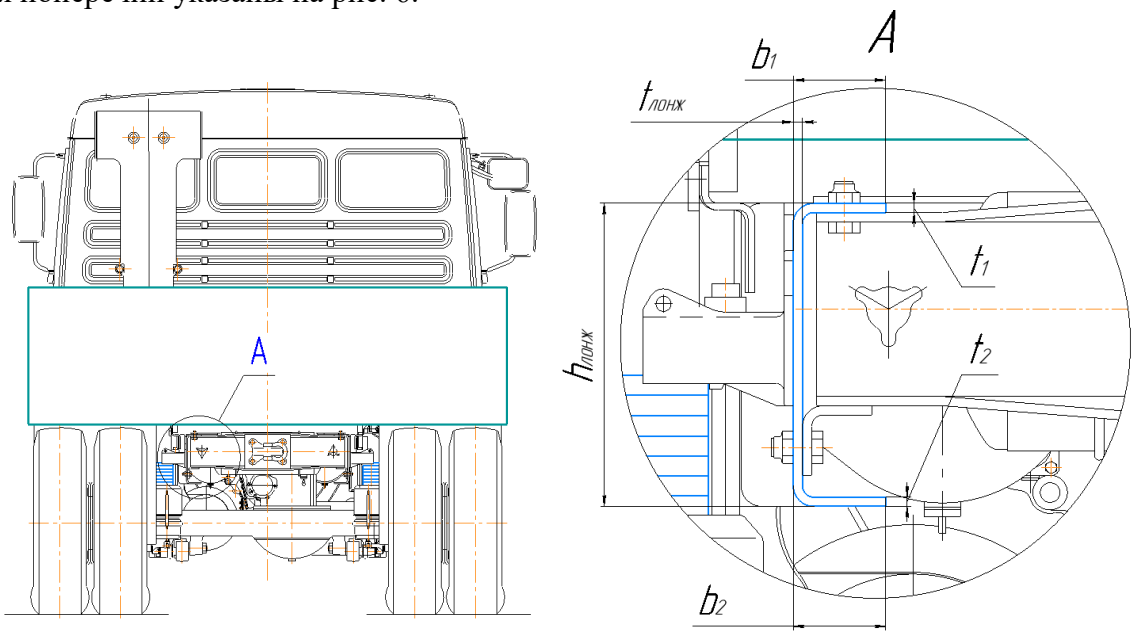


Рис. 6. Вид сечения рамы шасси ТС

Далее строится пространственная конструкция надрамника для определения общей длины и расстояний до каждой поперечины. Данная схема, рис. 7, необходима для определения положения ЦТ надрамника.

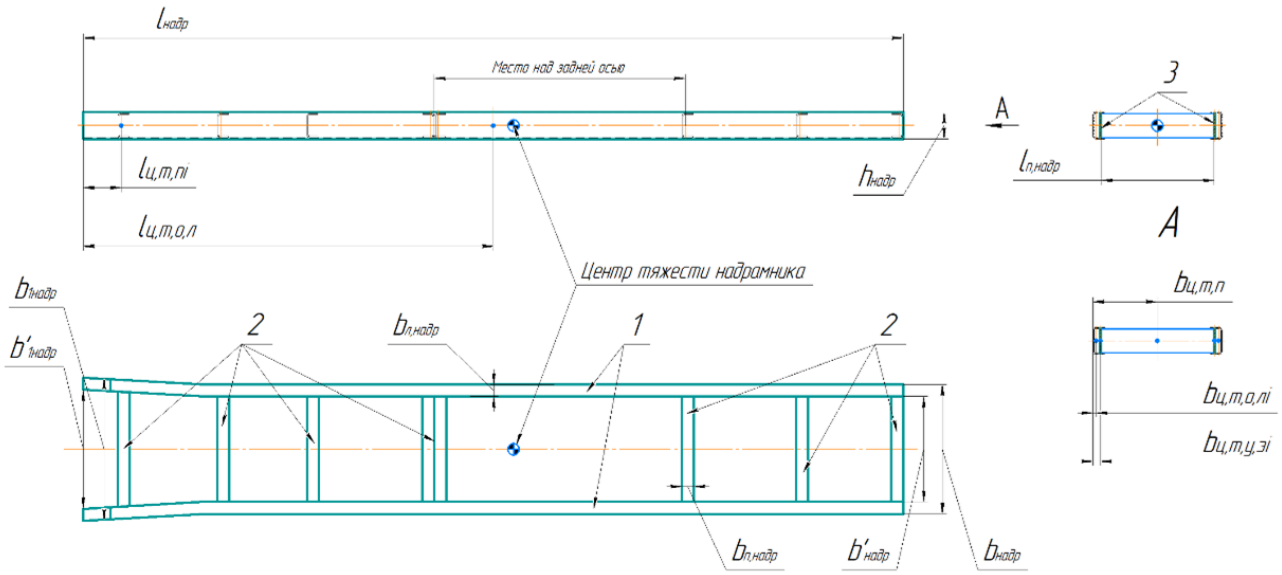


Рис. 7. Общий вид надрамника:
а – вид сбоку; *б* – вид сверху; *в* – вид сзади

3. Определение массогабаритных размеров надрамника (вносятся данные по профилям основных элементов металлоконструкции надрамника).

Для достижения небольшой конструктивной высоты расположения опорной поверхности на монтажной базе (шасси ТС [12]) с одновременным обеспечением момента сопротивления и предела жесткости на кручение U-образный профиль лонжеронов надрамника при соединениях с силовым замыканием может быть, рис. 8:

– закрытым в виде короба;

– вставленным один в другой;

– вставленным внахлест.

Далее необходимо выбрать форму сечения надрамника по одной из приведенных схем, рис. 8, на основании данных, предоставленных владельцем КМ. Для обеспечения требуемой надежности системы «шасси-КМУ» допускается применение исключительно гнутых U-образных профилей (швеллеров). Данный выбор обоснован тем, что гнутые профили лучше отвечают требованиям по скручиваемости в условиях динамических нагрузок, тогда как применение катаных профилей для надрамников КМ не допускается [10].

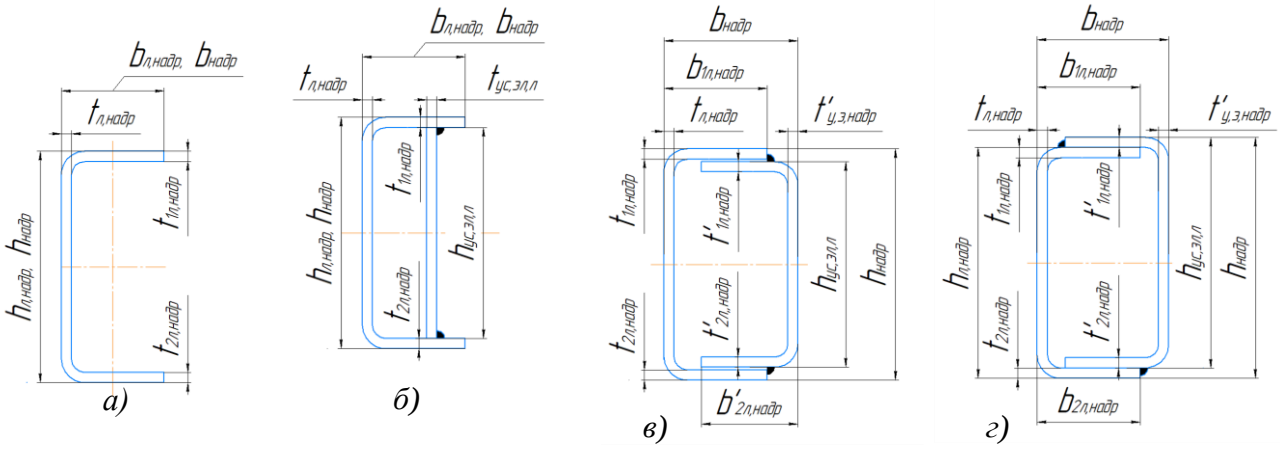


Рис. 8. Виды сечений надрамника
а – открытый швеллер; *б* – закрытый швеллер (в виде короба); *в* – швеллер с внутренним швеллером; *г* – швеллер вставленный внахлест

5. Предварительное компоновочное решение КМ.

После расчета массогабаритных размеров надрамника осуществляется переход к предварительной компоновке объектов на шасси ТС, к которым относятся: надрамник, КМУ, бортовая платформа, дополнительные задние выносные опоры (при наличии), рис. 9.

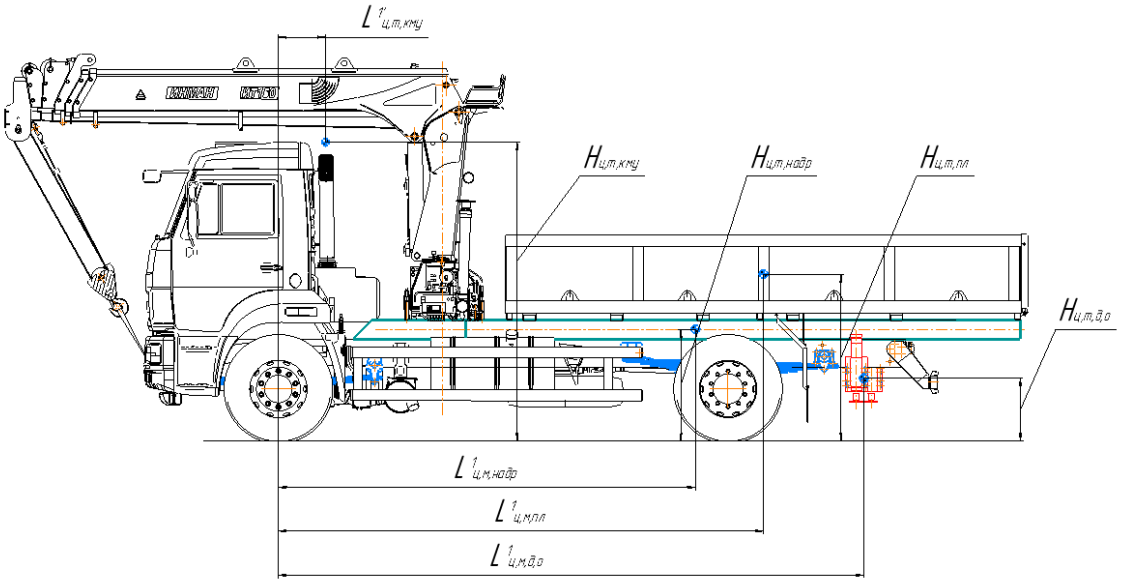


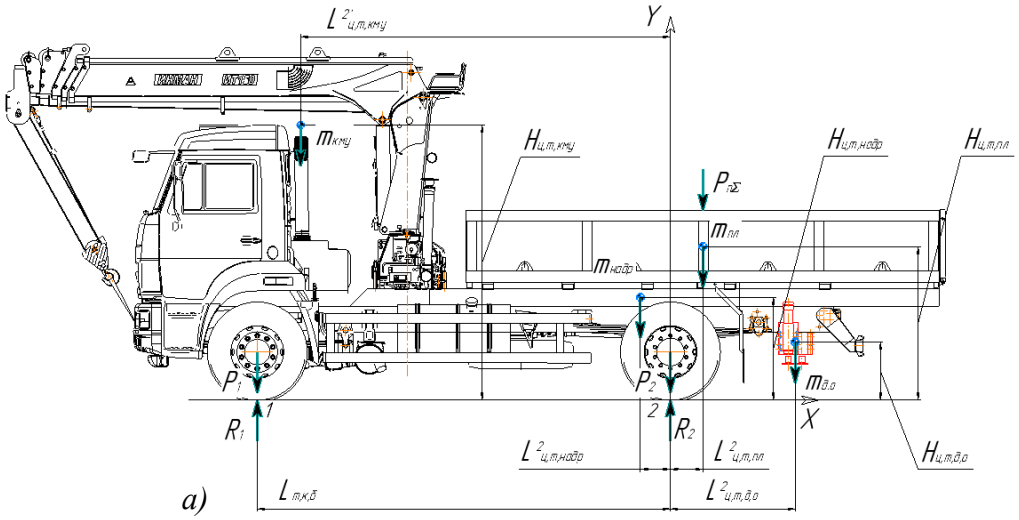
Рис. 9. Схема компоновки КМ

6. Выполнение расчета распределения нагрузок по осям шасси ТС от массы КМУ.

Выполнение расчета распределения нагрузок по осям шасси ТС от массы КМУ осуществляется для проверки соблюдения весовых ограничений. Осевые нагрузки в транспортном положении не должны превышать технически допустимых значений, заложенных изготовителем шасси и регламентированных Приложением № 5 [9].

Для правильного конструктивного расположения КМУ на транспортное средство необходимо выполнить расчеты осевых нагрузок. Транспортное средство с бортовой платформой и установленным КМУ должно использоваться без превышения максимальной нагрузки по осям, оговоренной производителем и соответствовать требованиям национальных стандартов.

Расчет нагрузок на оси КМ, осуществляется для двух положений стрелы КМУ. В первом случае расчет выполняется согласно схемам, рис. 10: для транспортного положения КМ при нахождении стрелы над кабиной: для передней оси, рис. 10а, для задней оси, рис. 10б.



а)

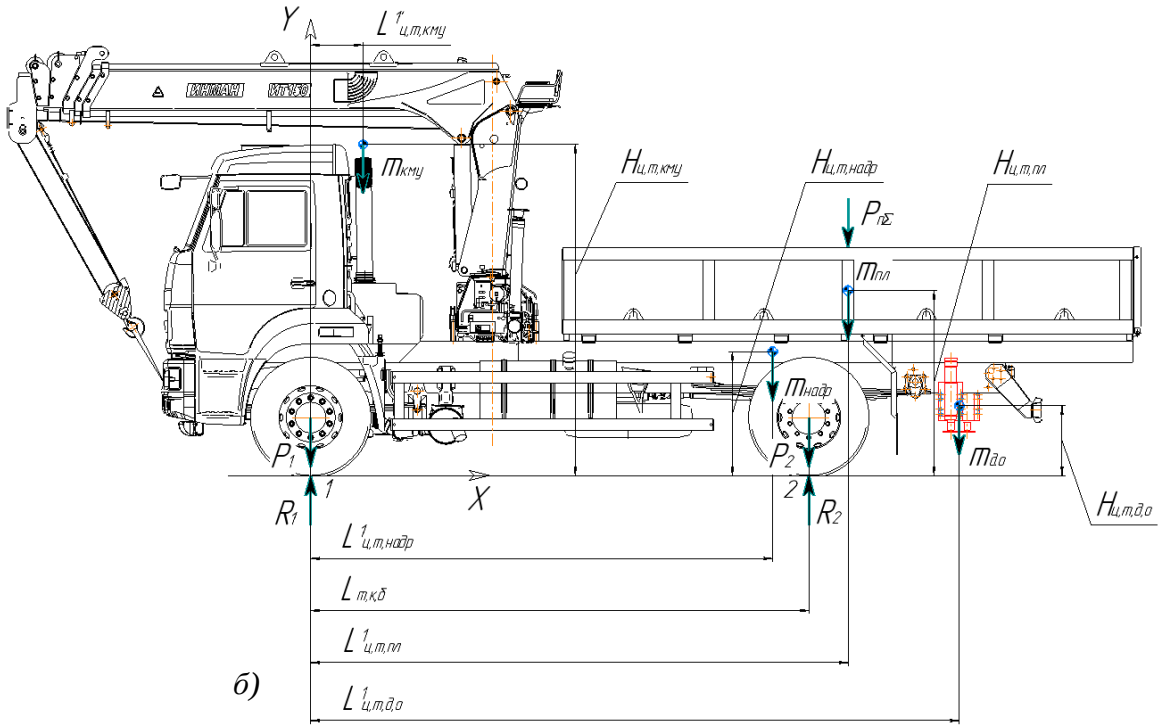
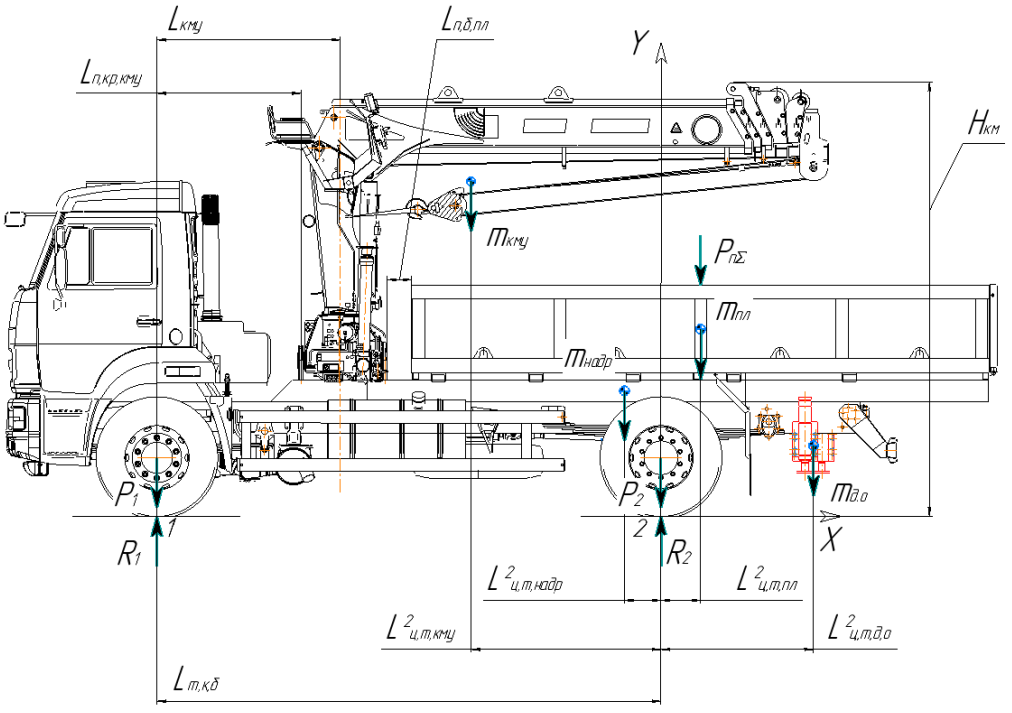
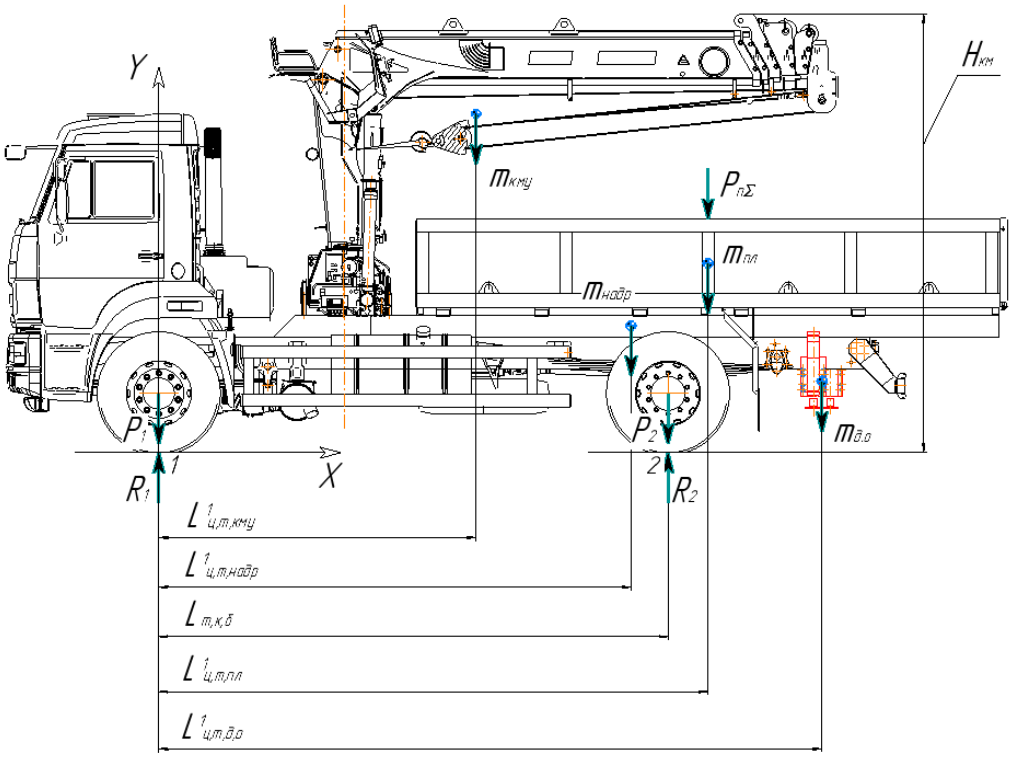


Рис. 10. Расчетная схема для определения нагрузки на оси шасси ТС, когда стрела КМ вперед
а – для расчета нагрузки на переднюю ось; *б* – для расчета нагрузки на заднюю ось

Во-втором случае аналогичным образом выполняется расчет нагрузок на оси, для транспортного положения КМ при расположении стрелы КМУ над бортовой платформой ТС, см. рис. 11: для передней оси, рис. 11а, для задней оси, рис. 11б.



а)



б)

Рис. 11. Расчетная схема для определения нагрузки на оси шасси ТС, когда стрела КМ вперед
а – для расчета нагрузки на переднюю ось; *б* – для расчета нагрузки на заднюю ось

7. Определение величины остаточной грузоподъемности шасси ТС при смонтированной КМУ.

Груз, предполагаемый для перевозки в бортовой платформе, должен располагаться таким образом, чтобы осевая нагрузка на дорогу не превышала допустимую. При расчетах, как правило, предполагают, что груз равномерно распределен по длине бортовой платформы, то есть ЦТ груза располагается по центру бортовой платформы.

Для выполнения расчета необходимо знать массу каждого элемента КМ (шасси, КМУ, надрамник и т.п.) и координату (расстояние) от ЦТ каждого из элементов до теоретической середины переднего моста. В дальнейших расчетах координату ЦТ части, которая расположена от передней оси в сторону заднего моста (тележки), необходимо брать с положительным знаком, которая расположена в обратную сторону - с отрицательным знаком.

На первом этапе расчетов необходимо определить распределение массы частей КМУ по теоретическим центрам передней оси и заднего моста.

На втором этапе необходимо найти суммарную нагрузку от шасси (автомобиля) и узлов КМУ для передней оси и заднего моста. Полученные значения нагрузок по осям должны быть меньше, чем допустимые нагрузки, разрешенные производителем шасси (автомобиля), и должны удовлетворять требованиям национальных стандартов.

При определении максимально допустимой массы перевозимого груза необходимо учитывать соблюдение условия управляемости ТС с установленной КМУ. Для обеспечения устойчивости и управляемости ТС необходимо наличие достаточной вертикальной нагрузки на управляемой оси.

Нагрузка, приходящаяся на ведущую или ведущие оси ТС, загруженного до технически допустимой максимальной массы, не должна превышать технически допустимую максимальную нагрузку на эту ось (эти оси).

В случае полной загрузки ТС, когда оно нагружено до технически допустимой максимальной массы, при технически допустимой максимальной нагрузке на его заднюю ось (группу осей), масса, приходящаяся на управляемую ось или оси, должна быть не менее 20% от технически допустимой максимальной массы этого ТС [9].

Скорректированная грузоподъемность шасси должна быть в обязательном порядке внесена в эксплуатационную документацию ПС (паспорт и руководство по эксплуатации), что является критически важным для последующей регистрации объекта в органах Ростехнадзора [2,12].

8. Определение устойчивости КМ при выполнении грузоподъемных работ.

Достаточно высокая сложность и вариативность исходных данных предопределяет автоматизацию расчёта путём разработки соответствующего программного обеспечения. Разрабатываемый программный продукт позволит усилить методику выполнения ЭПБ на каждом из этапов её проведения: на подготовительном этапе – сформировать модель с геометрическими параметрами, которыми должен обладать КМ; на рабочем этапе, на основе выполненных замеров КМ, в процессе ЭПБ, выполнить сравнение с ранее полученной моделью; на заключительном этапе – повысить точность выводов в заключении ЭПБ.

На данном этапе будет реализован поверочный расчет коэффициента грузовой устойчивости КМ при выполнении работ, в соответствии с грузовой характеристикой КМУ, в секторе исключающем нахождение стрелы над кабиной. Полученное значение не должно быть меньше 1,15 при учете всех дополнительных нагрузок, действующих на КМ и уклона поверхности установки, и не менее 1,4 без учета нагрузок и уклона [13].

Вывод.

Использование разрабатываемого ПО позволит эксперту оперативно выявлять несоответствия в монтаже КМУ, повышая точность выводов в заключениях ЭПБ. Программный продукт обеспечит проверку соблюдения требований ФНП, необходимых технических регламентов, что критически важно для обеспечения безопасной эксплуатации кранов-манипуляторов на ОПО.

Литература:

1. О промышленной безопасности опасных производственных объектов : Федеральный закон от 21.07.1997 № 116-ФЗ (в редакции от 08.08.2024). – Текст : электронный // КонсультантПлюс : [сайт]. – URL: http://www.consultant.ru (дата обращения: 03.09.2024).

2. Об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности опасных производственных объектов, на которых используются подъемные сооружения» : Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 26.11.2020 № 461 (в редакции от 22.01.2024). – Текст : электронный.

3. О безопасности машин и оборудования (ТР ТС 010/2011) : технический регламент Таможенного союза : утвержден Решением Комиссии Таможенного союза от 18.10.2011 № 823. – Текст : электронный

4. ГОСТ 2.601–2019. Единая система конструкторской документации. Эксплуатационные документы. – Москва : Стандартинформ, 2019. – Текст : непосредственный

5. Об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила проведения экспертизы промышленной безопасности» : Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 20.10.2020 № 420. – Текст : электронный.

6. О техническом регулировании : Федеральный закон от 27.12.2002 № 184-ФЗ (в редакции от 25.12.2023). – Текст : электронный.

7. ГОСТ 33709.1-2015. Краны грузоподъемные. Словарь. Часть 1. Общие положения. – Москва : Стандартинформ, 2016. – Текст : непосредственный.

8. ГОСТ Р 52851-2007. Автомобили грузовые. Обмен данными между изготовителями шасси и кузовов (BEP). Часть 2. Параметры обмена размерами кузова. – Москва : Стандартинформ, 2008. – Текст : непосредственный

9. О безопасности колесных транспортных средств (ТР ТС 018/2011) : технический регламент Таможенного союза : утвержден Решением Комиссии Таможенного союза от 09.12.2011 № 877. – Текст : электронный.

10. Руководство по монтажу надстроек на автомобили (шасси) КамАЗ. – Текст : непосредственный.

11. ГОСТ 8278-83. Швеллеры стальные гнутые равнополочные. Сортамент. – Москва : Издательство стандартов, 1983. – Текст : непосредственный.

12. ГОСТ 33167-2014. Краны погрузочные гидравлические. Требования безопасности. – Москва : Стандартинформ, 2015. – Текст : непосредственный.

13. Кашина, С. Г. Обеспечение безопасности строительно-монтажных работ. Устойчивость грузоподъемных кранов : методические указания к практическим занятиям / С. Г. Кашина, Д. К. Шарафутдинов. – Казань : Изд-во Казанского государственного архитектурно-строительного университета, 2012. – 39 с. – Текст : непосредственный.

Using software to determine whether the parameters of a crane-manipulator meet the requirements of Rostekhnadzor during an industrial safety examination

Perminov A.V.[1,a], Maslennikov V.G.[1,b], Kalugin A.V.[1,c].
[1]Transbaikal State University, 30 Aleksandro-Zavodskaya St., Chita, Russia
[2] Chita, Russia
[a]perminov.1996@internet.ru, [b]maslennikov.vasiliy@yandex.ru, [c]kav8007@mail.ru

Keywords: vehicle, crane-manipulator unit (CMU), loader crane, load calculation, stability, software.

The article addresses the development of a software package designed to evaluate the mounting accuracy of a crane-manipulator unit (CMU) on a vehicle chassis. An analysis of the current regulatory framework is presented, including the requirements of Federal Norms and Rules (FNP) and Technical Regulations of the Customs Union. The paper describes a software algorithm that automates calculations for axial load distribution and loader crane stability.

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 62-336

Моделирование затвора клапана, содержащего тонкостенное уплотнение, нагруженное усилием привода и давлением рабочей среды

Белоголов Ю.И.[1,a]
[1]Иркутский государственный университет путей сообщения, ул. Чернышевского 15, г. Иркутск, Россия
[a] belogolov_yi@irgups.ru

Ключевые слова: трубопроводная арматура, оболочка, «седло», «золотник», давление рабочей среды, АРМ WinMachine.

В научной статье рассматривается процесс нагружения тонкостенного уплотнения, жесткость которого снижается с целью минимизации динамического (ударного) воздействия в процессе перекрытия затвора клапана. После перекрытия затвора, на его элементы, в частности «седло», начинает действовать давление рабочей среды. Исследования показали, что распределенная нагрузка от давления рабочей оказывает серьезное воздействие на прочностные и эксплуатационные параметры работы соединения, в котором используются тонкостенные элементы. Одним из способов компенсировать воздействие давления рабочей среды является разгрузка соединения. Основным элементом затвора, который подлежит полной (частично) разгрузке является как правило золотник клапана. На основе результатов моделирования в системе АРМ WinMachine, сделан вывод, что разгрузке от воздействия рабочей среды подлежат все элементы затвора. Предложена перспективная конструкция клапана с частичной разгрузкой «седла» от давления рабочей среды.

Введение.

В настоящее время, для управления потоком рабочей среды (жидкой, газообразной и др.) используется трубопроводная арматура (ТПА) [1]. К основным типам ТПА относятся клапаны, задвижки, дисковые затворы и краны. Для перекрытия потока рабочей среды используют запорную арматуру, которая обеспечивает степень герметичности в уплотнительном стыке затвора, достаточную для её применения в многоотраслевом комплексе, либо подходящую для определенных заказчиком условий эксплуатации. В запорной арматуре запирающий элемент перемещается перпендикулярно, параллельно, либо расположен под произвольным углом к потоку рабочей среды. В клапанных соединениях запирающий элемент перемещается вдоль потока рабочей (герметизируемой) среды.

На рис. 1 представлена принципиальная схема затвора клапана, в которой перекрытие потока рабочей среды достигается за счет перемещения запирающего элемента – «золотника» в направлении неподвижного элемента – «седла», сформированного в корпусе ТПА.

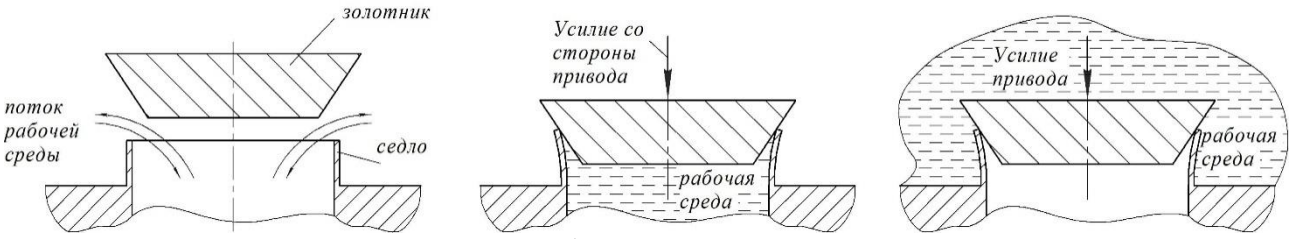


Рис. 1. Затвор клапана

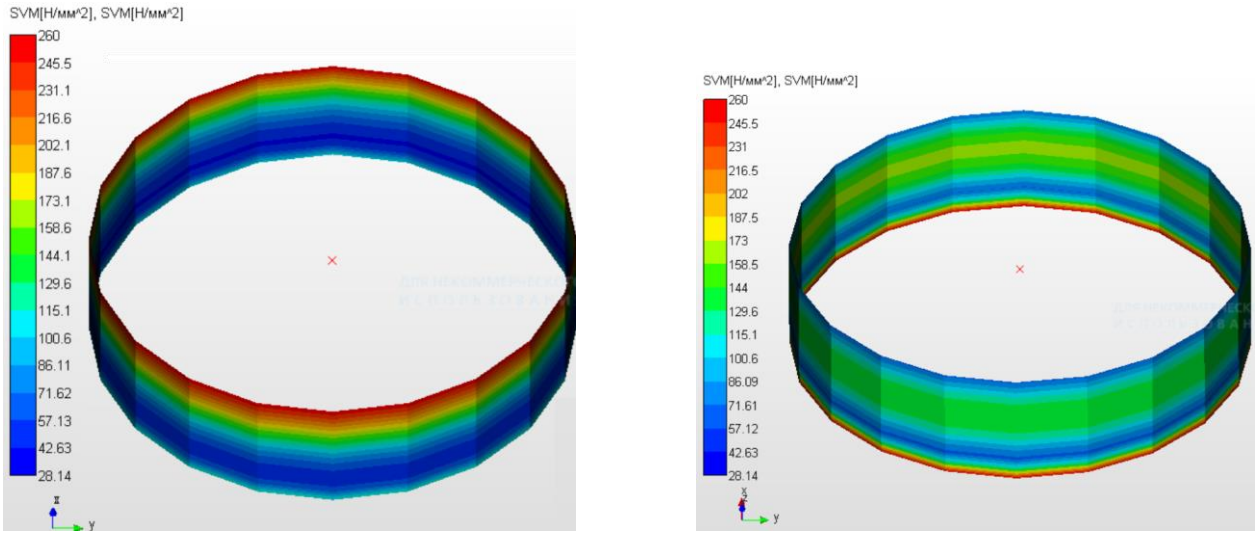
В рассматриваемой конструкции «золотник» имеет коническую форму, а «седло» выполнено в виде тонкостенной осесимметричной оболочки [2]. Поток рабочей среды может быть сонаправлен перемещению золотника при перекрытии клапана, либо иметь обратное направление, создавая дополнительное сопротивление приводу.

Область рабочих значений для тонкостенного «седла» достаточно узкая [3, 4]. Потеря прочностных свойств может наступить вследствие изменения давления рабочей среды или избыточного силового нагружения со стороны привода. В клапанных соединениях время перекрытия затвора, для определенных конструкций, например, отсечной ТПА (отсечной клапан), стараются минимизировать, что обусловлено технологическим процессом. Динамические нагрузки, которые возникают при опускании «золотника» на тонкостенное «седло», определяются графиком свободных затухающих колебаний [5] и зависят от массы, скорости и жесткости элементов затвора.

В научных работах [4, 6, 7] рассматривались пути совершенствования затвора клапана, содержащего тонкостенные элементы. Для компенсации воздействия рабочей среды на «золотник», выполняют его разгрузку. С целью снижения динамического (ударного) воздействия на «седло», снижают его приведенную жесткость.

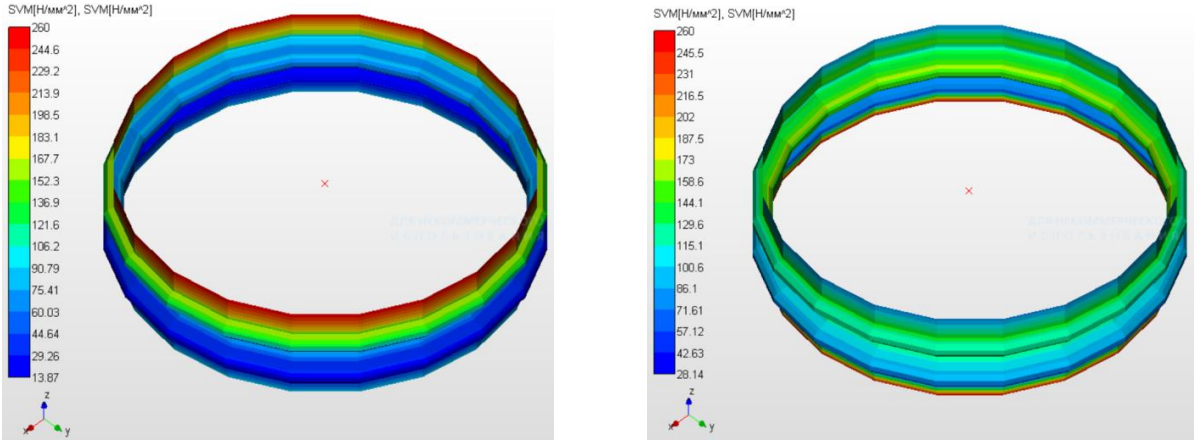
Согласно проведенным исследованиям [8] по моделированию процесса нагружения тонкостенного «седла» клапана в CAE-системе APM WinMachine v.20.0 [9], модуле кончено-элементного (КЭ) анализа Structure 3D, необходимо обеспечивать компенсацию давления рабочей среды в затворе уплотнительного соединения в целом.

На рис. 1-7. показаны карты эквивалентных напряжений, полученные при моделирование тонкостенного «седла», в том числе жесткость которого снижена конструктивно. Кроме того, рассмотрены перспективные конструкции тонкостенного «седла», которое имеет сильфонную поверхность.



а *б*

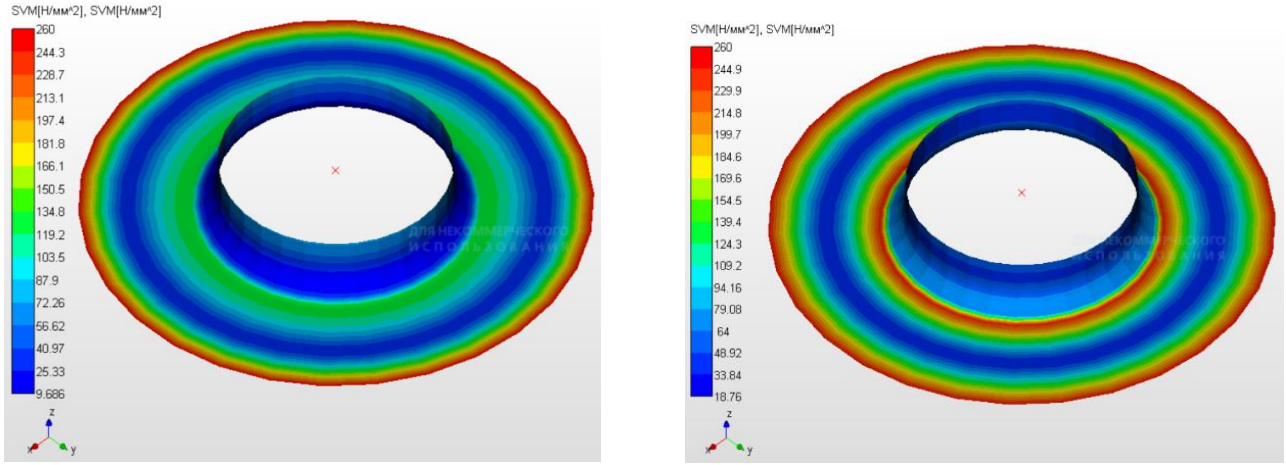
Рис. 1. Карат эквивалентных напряжений для осесимметричной оболочка
а – рабочая среда направлена под «золотник»*; б* – рабочая среда направлена на «золотник»



а *б*

Рис. 2. Сильфонная оболочка

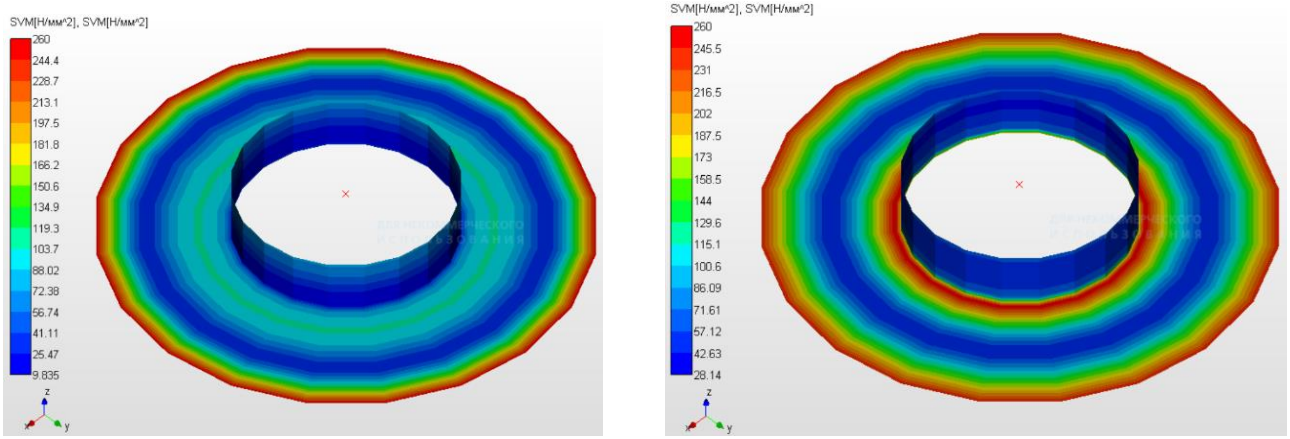
а – рабочая среда направлена под «золотник»; *б* – рабочая среда направлена на «золотник»



а *б*

Рис. 3. Карат эквивалентных напряжений для тороидальной оболочки на пластине

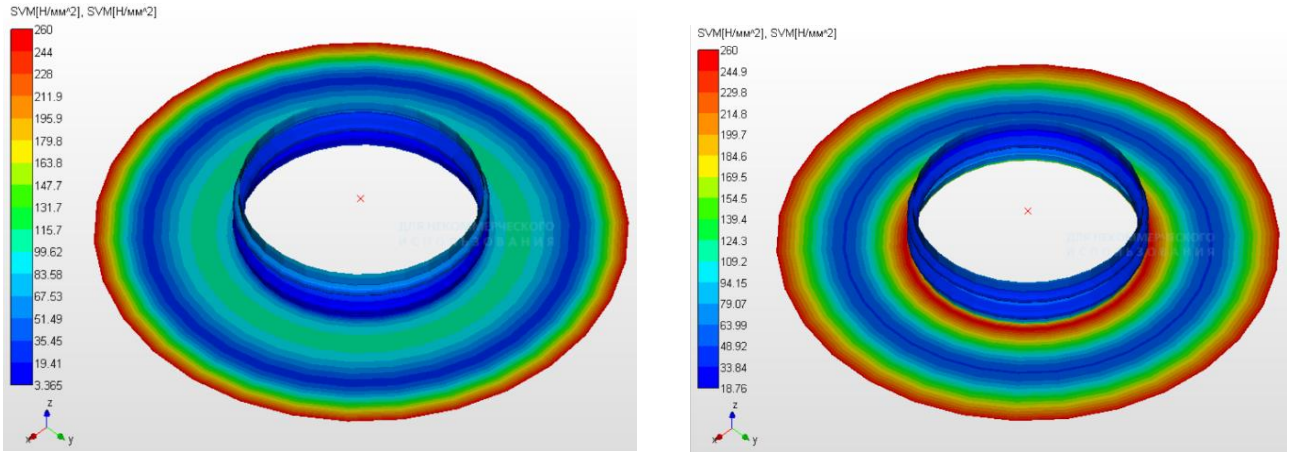
а – рабочая среда направлена под «золотник»; *б* – рабочая среда направлена на «золотник»



а *б*

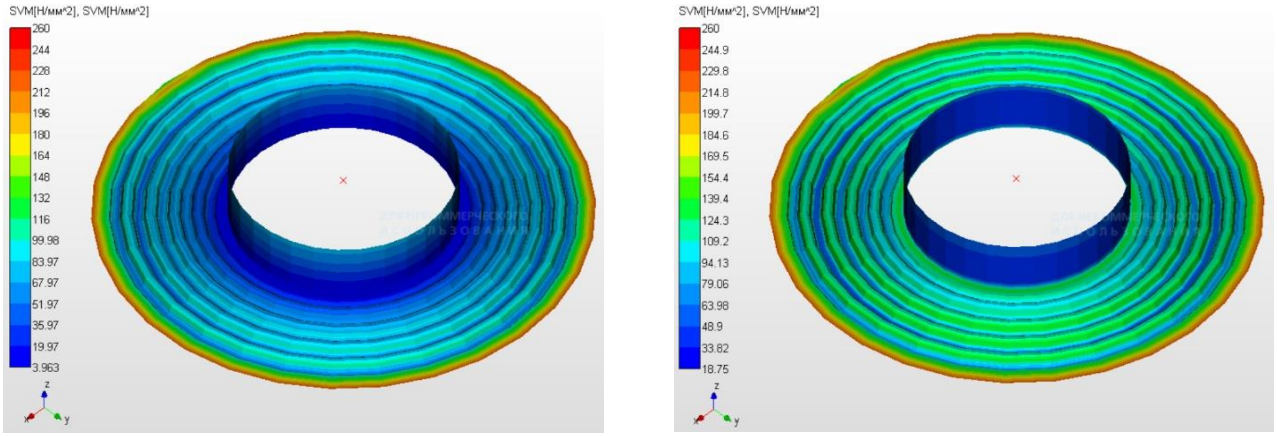
Рис. 4. Карат эквивалентных напряжений для оболочки на упругой пластине

а – рабочая среда направлена под «золотник»; *б* – рабочая среда направлена на «золотник»



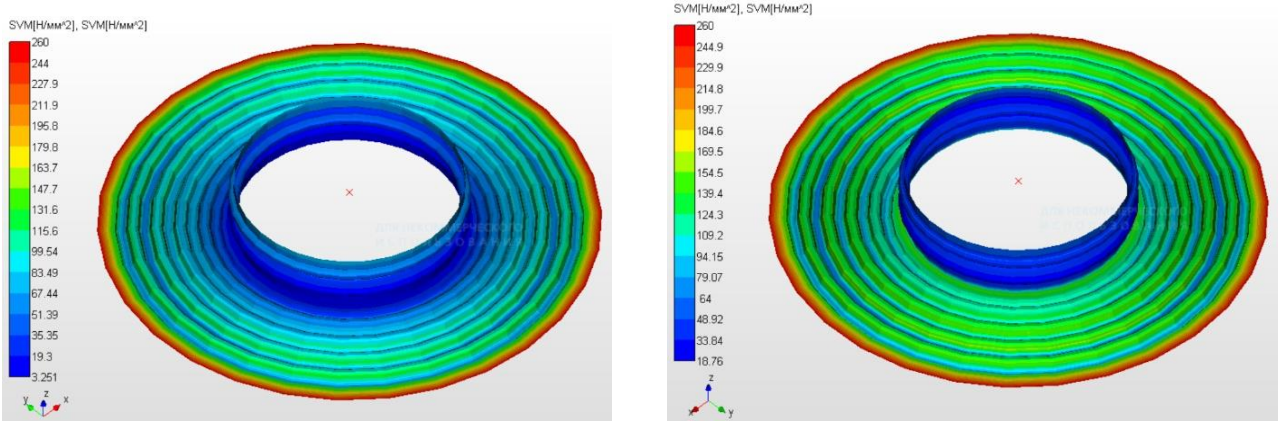
а *б*

Рис. 5. Карат эквивалентных напряжений для сильфонной оболочки на упругой пластине
а – рабочая среда направлена под «золотник»*; б* – рабочая среда направлена на «золотник»



а *б*

Рис. 6. Карат эквивалентных напряжений для оболочки на сильфонной пластине
а – рабочая среда направлена под «золотник»*; б* – рабочая среда направлена на «золотник»



а *б*

Рис. 7. Карат эквивалентных напряжений для сильфонной оболочки на сильфонной пластине
а – рабочая среда направлена под «золотник»; *б* – рабочая среда направлена на «золотник»

При моделировании процесса перекрытия затвора клапана было принято, что за время быстропротекающего динамического (ударного) нагружения давление рабочей среды не проявляется. После посадки «золотника» на «седло», давление рабочей среды начинает оказывать воздействие на соответствующие части затвора клапана.

В табл. 1 представлены результаты расчета эквивалентных напряжений при моделировании тонкостенного «седла» клапана в АРМ WinMachine.

Таблица 1

Результаты моделирования тонкостенного «седла» сложной геометрической формы, нагруженного усилием привода и давлением рабочей среды

Рисунок	Нагрузка со стороны привода, Н	Давление среды направлено «под золотник», МПа	Давление среды направлено «на золотник», МПа
рис. 4	457	3,8910	7,7110
рис. 5		3,8610	9,9070
рис. 6		0,5182	0,1508
рис. 7		0,5268	0,2008
рис. 8		0,5168	0,1619
рис. 9		0,5888	0,3013
рис. 10		0,6550	0,3657

Из полученных результатов видно, что конструктивное решение по снижению жесткости оболочки, за счет установки её на упругую пластину значительно снижает эксплуатационные параметры «седла». Следовательно, необходимо совместно с «золотником», осуществлять разгрузку [10-12] тонкостенного «седла»

В качестве перспективной конструкции, может быть предложена схема затвора клапана, представленная на рис. 8.

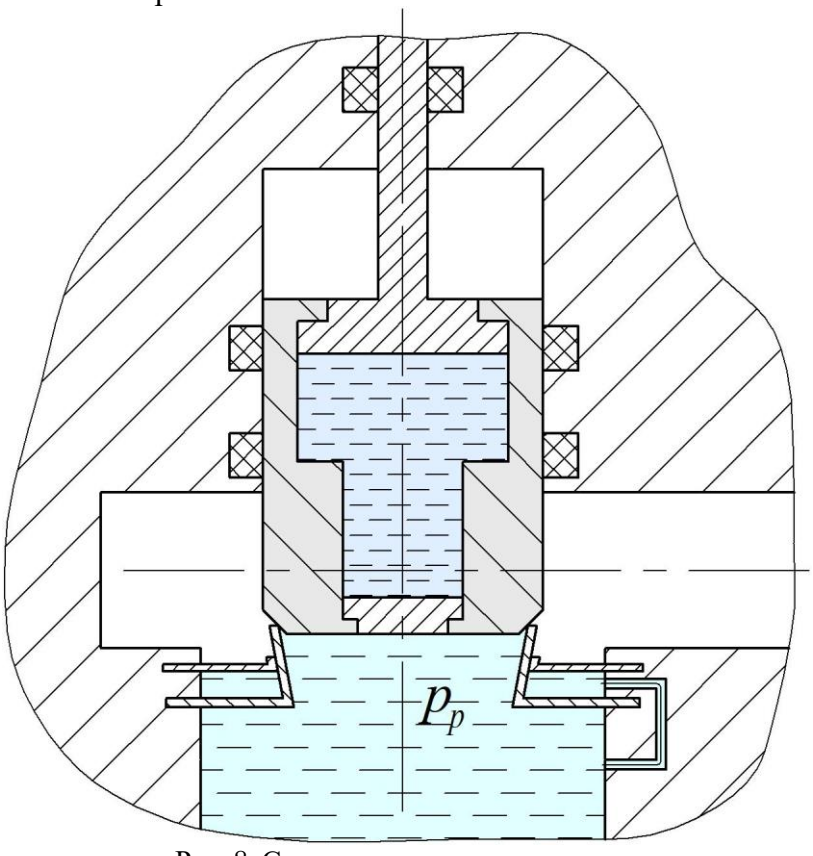


Рис. 8. Схема разгруженного клапана

В предлагаемой конструкции частично разгружен «золотник» и «седло». Давление воздействует на тонкостенное «седло» и частично компенсируется им же посредствам выполненного канала в корпусе затвора, через который поступает герметизируемая среда.

Выводы.

Проведенные исследования по моделированию процесса нагружения тонкостенного уплотнения усилием со стороны привода и давлением рабочей среды показали

необходимость в разгрузке «седла». Распределенная нагрузка на тонкостенную пластину, возникающая от действия давления рабочей среды, оказывает значительное влияние на прочностные свойства тонкостенного «седла». Кроме того, согласно результатам моделирования, давление рабочей среды, которое способно выдержать тонкостенное «седло» значительно снижается по сравнению с уплотнением в виде оболочки. При этом следует учитывать, что необходимость снижения приведенной жесткости «седла» обусловлена динамическими (ударными) нагрузками, моделирование которых выходит за рамки проведенного исследования.

Литература:

1. ГОСТ 24856-2014. Арматура трубопроводная. Термины и определения. Введ. 2015-04-01. М.: Стнадартинформ, 2020. 90 с.

2. Долотов А.М., Гозбенко В.Е., Белоголов Ю.И. Уплотнительные соединения с использованием тонкостенных элементов. Деп. рукопись 22.11.2011, № 508-В2011.

3. Герасимов С.В., Долотов А.М., Белоголов Ю.И. Математическая модель динамического нагружения двухседельного клапана // Тр. Брат. гос. ун-та. Сер.: Естественные и инженерные науки. 2012. Т. 1. С. 126-129.

4. Белоголов Ю.И. Совершенствование конструкций уплотнительных соединений с тонкостенными элементами (упругой кромкой): дис. … канд. техн. наук. Иркутск, 2013. 178 с.

5. Долотов А.М. Разработка методов расчета и проектирование уплотнений с оболочечным элементом для летательных аппаратов. дис. … док. тех. наук: 05.07.05, 05.02.02: защищена 28.04.95 : утв. 28.07.95 / Долотов Алексей Митрофанович. М., 1994. 280 с.

6. Белоголов Ю.И. Использование осевых упоров и полимерных гасителей динамических нагрузок в затворах с тонкостенными уплотнениями // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. - 2023. - № 3 (79). - С. 34-42.

7. Белоголов Ю.И. Совершенствование конструкции подъемного клапана, разгруженного от действия давления рабочей среды // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. - 2021. - № 4 (72). - С. 29-36.

8. Белоголов Ю.И. Расчет седла клапана, нагруженного герметизирующим усилием и давлением рабочей среды // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. - 2025. - №2(86). - С. 145-153.

9. Замрий А.А. Проектирование и расчет методом конечных элементов трехмерных конструкций в среде АРМ Structure 3D. М. : АПМ, 2010. 375 с.

10.Долотов А.М., Белоголов Ю.И. Обзор способов разгрузки золотника клапана от давления герметизируемой среды // Системы. Методы. Технологии. 2010. № 3 (7). С. 30-36.

11.Белоголов Ю.И. Компенсация усилий, действующих на затвор со стороны герметизируемой среды // Проблемы транспорта Восточной Сибири: материалы Всерос. науч.-практ. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов. Иркутск, 2012. С. 124-128.

12.Белоголов Ю.И. Компенсация действия давления рабочей среды в уплотнительных соединениях с тонкостенными элементами // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. - 2021. - №2(70). - С. 51-60.

Modeling of a valve shutter containing a thin-walled seal loaded by the actuator force and the pressure of the working medium

Belogolov Yu.I.[1,a]

[1]Irkutsk State Transport University, st. Chernyshevsky 15, Irkutsk, Russia

[a]belogolov_yi@irgups.ru

Keywords: pipeline fittings, casing, "saddle", "spool", working medium pressure, APM WinMachine.

This research article examines the loading of a thin-walled seal, whose stiffness is reduced to minimize the dynamic (impact) impact during valve closure. After the valve closes, its components, particularly the seat, are subject to operating pressure. Research has shown that the distributed load from the operating pressure has a significant impact on the strength and performance of connections using thin-walled components. One way to compensate for the impact of operating pressure is to relieve the connection. The main valve component subject to full (or partial) relief is typically the valve spool. Based on simulation results in APM WinMachine, it is concluded that all valve components are subject to relief from the operating pressure. A promising valve design with partial relief of the seat from operating pressure is proposed.

УДК: 624.132.3

Современные подходы к снижению энергоемкости процесса резания песчаных грунтов: анализ исследований и патентных решений

Тихонов Н. А.[1,a], Шамахов Л. М. [1,b]
[1]Ярославский государственный университет, Московский проспект 88, г. Ярославль, Россия, 150023.
[a] nikita.tikhonov.03@list.ru, [b] leonid.shamakhov@yandex.ru

Ключевые слова: резание грунта, песчаный материал, рабочий орган, дискретно-элементное моделирование (DEM), метод конечных элементов (FEM), износостойкость, патентный анализ, землеройная машина.

Оптимизация процесса резания грунта является определяющим фактором для повышения производительности землеройных и дорожных машин. Особую сложность представляет обработка песчаных материалов, что обусловлено их специфическими свойствами: высокой сыпучестью, абразивностью и низкой связностью частиц. Целью настоящей работы является комплексный анализ современных подходов к решению задач снижения энергозатрат и повышения износостойкости рабочих органов при взаимодействии с песчаными грунтами. В обзоре систематизированы результаты актуальных научных исследований и патентные разработки за последние годы. Установлено, что ключевыми направлениями являются: применение методов компьютерного моделирования (дискретно-элементного и методом конечных элементов) для анализа усилий и износа, а также дальнейшего их прогнозирования; разработка специализированных экспериментальных стендов для валидации расчетных данных; создание специализированного программного обеспечения для инженерных расчетов. На основе проведенного анализа сформулирован вывод о том, что дальнейшее развитие лежит в области создания интегрированных цифровых методик проектирования, объединяющих результаты моделирования, материаловедческие решения и данные физических испытаний в единый цикл для разработки энергоэффективных конструкций следующего поколения.

Введение.

Совершенствование процессов разрушения грунта является ключевым фактором повышения производительности и экономической эффективности в строительной, дорожной и горнодобывающей отраслях. Основу этих технологий составляет процесс резания, реализуемый рабочими органами специализированной техники. Особую актуальность приобретает обработка песчаных грунтов, широко распространенных на различных территориях. Специфика песка как технологической среды определяется комплексом

физико-механических свойств: низкой связностью частиц, высокой сыпучестью, значительной абразивностью и выраженной зависимостью сопротивления сдвигу от плотности и влажностного состояния. Эти характеристики приводят к возникновению двух основных проблем при эксплуатации: высоким энергозатратам на преодоление сопротивления резанию и интенсивному абразивно-ударному износу режущих кромок рабочих органов (лемехов, отвалов, ковшей). В условиях усовершенствования техники и, как следствие, повышения требований к энергоэффективности и ресурсосбережению разработка научно обоснованных методов снижения силовых нагрузок и повышения износостойкости инструмента становится важнейшей научно-практической задачей.

Целью настоящего исследования является проведение комплексного аналитического обзора современных научных подходов и инженерных решений в области резания песчаных грунтов. В рамках работы решаются задачи анализа влияния свойств песчаной среды на процесс резания, систематизации актуальных методик исследования (включая компьютерное моделирование и экспериментальные методы), а также формулировку основных тенденций и перспективных направлений для развития данной области знаний.

Особенности резания песчаных материалов как объекта обработки.

Песок представляет собой дисперсный сыпучий материал, сопротивление резанию кот орого определяется преимущественно силами внутреннего трения и сцепления. Эти параметр ы находятся в прямой зависимости от плотности материала, гранулометрического состава и в лажности [1].

Исследования особенностей износа рабочих органов показывают, что в процессе эксплуатации лезвия лемеха формируется характерная задняя (затылочная) фаска. Её плоскость располагается под малым отрицательным углом к дну борозды (рис. 1), фактически приподнимая режущую кромку. Конфигурация кромки – острая или притуплённая – является индикатором условий работы: типа почвы и её состояния. На песчаных грунтах, обладающих высокой абразивностью, наблюдается интенсивный износ нижней поверхности. Это приводит к образованию острой самозатачивающейся кромки и плоской фаски с углом $\alpha \leq 10°$. В условиях связных глинистых почв, где преобладают адгезионно-ударные нагрузки, формируется бочкообразная фаска с углом наклона 20–25° и выраженное закругление режущей кромки [1].

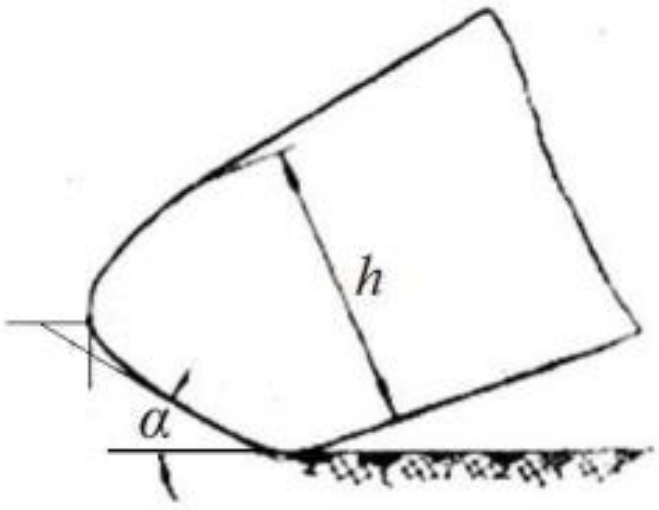


Рис. 1. Профиль лезвия изношенного лемеха [1]

Обзор современных научных исследований.

Современные исследования в области механики грунта и взаимодействия рабочих органов с сыпучими средами активно используют математическое моделирование для прогнозирования параметров процесса и анализа износа. В работе [2] представлены результаты исследования абразивного изнашивания материалов рабочих органов

рыхлительного оборудования с применением математической модели, описывающей взаимодействие абразивных частиц с поверхностью. Автором проведен расчет интенсивности износа в зависимости от таких факторов, как скорость скольжения, механические свойства материала рабочего органа и характеристики абразивной среды.

На основе моделирования был сделан вывод, что основным механизмом разрушения поверхности при работе с песчаными грунтами является микросрезание и вырыв частиц материала под действием высоких локальных напряжений. Модель, предложенная в исследовании, позволяет количественно оценить влияние угла атаки рабочего органа и свойств грунта на скорость изнашивания. Результаты расчетов показали, что при работе в песчаных средах наиболее интенсивному износу подвергаются зоны с максимальными контактными напряжениями, что требует особого внимания при проектировании геометрии режущих кромок ковшов, рыхлителей, отвалов и т.д.. Данный вывод имеет практическую значимость для оптимизации конструкций рабочих органов с целью повышения их ресурса и снижения энергозатрат на процесс резания.

Анализ патентных решений в области конструкций рабочих органов.

Современные исследования процесса резания грунта требуют проведения достоверных экспериментальных испытаний, для чего разрабатываются специализированные стенды. Анализ патентной базы Российской Федерации показывает значительную научно-прикладную активность в данной области.

Важным направлением является разработка оборудования для объективной оценки сопротивления грунтов резанию. В патенте [3] описан универсальный стенд для исследования резания грунтов моделями рабочих органов землеройных машин. Конструкция стенда позволяет устанавливать различные сменные модели ножей и отвалов, а также изменять ключевые параметры эксперимента: угол атаки, глубину и скорость резания. Авторами предусмотрена система точного измерения силовых и энергетических характеристик процесса, что делает данный стенд эффективным инструментом для сравнительного анализа различных геометрических профилей рабочих органов на этапе их проектирования.

Дальнейшее развитие методов испытаний отражено в более позднем патенте [4], также посвященном стенду для измерения силы сопротивления грунтов резанию, изображен на рисунке 2. Особенностью данного решения является механизм обеспечения стабильного и контролируемого прижима рабочего органа к грунтовому образцу с регулируемым усилием. Это позволяет моделировать различные условия нагружения и получать воспроизводимые данные о сопротивлении резанию, необходимые для валидации результатов численного моделирования и обоснования выбора оптимальных конструктивных параметров. Существование подобных последовательно развивающихся технических решений подчеркивает актуальность задачи создания стандартизированных методик и оборудования для испытаний в области механики грунтов и подтверждает важность экспериментального этапа в цикле проектирования рабочих органов для песчаных материалов.

Перспективные направления развития.

Развитие вычислительных технологий и программного обеспечения формирует ключевое перспективное направление для оптимизации процессов резания грунта. Основу этого направления составляет создание специализированных программных комплексов для детального анализа и моделирования.

Для проведения более детальных исследований, включающих оценку напряженно-деформированного состояния как грунтового массива, так и конструкции рабочего органа, применяются универсальные программные комплексы. В исследовании, представленном в работе [6], рассматривается моделирование процесса резания объема грунта в среде Abaqus. Данная работа демонстрирует возможности метода конечных элементов (FEM) для анализа контактного взаимодействия, распределения напряжений в зоне резания и оценки деформаций рабочего инструмента. Применение метода дискретных элементов (DEM),

альтернативного FEM, также демонстрирует высокую эффективность для моделирования сыпучих сред.

Метод дискретных элементов (DEM) находит широкое применение не только в области землеройно-транспортных машин, но и в смежных отраслях, где изучается взаимодействие рабочих органов с сыпучими средами. В частности, в работе [7] исследован процесс обработки почвы дисковым культиватором с использованием DEM, что показано на рисунке 3. Несмотря на то, что данное исследование относится к области сельскохозяйственного машиностроения, где рассматриваются иные типы грунтов, материалы рабочих органов и глубина обработки, его ценность для обзора заключается в демонстрации возможностей дискретно-элементного моделирования как инструмента анализа поведения сыпучей среды при взаимодействии с рабочим органом техники. Результаты моделирования позволили визуализировать траектории движения отдельных частиц и оценить характер формирования, что представляет интерес с точки зрения адаптации подобных подходов к задачам резания песчаных грунтов в строительном и дорожном машиностроении.

Интеграция подобных результатов моделирования (как FEM, так и DEM) с данными экспериментальных стендов [4, 5] формирует комплексную методологию проектирования. Это позволяет не только оптимизировать геометрию рабочих органов для песчаных материалов, но и прогнозировать их ресурс, выбирать рациональные режимы работы, что в итоге ведет к снижению энергозатрат и повышению эффективности землеройной техники.

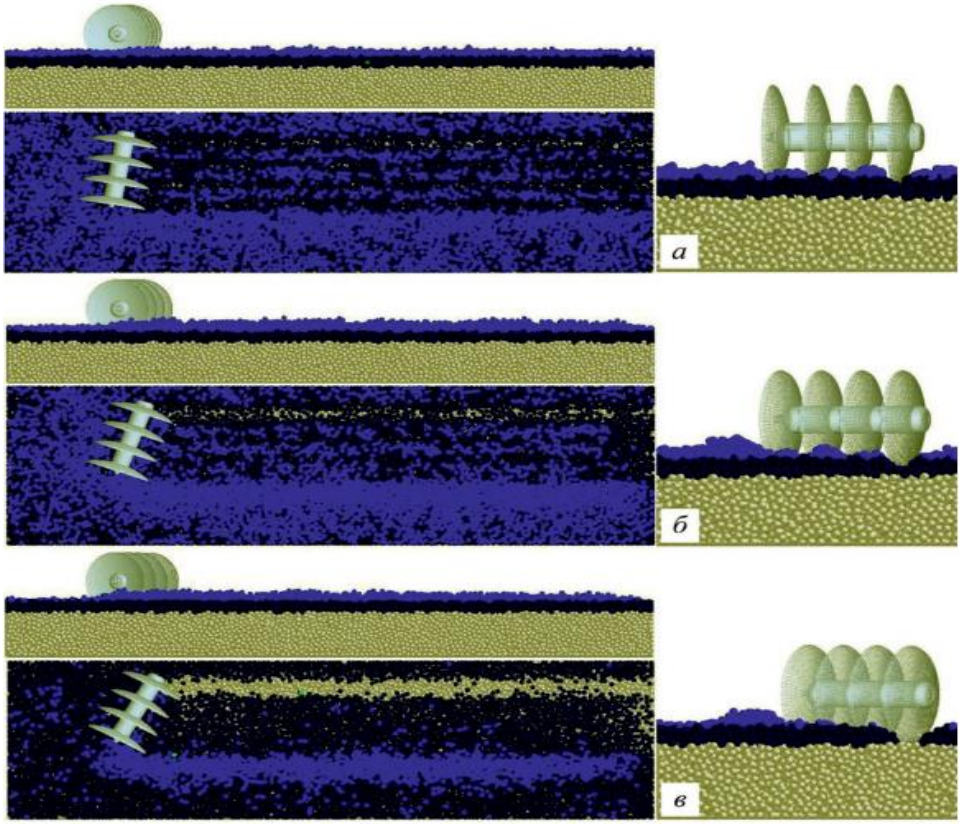


Рис. 3. Моделирование рабочего процесса дискового культиваторного рабочего органа [7]: *а*- угол атаки α = 10°; *б* - α = 20°; *в* - α = 30°

Выводы.

Современные исследования процесса резания песчаных грунтов сместились в сторону комплексного использования высокоточного эксперимента и передовых методов численного моделирования, прежде всего DEM, что позволяет глубоко изучать микромеханику взаимодействия.

Анализ существующих патентов свидетельствует о преобладании инноваций, направленных на модификацию геометрии режущей кромки (комбинированные, вибрирующие профили) и условий контакта (применение смазки в парах трения) для снижения общего усилия резания и локальных пиковых нагрузок.

Наиболее перспективными представляются гибридные подходы, сочетающие достижения материаловедения (износостойкие нанопокрытия, композиты), цифрового проектирования (DEM-FEM симуляции) и мехатроники (системы адаптивного контроля), ведущие к созданию энергоэффективных и ресурсосберегающих рабочих органов нового поколения.

Литература:

1. Кулагин, Д. А. Физико-механические свойства грунтов и их влияние на процесс резания / Д. А. Кулагин, А. В. Морозов // Инженерный вестник Дона. – 2021. – № 4(76). – С. 215–224.

2. Ахметшин, Т. Ф. Расчётный метод оптимизации конструкции лезвий почвообрабатывающих рабочих органов / Т. Ф. Ахметшин // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2015. – № 2(52). – С. 81-84. – EDN TSCGTF. [2] Кузнецова, В. Н. Исследование процесса абразивного изнашивания материалов рабочих органов рыхлительного оборудования / В. Н. Кузнецова // Вестник Омского государственного аграрного университета. – 2017. – № 3(27). – С. 157-163. – EDN ZQSZUP.

3. Патент № 2689958 C1 Российская Федерация, МПК E02F 9/28, G01N 3/58. Универсальный стенд для исследования резания грунтов моделями рабочих органов землеройных машин : № 2018125294 : заявл. 10.07.2018 : опубл. 29.05.2019 / Х. А. Дианов, Р. С. Дианова, Д. Х. Дианова ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Российский университет транспорта (МИИТ)" РУТ (МИИТ). – EDN YZQOOF.

4. Патент № 2700285 C1 Российская Федерация, МПК G01N 3/58. Стенд для измерения силы сопротивления грунтов резанию : № 2019101337 : заявл. 17.01.2019 : опубл. 16.09.2019 / Т. К. Бабаев, Е. В. Кошкарев ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет" (НИУ МГСУ). – EDN GYSYQM.

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023619049 Российская Федерация. Программное средство для расчета силы резания грунта, действующей на ковш рабочего оборудования экскаватора : № 2023618440 : заявл. 04.05.2023 : опубл. 04.05.2023 / Ж. М. Мохаммад, И. В. Одинокова, М. Ю. Карелина [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет ". – EDN ZLCAKF.

6. Ганюков, А. А. Моделирование процесса резания объема грунта в программном комплексе Abaqus / А. А. Ганюков, А. Ж. Алтынбаев, Е. Ш. Дюсенбаев // Труды университета. – 2023. – № 1(90). – С. 251-258. – DOI 10.52209/1609-1825_2023_1_251. – EDN ZPSUQE.

7. Лысыч, М. Н. Исследование процесса обработки почвы дисковым культиватором с использованием метода дискретных элементов / М. Н. Лысыч // Современные наукоемкие технологии. – 2020. – № 3. – С. 59-64. – DOI 10.17513/snt.37941. – EDN QHDXNV.

Modern approaches to reducing the energy intensity of sand cutting: an analysis of research and patent solutions

Tikhonov N. A.[1, a], Shamakhov L. M. [1, b]
[1]Yaroslavl State University, Moskovsky Prospekt 88, Yaroslavl, Russia, 150023.
[a]nikita.tikhonov.03@list.ru, [b] leonid.shamakhov@yandex.ru

Keywords: soil cutting, sand material, working element, discrete element modeling (DEM), finite element method (FEM), wear resistance, patent analysis, earthmoving machine.

Optimizing the soil cutting process is a crucial factor in increasing the productivity of earthmoving and road-moving equipment. Processing sandy materials is particularly challenging due to their specific properties: high flowability, abrasiveness, and low particle cohesion. The aim of this paper is to comprehensively analyze modern approaches to reducing energy consumption and increasing the wear resistance of working parts when interacting with sandy soils. This review systematizes the results of current scientific research and patent developments in recent years. Key areas include the use of computer modeling methods (discrete element and finite element methods) for predictive analysis of forces and wear; the development of specialized experimental rigs for validating calculated data; and the creation of specialized software for engineering calculations. Based on the analysis, it is concluded that further development lies in the development of integrated digital design methods that combine modeling results, materials science solutions, and physical test data into a single cycle for the development of next-generation energy-efficient designs.

УДК 621.923.01

Современный уровень передовых методов финишной обработки

Литовка О. В.[1,a], Левко В.А.[1,b], Желудов Е. В.[1,c], Нефедьев К. А.[1,d]
[1]Сибирский государственный университет науки и технологии имени академика М. Ф. Решетнева Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
[a]litovka.9518@gmail.com

Ключевые слова: передовые методы финишной обработки, технические требования, абразивное изнашивание, термическое воздействие, электрохимическое воздействие

Рассмотрен современный уровень передовых методов финишной обработки. Приведено обоснование развития этих методов с точки зрения различных требований к конструкции современных высокотехнологичных изделий. Дано краткое описание передовых методов. Выделены методы, основанные на абразивном изнашивании, электрохимическом и химическом воздействии, термическом и комбинированном воздействии. Отмечены их основные достоинства и недостатки. Описаны рекомендации по их применению.

Введение.

Производство изделий высокотехнологичного машиностроения имеет ряд особенностей, обусловленных рядом требований к их конструкции. Эти требования распространяются как на технические характеристики изделий, так и на безопасность, экологичность и экономичность всех этапов их жизненного цикла.

Экономические требования, как правило, являются целевым показателем жизненного цикла любого изделия. Минимизация затрат, повышение конкурентоспособности с учетом динамики внешней среды, изменения потребительских предпочтений и потребностей в новых свойствах продукции являются ключевыми показателями организации производственного процесса.

Другие требования задают граничные условия жизненного цикла. Так безопасность конструкции изделия направлена на исключение (минимизацию) влияние вредных факторов на потребителей и должна соответствовать всем требованиям эргономики.

Экологичность конструкции должна учитывать факторы воздействия на окружающую среду как при производстве, так и при эксплуатации и утилизации изделия. Требования экологичности производства накладывают серьезные ограничения на использование смазывающе-охлаждающих жидкостей, а также применение целого ряда электролитов.

Особое внимание уделяется минимизации твердых, жидких и газообразных отходов производства, что обуславливает, в том числе, разработку и более широкое использование экологически ориентированных технологий.

Технологичность конструкции изделия является основной его технической характеристикой. Ее основные показатели устанавливаются нормативной документацией, в обязательном порядке проводится качественная и количественная оценка технологичности конструкции изделия от деталей до сборочных единиц и комплексов.

Современные изделия высокотехнологичного машиностроения эксплуатируются в очень сложных условиях. Поэтому в их технических характеристиках предусмотрены высокие требования по точности размеров и формы, а также взаимного расположения поверхностей. Наблюдается тенденция как к миниатюризации, так и значительном увеличении габаритных размеров деталей и сборочных единиц. Эта тенденция вызвала необходимость совершенствования специальных технологий, в том числе микро- и нано-обработки.

Другой тенденцией является увеличение количества конструктивных элементов в изделии и усложнение их геометрической формы. Она способствовала не только совершенствованию существующих заготовительных, формообразующих и отделочно-упрочняющих технологий получения сложнопрофильных поверхностей, но и появлению новых методов.

Эксплуатация изделий в условиях действия агрессивных сред и высоких температур, а также больших, в том числе знакопеременных нагрузок, приводит к тенденции применения материалов с новыми свойствами. Все большее применение находят композитные материалы, материалы с заданными свойствами. Твердые, высокопрочные и термостойкие материалы, как правило, относятся к труднообрабатываемым материалам.

Еще одной тенденцией является увеличение потребительского спроса на широкую номенклатуру небольших партий недорогих изделий высокого качества. Она обуславливает требования по гибкости производства.

Современные детали эксплуатируются в очень сложных условиях, поэтому к их поверхностям предъявляются повышенные требования по состоянию поверхностного слоя (величина и направление шероховатости, физико-химическое состояние), определяющего качество изготовления деталей, долговечность и надежность изделий в целом.

Сложная форма конструктивного элемента затрудняет доступ к его поверхности инструментов с постоянной формой (хонинговальные головки, абразивные круги и ленты, притиры и диски, резцы, фрезы, осевой режущий инструмент и др.). Поэтому все чаще для финишной обработки применяют методы, у которых в качестве инструмента применяется поток разнообразных жидкостных (уплотненных) сред, в том числе электролитов, несущих рабочие элементы, которые при перемещении вдоль обрабатываемой поверхности вступают в контакт с ее неровностями. На этот поток может дополнительно накладываться электромагнитные и электрические воздействия, колебания различной частоты и амплитуды.

В этих процессах величина съема материала с поверхности детали контролируется и может изменяться в интервале от нанометров до нескольких миллиметров. Для труднодоступных поверхностей применение таких технологий дает возможность изменить структуру поверхностного слоя от исходной с высокой шероховатостью и величиной дефектного слоя (различные виды литья, порошковая металлургия, аддитивные технологии) до требуемых значений без промежуточных операций лезвийной или других видов обработки.

Таким образом для удовлетворения перечисленных выше требований был создан новый класс процессов финишной обработки, называемых нетрадиционными, нестандартными, современными или передовыми процессами обработки.

Целью исследований являлась разработка рекомендаций по выбору передовых методов финишной обработки на основе сравнительного анализа.

Сравнительный анализ передовых методов финишной обработки. Передовые методы финишной обработки разделяются по механизму воздействия на обрабатываемую заготовку: абразивное изнашивание; электрохимическое и химическое воздействие; термическое воздействие; комбинированное воздействие [1].

Абразивное изнашивание в отделочных операциях используется давно. И одним из первых методов стала технология абразивной струйной обработки (Abrasive jet machining (AJM)). В ее ходе материал удаляется с поверхности заготовки под воздействием высокоскоростного потока абразивных частиц. Первоначально это был поток газов (воздушная пескоструйная и дробеструйная обработка). При обработке керамики и полимеров наблюдались появления дефектов, а мягких материалов – шаржирование. В дальнейшем газы были заменены жидкостью, что позволило уменьшить давление потока на обрабатываемую поверхность и достигать лучших показателей шероховатости. Однако вода и углеродные масла также оказывали негативное воздействие на поверхность керамических заготовок.

Для увеличения скорости струи без потери ее стабильности был предложен новый метод магнитореологической обработки (Magneto-rheological finishing (MRF)). Магнитореологическая жидкость, представляющая собой водную смесь абразивов и диспергированных ферромагнитных частиц с химическими добавками, под действием магнитного поля может существенно менять свои вязкие свойства. При этом в потоке образуется пространственная структура. Известно, [2], что с помощью MRF можно получить высокоточную поверхность с шероховатостью менее 1 нм для ряда хрупких материалов, таких как монокристаллы, керамика и стекло. Для обработки мягких и пластичных материалов предложено охлаждать поверхность жидким азотом, а для труднообрабатываемых – нагревать.

Абразивная струйная обработка, использующая различные твердые частицы оставляет большое количество отходов и не является экологичной. Для устранения этого недостатка в качестве твердых частиц было предложено использование кристаллов сухого льда, которые испаряются при соударении с поверхностью [3]. Эта технология получили название крио бластинга (Cryoblasting) и используется для очистки поверхностей и нано-обработки. Преимуществом технологий AJM является возможность обработки наружных поверхностей любой формы и габаритов, недостатком – невозможность обработки закрытых каналов и внутренних полостей.

Обработка абразивным потоком (Abrasive flow machining (AFM)) выделяется из других технологий абразивной струйной обработки тем, что поток создается вязкоупругими (неньютоновскими) жидкостями (рабочими средами). Поток рабочей среды при AFM осуществляет сдвиговое течение в обрабатываемых каналах с малой скоростью и большим давлением. Это позволяет осуществлять отделочно-упрочняющую обработку внутренних (сквозных) каналов и полостей, типа межлопаточных каналов крыльчаток, токонесущих поверхностей волноводов, матриц и пресс-форм, коллекторов и т.п. [4]. Различают одностороннюю и двухстороннюю обработку абразивным потоком. Величина сил контактных взаимодействий позволяет обрабатывать любые материалы, в том числе керамику [5] и металлокомпозитные матрицы [6]. Недостатком технологии AFM является невозможность обработки поверхности большой площадью. Для обработки микроотверстий применяется технология обработки микропотоком.

В процессе магнитной абразивной обработки (Magnetic abrasive finishing (MAF)) в качестве режущих инструментов используются гранулированные магнитные абразивные частицы (спеченные ферромагнитные (железные) частицы и абразивные зерна (например, Al2O3, SiC или алмаз)), а необходимое давление обработки создается магнитным полем, генерируемым электромагнитом. Различают наружную и внутреннюю MAF [7]. Этот вид обработки хорошо себя зарекомендовал для наружных поверхностей.

Магнитная флоат-полировка (Magnetic float polishing (MFP)) предназначена для полировки плоских и сферических поверхностей из различных материалов, в том числе хрупких. Данная технология основана на способности магнитной жидкости под действием магнитного поля приподнимать над обрабатываемой поверхностью немагнитный (акриловый) вращающийся притир и взвешенные в обычной (вода, керосин) жидкости абразивные частицы. При этом ферромагнитная жидкость опускается вниз к обрабатываемым деталям [8].

Технология упругой эмиссионной обработки (Elastic emission machining (EMM)) подразумевает съем материала за счет упругого разрушения на атомном уровне без пластической деформации. Для этой обработки используются наночастицы порошка, прижимаемого к обрабатываемой поверхности упругим инструментом. В результате формируется зеркальная, кристаллографически и физически неповрежденная поверхность с шероховатостью порядка 0,2…0,4 нм.

На основе электрохимического воздействия действуют все технологии (размерные и неразмерные) электрохимической обработки (Electrochemical machining (ECM)). К новым методам этой обработки необходимо отнести динамическую электрохимическую обработку (Dynamic ECM), при которой катод с постоянной скоростью движется в направлении детали, обеспечивая чистовую обработку деталей сложной формы. При этом катод имеет форму обрабатываемой поверхности, а в качестве электролита используют соли NaCl и NaNO3. Использование в технологии сухой электрохимической обработки (DLyte) в качестве электролита ионообменных смол позволяет соблюдать жесткие нормы по экологичности процесса.

Химическая обработка (Chemical machining (ChM)) основана на выборочном удалении материала с поверхности путем воздействия кислотами или щелочами. Широко применяется в производстве электронных плат.

На термическом воздействии основаны лучевые методы обработки. Лазерная обработка (Laser Beam Machining (LBM)) помимо формообразования отверстий, резки, маркировки и гравировки, используется для упрочнения поверхности и придания ей необходимой топографии. Электронно-лучевая обработка (Electron beam machining (EBM)) также используется для получения микроотверстий и пазов, изготовлении интегральных схем и сварки. Плазменно-дуговая обработка (Plasma arc machining (PAM)) применятся для нанесения на поверхность покрытий. Ионно-лучевая обработка (Ion beam machining (IBM)) связана с выбросом атомов с поверхности другими ионизированными атомами (ионами), которые бомбардируют обрабатываемый материал. Этот процесс также называется ионным травлением, ионным измельчением или ионной полировкой и позволяет получить шероховатость порядка 1 нм.

Большинство передовых методов финишной обработки основаны на комбинированном воздействии различных методов, позволяющих использовать лучшие показатели комбинируемых методов и уменьшить влияние недостатков. В зависимости от основного механизма удаления материала эту обработку можно классифицировать на комбинированные химические и электрохимические процессы, а также комбинированную термическую обработку.

Для комбинированных электрохимических процессов химическое или электрохимическое растворение может сочетаться с термическим воздействием путем локального нагрева в случае лазерной электрохимической обработки, электрохимической электроэрозионной обработки. Наложение процесса абразивного изнашивания интенсифицирует анодное растворение путем механической депассивации поверхности и применяется в электрохимическом шлифовании и электрохимическом суперфинишировании.

Ультразвуковая электрохимическая обработка использует компонент ультразвуковой обработки в сочетании с электрохимическим растворением. Кавитация, создаваемая

ультразвуковыми вибрациями, улучшает электрохимическое растворение материала за счет промывки электролитом поверхности и, следовательно, удаление материала с обрабатываемой поверхности. Механическое действие струи жидкости способствует процессу химического растворения при электрохимическом полировании или электрохимическом эрозионном шлифовании.

В термических комбинированных методах температурный нагрев (лучевой или электроэрозионный) комбинируется с электрохимическим растворением, абразивным износом и ультразвуковой вибрацией. Такая комбинация повышает скорость удаления материала и качество поверхности в процессе электроэрозионной обработки с помощью ультразвука и лазерно-эрозионной обработки.

Выводы.

Современный уровень передовых методов финишной обработки позволяет успешно решать задачи по повышению эффективности производства высокотехнологичных изделий. Эти технологии позволяют обеспечить требуемую величину шероховатости и твердости поверхностей любой формы заготовок из различных материалов. Основной проблемой их широкого использования в промышленности является высокая стоимость и отсутствие квалифицированного производственного и научного персонала, способного внедрять эти технологии в производство конкретных изделий.

Литература:

1. Jain, V. (2008). Advanced (Non-traditional) Machining Processes. In: Machining. Springer, London. https://doi.org/10.1007/978-1-84800-213-5_11.

2. W.I. Kordonski, A.B. Shorey, M. Tricard, Magnetorheological (MR) jet finishing technilogy, Proc. IMECE04, ASME Int. Mech. Eng. Congr. (2004) 1–8.

3. Ruslan Melentiev, Fengzhou Fang. Recent advances and challenges of abrasive jet machining. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. Volume 22, 2018, Pages 1-20, https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2018.06.001..

4. Swarn Singh, Harish Kumar, Santosh Kumar, Saurabh Chaitanya. A systematic review on recent advancements in Abrasive Flow Machining (AFM). Materials Today: Proceedings. Volume 56, Part 5, 2022, Pages 3108-3116, https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.273.

5. Исследование влияния обработки абразивным потоком на структуру поверхностного слоя керамического покрытия Al2O3 внутренней цилиндрической поверхности / В. А. Левко, П. А. Иванов, М. С. Руденко [и др.] // Сибирский аэрокосмический журнал. – 2025. – Т. 26, № 4. – С. 586-596. – DOI 10.31772/2712-8970-2025-26-4-586-596. – EDN ZNXVBP.

6. R. Manikandan, Prasanth Ponnusamy, S. Nanthakumar, A. Gowrishankar, V. Balambica, R. Girimurugan, S. Mayakannan. Optimization and experimental investigation on AA6082/WC metal matrix composites by abrasive flow machining process. Materials Today: Proceedings. 2023, https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.274.

7. Tian, Y., Li, L., Qian, C., Yuan, X., Ma, X., Fan, Z. (2025). Magnetic Abrasive Finishing. In: Guo, J., Wang, C., Yu, N., Cheung, C.F. (eds) Advanced Finishing Technologies for High Performance Manufacturing. Springer Tracts in Mechanical Engineering. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-96-1900-9_13

8. Ranga Komanduri, Ming Jiang. Magnetic float polishing processes and materials therefor Patent US, no. 5931718, 1999.

State-of-the-art advanced finishing methods

Litovka O. V.[1,a], Levko V.A.[1,b], Zheludov E. V.[1,c], Nefedyev K. A.[1,d]
[1]Reshetnev Siberian State University of Science and Technology 31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
[a]litovka.9518@gmail.com

Keywords: advanced finishing methods, technical requirements, abrasive wear, thermal action, electrochemical action

This article examines the current state of advanced finishing methods. The rationale for their development is presented in light of the various design requirements of modern high-tech products. A brief description of these advanced methods is provided. Methods based on abrasive wear, electrochemical and chemical action, thermal action, and combined action are highlighted. Their main advantages and disadvantages are highlighted, and recommendations for their use are provided.

УДК 621.9.02

Экспериментальная установка вибрационного контроля вращающихся металлорежущих инструментов

Свинин В.М.[1,a], Иринчеев А.А.[1,b], Владимиров Л.М.[1,c], Инак С.В.[1,d], Амененко Т.П.[1,e]

[1]Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова 83, Иркутск, Россия

[a]svinin_vm@mail.ru, [b]andrey.iaa2000@yandex.ru, [c]mixvladimile@gmail.com, [d]sergejinak@gmail.com, [e]tanaamenenko@gmail.com

Ключевые слова: вибрационный контроль, вращающиеся металлорежущие инструменты, токовихревые датчики, кронштейн.

Среди множества разновидностей диагностики процессов резания значительное место занимает вибрационный контроль состояния режущего инструмента. Для его реализации используют разные типы датчиков, в том числе токовихревые, достоинством которых является бесконтактный способ измерения. В ИРНИТУ на базе обрабатывающего центра DMG DMU 80P Duo Block разработана экспериментальная установка для вибрационного контроля вращающихся металлорежущих инструментов. Установка позволяет считывать вибросмещения шейки оправки с закрепленным на ней инструментом вдоль двух осей с помощью токовихревых датчиков, установленных на кронштейне, а также получать данные о трех составляющих силы резания благодаря использованию динамометра Kistler Type 9253B23 и выводить эти параметры на экран компьютера в виде пяти отдельных осцилограмм. Комплексный контроль вибродиагностики используют в ИРНИТУ при оценке эффективности подавления вибраций новыми прогрессивными конструкциями торцовой фрезы и многозубой расточной головки.

Важность диагностики процессов механообработки постоянно повышается в связи с необходимостью увеличения надежности, производительности, точности и качества выпуска изделий, особенно в условиях автоматизированного производства [1]. Основное внимание в диагностике отводится контролю состояния режущего инструмента [2, 3]. Мониторинг износа инструмента обеспечивает полное использование его режущего ресурса [4, 5, 6]. Информация о силах и мощности резания, деформации и вибрации элементов технологической системы, термо-ЭДС обеспечивает функционирование адаптивных систем управления станками [7]. Одним из наиболее часто используемых является вибрационный контроль процесса резания [8-12]. Для его реализации применяют пьезоэлектрические акселерометры, динамометры фирмы «Kistler», микрофоны, лазерные виброметры, токовихревые, тензометрические и другие датчики. Недавно китайские исследователи

сообщили об использовании для этой цели датчиков миллиметровых волн (СВЧ), представляющих по сути радары с частотой несущего сигнала от 30 до 300 ГГц [13].

Важным вопросом проведения вибрационного контроля является выбор места расположения датчиков. При точении и растачивании датчики устанавливают на теле резца в непосредственной близости от зоны резания [14, 15, 16]. При контроле вибраций фрезерных станков акселерометры закрепляют на шпиндельной головке и столе или суппорте [9, 17]. Недостатком такого способа размещения датчиков является их удаленность от зоны резания, приводящая к ослаблению вибрационного сигнала и появлению в нем помех. Более предпочтительно использование бесконтактных токовихревых и СВЧ датчиков, непосредственно регистрирующих вибрации вращающихся инструментов [10, 13].

Для исследования вибраций при работе вращающихся многозубых металлорежущих инструментов, например, торцовых фрез и расточных головок, в Иркутском национальном исследовательском техническом университете на базе пятикоординатного обрабатывающего центра DMG DMU 80P Duo Block была разработана экспериментальная установка. Потребность в ней обусловлена тем, что серийно выпускаемое металлорежущее оборудование, как правило, не оснащается датчиками контроля процесса резания.

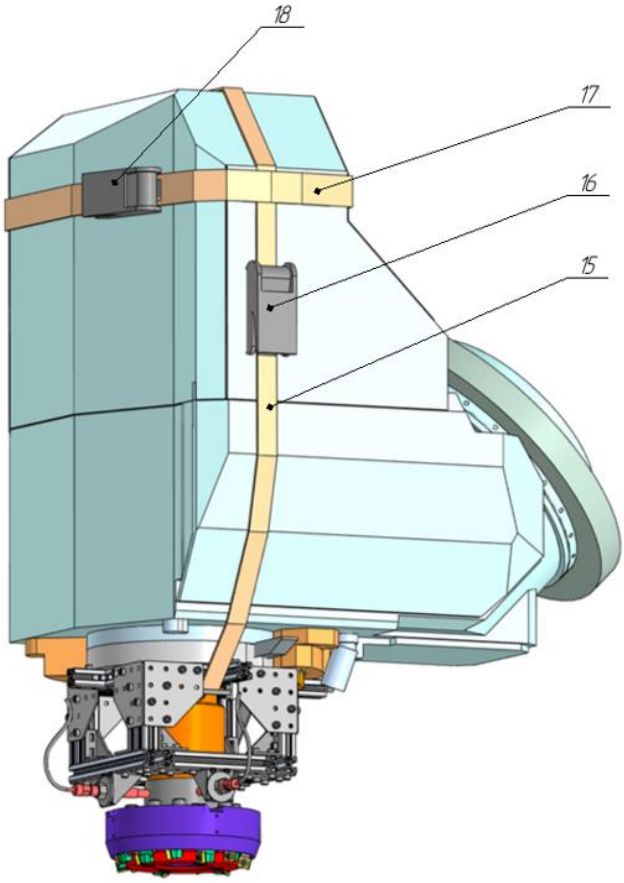


Рис. 1. Шпиндельная головка станка с установленным кронштейном, несущим токовихревые датчики смещения, при виде спереди-справа

Экспериментальная установка кроме станка включает расположенный на его столе фрезерный динамометр Kistler Type 9253B23, на котором закрепляют обрабатываемую заготовку, и комплект из двух токовихревых датчиков, установленных на шпиндельной головке посредством специального кронштейна. Выбор в качестве регистраторов вибрации токовихревых датчиков объясняется их способностью бесконтактной работы с вращающимися объектами без внесения искажения в процесс резания. С целью максимально возможного приближения к зоне резания торцы датчиков расположены взаимно перпендикулярно с зазором 1,5 мм напротив шейки оправки, несущей инструмент.

Серьезной проблемой при конструировании кронштейна оказалось отсутствие на шпиндельной головке станка поверхностей, удобных для его закрепления. Чтобы избежать создания на шпиндельной головке дополнительных поверхностей и крепежных резьбовых отверстий, которые могут ухудшить работоспособность станка, было решено применить крепление кронштейна на головке с помощью ремней (рис.1).

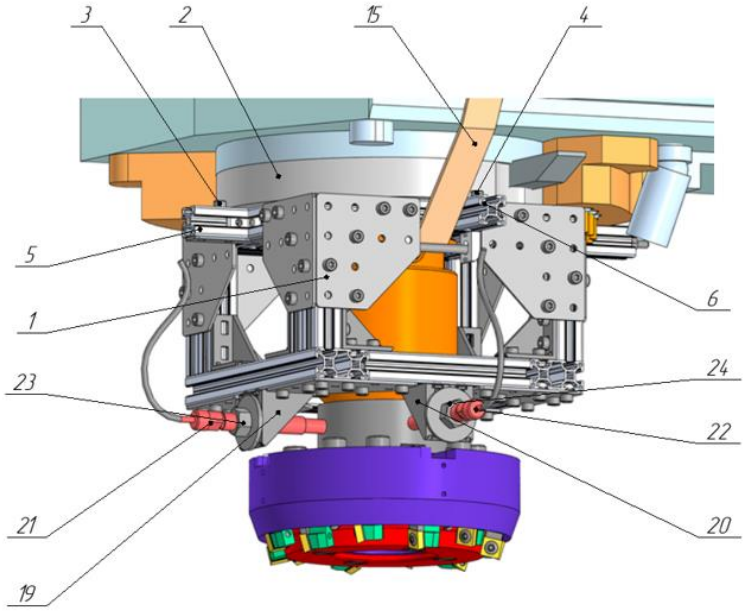


Рис. 2. Кронштейн с датчиками при виде спереди-справа

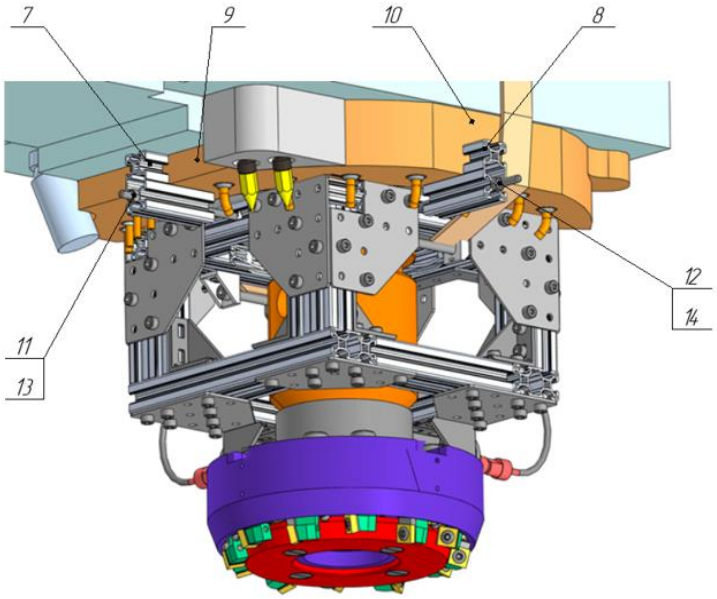


Рис.3. Кронштейн с датчиками при виде сзади-слева (с обратной стороны)

Каркас кронштейна (рис.2 и рис.3) размером 204 х 204 х 126 мм состоит из отрезков анодированных алюминиевых конструкционных профилей AL-PS-2040 и AL-PS-2020 сечением соответственно 20 х 40 мм и 20 х 20 мм, имеющих на боковых сторонах сквозные Т-образные пазы шириной 6 мм. Соединение профилей выполнено с использованием стальных Г-образных соединителей, угольников, сухарей (Т-гаек), винтов М5 с внутренним шестигранником. Для обеспечения надежности работы соединений при вибрациях винты затянуты динамометрическим ключом с моментом 6 Н·м.

Кронштейн 1 базируется по наружной цилиндрической поверхности 2 неподвижной гильзы шпинделя пальцами 3 и 4. Эти пальцы являются цилиндрическими головками винтов, установленных с помощью Т-гаек в пазах консольно закрепленных на каркасе профилей 5 и 6. Закрепление кронштейна 1 в радиальном к оси шпинделя направлении выполняют с помощью ползунов 7 и 8, расположенных диаметрально напротив соответственно пальцев 3 и 4 и прижимаемых к взаимно перпендикулярным площадкам 9 и 10 на кронштейне патрубков для подачи СОЖ. Передвижение ползунов осуществляют вращением гаек 11 и 12, навернутых на винты 13 и 14, которые своими головками установлены в Т-образных пазах каркаса. Для прижима кронштейна 1 верхней опорной поверхностью к неподвижному торцу гильзы шпинделя используют тканый ремень 15 сечением 25 х 3 мм, затягиваемый храповым натяжителем 16. От сползания ремня 15 по головке шпинделя служит второй перпендикулярно расположенный ремень 17 с натяжителем 18. На нижней поверхности кронштейна 1 закреплены угольники 19 и 20, несущие токовихревые датчики 21 и 22, расположенные в направлениях подачи обрабатываемой детали и перпендикулярно ей. Датчики 21 и 22 своими наружными резьбовыми поверхностями вкручены в резьбовые отверстия угольников 19 и 20 и застопорены гайками 23 и 24.

Каждый токовихревой датчик мод. AP2100A-V-08.05.0 связан посредством гибкого кабеля со своим драйвером перемещения мод. D210-05.05, от которого сигнал поступает на компактный модуль обработки и сбора данных ZET Lab230, являющийся аналого-цифровым преобразователем, и далее на персональный компьютер. На этот же компьютер поступает сигнал от фрезерного динамометра. Достоинством модуля ZET Lab230 является простота использования и создание на персональном компьютере виртуального осциллографа, на экране которого совместно отображаются две осциллограммы контролируемых параметров вибросмещения инструмента по обеим координатам и три осциллограммы изменения динамических составляющих силы резания.

Таким образом, разработанная экспериментальная установка позволяет проводить комплексный контроль вибродиагностики вращающихся инструментов. Она может быть полезна при оценке эффективности подавления вибраций новыми прогрессивными конструкциями инструментов, отработке безвибрационных режимов резания, изучения влияния различных факторов на износ инструмента и многих других исследованиях, проводимых в лабораториях учебных заведений и промышленных предприятий.

Литература:

1. Остафьев В.А., Антонюк В.С., Тымчик Г.С. Диагностика процесса металлообработки // Тэхника – К.: 1991. – 152 с.

2. Палей С.М., Васильев С.В. Контроль состояния режущего инструмента на станках с ЧПУ: Обзор. – М.: НИИмаш, 1983. – 52 с.

3. Кибальченко А.В. Контроль состояния режущего инструмента: Обзорная информация. – М.: ВНИИТЭМР, 1986. – 44 с.

4. Севастьянов А.А., Селиванов А.С. 2016 Мониторинг износа режущего инструмента при токарной обработке на станках с чпу // Символ науки №11-3. 2016. С. 144-148.

5. Сидоров А.С. Мониторинг и прогнозирование износа режущего инструмента в мехатронных станочных системах: Дис. к.т.н. Уфа. УГАТУ. 2007. - 201 с.

6. Данг Хыу Чонг, Повышение эффективности концевого и торцевого фрезерования на основе контроля износа фрез по уровню вибрации.: канд. техн. наук: 05.02.07 // ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет», 2021 — 140 с.

7. Соломенцев Ю.М., Митрофанов В.Г., Протопопов С.П. [и др.]. Адаптивное управление технологическими процессами – М.: Машиностроение, 1980. – 536 с.

8. Литвинчук А. Ю. Анализ спектра вибрации режущего инструмента // Решетневские чтения. 2011. №15. С. 345-346.

9. Лукьянов А.В., Алейников Д.П. Исследование пространственной вибрации обрабатывающего центра в режиме фрезерования // Системы. Методы. Технологии .2014. № 1 (21) С. 96-101.

10. Сазонов М.Б., Жидяев А.Н. Исследование вибраций концевых фрез при обработке титанового

сплава ВТ9 // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2021. Т. 20, № 4. С. 89-99. DOI: 10.18287/2541-7533-2021-20-4-89-99.

11. Янов Е.С., Антонычев С.В., Анцев А.В. [и др.]. Исследование способов контроля состояния фрезерных станков на основе анализа вибрационных характеристик // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2024. № 3. С. 157–166. doi: 10.21685/2072-3059-2024-3-14

12. Печенин В.А., Жидяев А.Н., Печенина Е.Ю. [и др.]. Разработка методики ранней диагностики износа фрез по параметрам вибраций для мониторинга качества изготовления деталей ГТД // Динамика и виброакустика. – 2025. – Т. 11, №3. – С. 108-117.

DOI: 10.18287/2409-4579-2025-11-3-108-117

13. Wei C., Xiong Y., Li W., Fan W., Peng Z., Meng G. Vibration Measurement and Analysis of Rotary Tools Using Millimeter-Wave Sensor // *IEEE Sensors Journal*, vol. 24, no. 6, pp. 8962-8971, 15 March15, 2024, doi: 10.1109/JSEN.2024.3361683.

14. Артамонов Е.В., Васильев Д.В., Воронин В.В. Диагностика токарной обработки металлов резанием посредством анализа вибрационных параметров // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(4): 18-28. https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-18-28.

15. Янов Е.С., Анцев А.В., Воротилин М.С. Исследование влияния износа режущего инструмента на вибрацию тонкостенных заготовок при точении : монография – Тула : Изд-во ТулГУ, 2024. – 173 с.

16. Свинин В.М., Ушаков В.А., Тихонов А.Г. [и др.]. Динамометрический расточной резец // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 2. С. 263–283. EDN: QGFKDB, https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-263-283.

17. Янов Е.С., Антонычев С.В., Анцев А.В. [и др.]. Исследование способов контроля состояния фрезерных станков на основе анализа вибрационных характеристик // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2024. № 3. С. 157–166. doi: 10.21685/2072-3059-2024-3-14.

Vibration monitoring experimental setup for rotating metal-cutting tools

Svinin V.M.[1,a], Irincheev A.A.[1,b], Vladimirov L.M.[1,c], Inak S.V.[1,d], Amenenko T.P. [1,e]

[1] Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Lermontov Street, 83, Russia

[a]svinin_vm@mail.ru, [b]andrey.iaa2000@yandex.ru, [c]mixvladimile@gmail.com, [d]sergejinak@gmail.com, [e]tanaamenenko@gmail.com

Keywords: vibration control, rotating metal-cutting tools, eddy current sensors, bracket.

Among the various methods of cutting process diagnostics, vibration□based monitoring of cutting tool condition occupies a significant place. To implement this method, various types of sensors are used, including eddy current sensors, which have the advantage of non□contact measurement. An experimental setup for vibration monitoring of rotating metal□cutting tools has been developed at INRTU, using the DMG DMU 80P Duo Block machining center as a platform. The setup enables measurement of vibration displacement of the mandrel neck with the tool mounted on it along two axes using eddy current sensors mounted on a bracket. Additionally, it acquires data on the three components of the cutting force by using a Kistler Type 9253B23 dynamometer and displays these parameters on a computer screen as five oscillograms. Comprehensive vibration diagnostics monitoring is used at INRTU to evaluate the effectiveness of vibration suppression by new advanced designs of face mills and multi□tooth boring heads.

УДК 004.932.2

Применение стереозрения в машиностроении для бесконтактного измерения деталей

Исаченко А.С.[1,a], Гарбуза А.С.[1,b], Старновская В.В.[1,c]
[1]Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова, 83, г. Иркутск, Россия
[a] isachenkoas@ex.istu.edu, [b] sasha.garbuza.03@mail.ru, [c] valeria.starnovskaya@yandex.ru

Ключевые слова: стереозрение, бесконтактные измерения, машиностроение, контроль геометрии, цифровое производство, компьютерное зрение.

В работе рассматриваются возможности применения систем стереозрения для бесконтактного измерения геометрических параметров деталей в машиностроении. Целью исследования является анализ принципов функционирования стереоскопических систем и оценка их применимости в задачах автоматизированного контроля размеров и формы изделий. Рассмотрены принцип работы стереозрения, включая расчет глубины по диспаритету, а также ключевые этапы подготовки системы: калибровка камер и построение карт глубины. Выполнено сравнение стереозрения с традиционными контактными методами измерения и лазерным сканированием. Показано, что стереосистемы обладают значительным потенциалом для внедрения в цифровое производство благодаря возможности работы в реальном времени, интеграции с промышленным оборудованием и обеспечению высокой скорости контроля при приемлемой точности. Проведено экспериментальное сравнение алгоритмов StereoBM и StereoSGBM, показано преимущество алгоритма StereoSGBM по плотности карты глубины и качеству трёхмерной реконструкции.

Современное машиностроение характеризуется высокими требованиями к точности изготовления деталей и сокращению производственных циклов. Контроль геометрических параметров изделий является обязательным этапом технологического процесса и оказывает непосредственное влияние на качество продукции. Традиционные методы измерения основаны на использовании контактных средств контроля: штангенциркулей, микрометров, координатно-измерительных машин и других приборов. Несмотря на высокую точность, такие методы обладают рядом недостатков: низкой скоростью измерений, ограничениями при работе с мягкими или чувствительными поверхностями, а также невозможностью контроля сложных геометрических форм без значительных временных затрат.

В условиях перехода к цифровому производству и внедрения интеллектуальных систем управления возрастает интерес к бесконтактным методам измерения. Одним из перспективных направлений является применение систем стереоскопического зрения, позволяющих восстанавливать пространственную структуру объекта по двум изображениям и определять его геометрические параметры без механического воздействия [1,2].

Целью данной работы является рассмотрение принципов применения стереозрения в качестве инструмента бесконтактного измерения деталей машиностроения и обоснование возможности создания относительно недорогих измерительных систем на основе стандартных цифровых камер.

Стереозрение представляет собой метод получения информации о трёхмерной структуре сцены на основе анализа изображений, полученных с двух или более камер. Основная идея метода заключается в использовании различий между изображениями одного и того же объекта, полученных с разных точек наблюдения. Геометрическая модель

стереосистемы предполагает наличие стереобазы и фокусного расстояния объективов, при этом координаты пространственной точки определяются по её проекциям на матрицы камер.

На рис. 1 представлена геометрическая модель стереосистемы, пусть координаты точка на левом изображении обозначены как x, а координаты соответствующей точки на правом изображении - x′. Разность координат по горизонтали называется диспаритетом (disparity) и является ключевой величиной в системах стереозрения.

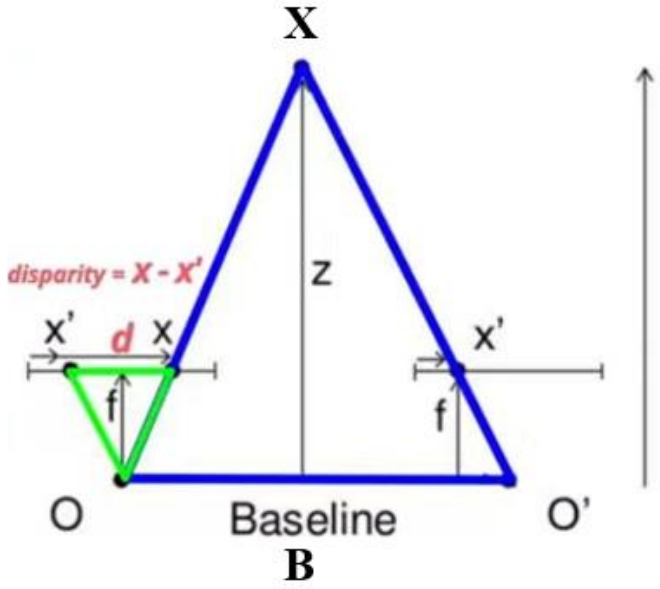


Рис. 1. Геометрическая модель стереосистемы

Связь между диспаритетом и глубиной точки может быть выражена формулой 1:

$$z = \frac{f*B}{d} \quad (1)$$

где f – фокусное расстояние камеры; z – расстояние до объекта; B – расстояние между камерами; d – диспаритет.

Таким образом, зная параметры камер и вычислив диспаритет для каждой точки изображения, можно определить пространственные координаты точек объекта [3]. На основе найденных соответствий строится карта глубины – распределение расстояний до каждой точки наблюдаемой сцены [4].

Стереозрение позволяет восстановить трехмерную форму объекта без непосредственного контакта с ним. Это делает данный метод особенно перспективным для задач промышленного контроля.

Применение стереозрения в машиностроении. Для использования стереозрения в задачах измерения деталей необходимо создать специализированную измерительную систему, включающую оптическое оборудование, вычислительный модуль и программное обеспечение для обработки изображений.

Рабочая область системы представляет собой измерительный стол или платформу, на которой размещается исследуемая деталь. Над рабочей областью устанавливаются две камеры, закрепленные на жесткой раме на определенном расстоянии друг от друга. Расстояние между камерами выбирается исходя из размеров измеряемых объектов и требуемой точности измерений. Чем больше база стереосистемы, тем выше потенциальная точность определения глубины.

Для корректной работы системы необходимо выполнить калибровку камер. Калибровка включает определение внутренних параметров камеры (фокусного расстояния, положения главной точки, коэффициентов дисторсии) и внешних параметров (положения и ориентации камеры в пространстве) на основе наблюдения за плоской шахматной доской с известным расстоянием между клетками [5].

Сначала изображения проходят предварительную обработку, которая может включать коррекцию искажений, нормализацию яркости и фильтрацию шумов. Далее выполняется процедура стереосопоставления, в ходе которой для каждой точки одного изображения определяется соответствующая точка на втором изображении. На основе найденных соответствий вычисляется карта глубины.

Следующим этапом является построение трехмерного облака точек, представляющего геометрию поверхности детали. Каждая точка облака содержит координаты в пространстве, что позволяет измерять расстояния между точками, определять размеры элементов и анализировать геометрию объекта. Таким образом, из набора изображений формируется цифровая трехмерная модель детали.

Одной из ключевых проблем применения стереоскопических систем при контроле деталей машиностроения является недостаточная текстурированность поверхности измеряемых объектов. Металлические детали, особенно после механической обработки, часто обладают однородной или слабо выраженной текстурой, что затрудняет корректное сопоставление соответствующих точек на левом и правом изображениях. Для повышения плотности и достоверности восстановления трёхмерной модели целесообразно применение пучкового лазера, формирующего на поверхности детали характерный световой рисунок, который позволит обеспечивать наличие устойчивых опорных признаков для алгоритма сопоставления.

Сравнение с существующими методами измерений. Контактные измерительные инструменты обеспечивают высокую точность и широко используются при контроле геометрических параметров деталей. Однако их применение может быть ограничено при измерении сложных поверхностей или при необходимости автоматизации процесса контроля.

Оптические методы, в частности лазерное сканирование, позволяют получать трехмерные модели объектов и проводить измерения без физического контакта с поверхностью. Такие системы обладают высокой точностью и скоростью сбора данных, однако их использование связано со значительными затратами на оборудование и программное обеспечение [6].

Предлагаемый метод на основе стереозрения сочетает преимущества бесконтактных измерений и сравнительно невысокую стоимость реализации. Использование цифровых камер и алгоритмов компьютерного зрения позволяет получать трехмерную информацию о геометрии детали и проводить измерения в автоматическом режиме. При правильной калибровке системы и организации освещения точность измерений может быть достаточной для решения широкого круга задач промышленного контроля.

Для практической реализации алгоритмов стереосопоставления использована библиотека компьютерного зрения OpenCV (Open Source Computer Vision Library). Она содержит реализацию большинства классических алгоритмов стереозрения и предоставляет готовые инструменты для калибровки камер, ректификации изображений и вычисления карт диспаритета.

В модуле стереозрения OpenCV представлены два основных алгоритма построения карты диспаритета. Алгоритм StereoBM (Block Matching) реализует метод локального блочного сопоставления: для каждого пикселя левого изображения в строке правого изображения ищется наиболее похожий блок пикселей заданного размера. Метод отличается высокой скоростью вычислений и пригоден для работы в режиме реального времени, однако чувствителен к однородным поверхностям с низкой текстурированностью. Алгоритм StereoSGBM (Semi-Global Block Matching) реализует метод полуглобального блочного сопоставления, предложенный Хиршмюллером [7]: помимо локального критерия схожести блоков, метод минимизирует глобальную функцию стоимости вдоль нескольких направлений сканирования, штрафуя резкие изменения диспаритета между соседними пикселями. Это обеспечивает пространственную согласованность карты глубины и более

высокое качество реконструкции, особенно в областях со слабой текстурой, ценой увеличения вычислительной сложности.

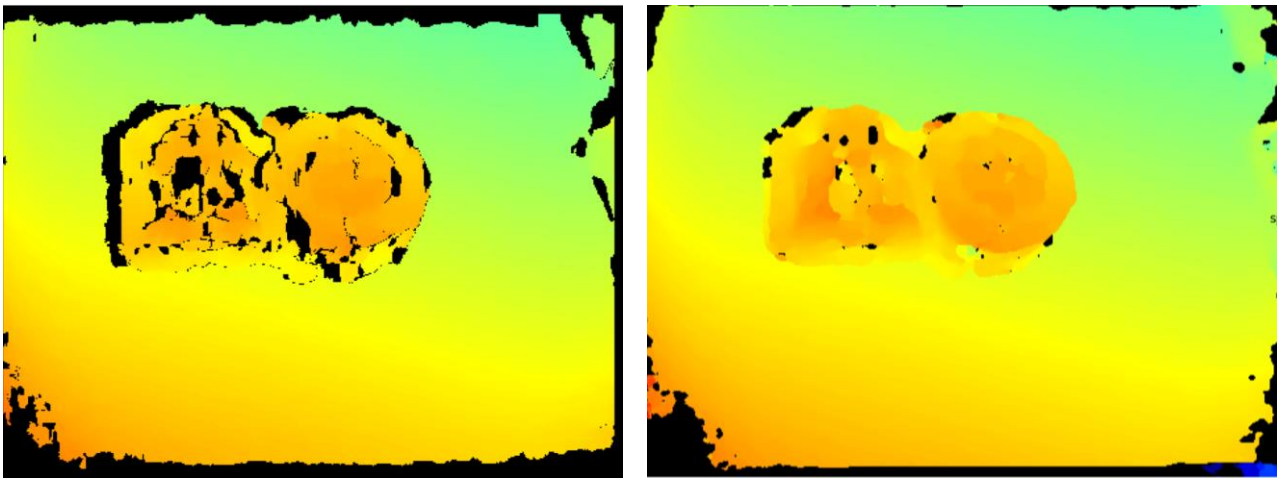
Для практической оценки рассмотренных методов стереозрения проведено сравнение двух алгоритмов вычисления диспаритета, реализованных в библиотеке OpenCV: блочного сопоставления StereoBM и полуглобального блочного сопоставления StereoSGBM. На рис. 2 представлены полученные левой и правой камерами стереосистемы исходные изображения тестовой сцены, включающей горизонтальную поверхность с расположенными на ней объектами.

а) *б)*

Рис. 2. Исходные изображения тестовой сцены:
а – левый кадр стереокамеры, *б* – правый кадр стереокамеры

Перед вычислением диспаритета выполнялась ректификация изображений на основе параметров калибровки стереокамеры, полученных методом Чжана с использованием шахматной доски [5]. Фокусное расстояние и база стереосистемы извлекались из матрицы калибровки, что позволило перевести значения глубины в реальные единицы измерения (мм) по формуле (1).

На рис. 3 представлены карты глубины, полученные двумя методами. Карта алгоритма StereoBM содержит характерные разрывы и неопределённые области, особенно выраженные на поверхности стола: локальный характер алгоритма не позволяет надёжно установить соответствие пикселей в зонах с низкой текстурированностью. Карта глубины, построенная алгоритмом StereoSGBM, демонстрирует значительно более высокую плотность и равномерность. Полуглобальная оптимизация учитывает взаимосвязь диспаритетов соседних пикселей, что подавляет локальные ошибки сопоставления и обеспечивает непрерывность карты глубины.



а) *б)*

Рис. 3. Карты глубины тестовой сцены, построенные алгоритмами стереосопоставления:
а – StereoBM, *б* – StereoSGBM

На рис. 4-5 представлены трёхмерные облака точек, построенные по картам глубины обоих методов. Модель StereoBM содержит значительное количество выбросов и разрывов: геометрия сцены восстановлена фрагментарно. Облако точек StereoSGBM воспроизводит структуру сцены значительно более полно: горизонтальная плоскость стола хорошо выражена, объекты геометрически обособлены и имеют более связную форму поверхности.

а) *б)*

Рис. 4. Трёхмерное облако точек, построенное методом StereoBM:
а – вид со стороны камеры, *б* – вид сбоку

а) *б)*

Рис. 5. Трёхмерное облако точек, построенное методом StereoSGBM:
а – вид со стороны камеры, *б* – вид сбоку

Таким образом, по критериям плотности карты глубины и качества трёхмерной реконструкции алгоритм StereoSGBM демонстрирует преимущество для данного типа сцен. Вместе с тем алгоритм StereoBM обладает существенно меньшей вычислительной сложностью, что делает его предпочтительным в задачах с жёсткими требованиями к скорости обработки.

В работе рассмотрены возможности применения систем стереозрения для бесконтактного измерения деталей машиностроения. Показано, что использование двух камер и алгоритмов сопоставления изображений позволяет восстанавливать пространственную геометрию объектов и получать облако точек поверхности детали. На основе полученных данных может быть построена цифровая модель изделия, пригодная для измерения геометрических параметров и сравнения с эталонной CAD-моделью. Предложенный подход обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционными методами контроля: отсутствием контакта с поверхностью, высокой скоростью измерений и относительно низкой стоимостью оборудования. Экспериментальное сравнение алгоритмов StereoBM и StereoSGBM показало, что метод полуглобальной оптимизации обеспечивает более высокое качество трёхмерной реконструкции, особенно на поверхностях с низкой текстурированностью, что подтверждает его перспективность для задач промышленного контроля.

Литература:

1. Вахитов, А. Т. Обзор алгоритмов стереозрения / А. Т. Вахитов, Л. С. Гуревич, Д. В. Павленко // Стохастическая оптимизация в информатике. – 2008. – Т. 4. – С. 151-169.
2. Lopez-Medina F., Núñez-López J. A., Sergiyenko O., Molina-Quiroz D., Sepulveda-Valdez C., Herrera-García J. R., Tyrsa V., Alaniz-Plata R. Vision-Based Characterization of Gear Transmission Mechanisms to Improve 3D Laser Scanner Accuracy // Metrology. – 2025. – Vol. 5, №. 4. – P. 58.
3. Нгуен, В. Ш. Определение положения точек в пространстве с использованием стереозрения / В. Ш. Нгуен // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2017. – № 9-1. – С. 149-153.
4. Коняшов, В. В. Построение карты глубины и оценка расстояния до объекта с помощью системы стереозрения / В. В. Коняшов, А. С. Сергеев; науч. рук. А. В. Федоров // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых: электронное издание. – Санкт-Петербург: Университет ИТМО, [2023]. – URL: https://kmu.itmo.ru/digests/article/9887 (дата обращения: 25.02.2026).
5. Zhang, Z. A flexible new technique for camera calibration / Z. Zhang // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2000. – Vol. 22, № 11. – P. 1330-1334.
6. Тимохов, Ф. С. Метод оценки качества изготовленных деталей при помощи лазерного 3D сканера / Ф. С. Тимохов, А. И. Смородин, А. В. Сидоров; науч. рук. Ю. Г. Малахова // Актуальные проблемы авиации и космонавтики – 2022: сборник материалов конференции. – Красноярск: Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева, 2022. – Т. 2. – с. 786-788.
7. Hirschmüller H. Stereo Processing by Semiglobal Matching and Mutual Information // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. — 2008. — Vol. 30, № 2. — P. 328–341.

Application of Stereo Vision in Mechanical Engineering for Non-Contact Measurement of Parts

Isachenko A.S. [1,a], Garbuza A.S. [1,b], Starnovskaya V.V. [1,c]
[1]Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontov st., Irkutsk, Russian Federation
[a]isachenkoas@ex.istu.edu,[b] sasha.garbuza.03@mail.ru, [c] valeria.starnovskaya@yandex.ru

Keywords: stereo vision, non-contact measurement, mechanical engineering, geometry inspection, digital manufacturing, computer vision.

This paper examines the potential of stereo vision systems for non-contact measurement of geometric parameters of mechanical engineering parts. The aim of the study is to analyze the operating principles of stereoscopic systems and assess their applicability for automated inspection of product dimensions and shape. The principles of stereo vision are considered, including depth estimation from disparity, as well as the key system preparation stages: camera calibration and depth map generation. A comparison of stereo vision with traditional contact measurement methods and laser scanning is carried out. It is shown that stereo vision systems have significant potential for integration into digital manufacturing due to their real-time operation capability, compatibility with industrial equipment, and ability to provide high-speed inspection at acceptable accuracy. A comparative experiment was conducted between the StereoBM and StereoSGBM algorithms. The results demonstrate the superiority of the StereoSGBM algorithm in terms of disparity map density and 3D reconstruction quality.

УДК 621.92+004.67

Разработка программного обеспечения для оптимизации наладки резьбошлифовальных станков

Матлыгин Г.В.[1,a], Гарбуза А.С.[1,b], Старновская В.В.[1,c]
[1]Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова, 83, г. Иркутск, Россия
[a] matlygingv@ex.istu.edu, [b] sasha.garbuza.03@mail.ru, [c] valeria.starnovskaya@yandex.ru

Ключевые слова: резьбошлифование, наладка оборудования, зубчатые колеса, автоматизация, программное обеспечение, Python, оптимизация.

В статье рассматривается актуальная проблема машиностроительного производства – высокая трудоемкость и риск ошибок при наладке резьбошлифовальных станков, в частности моделей Mikromat GSU-315 и 5К822. Существующий процесс подбора сменных зубчатых колес гитары деления выполняется инженерами-технологами вручную, занимает длительное время и несет за собой риск ошибки, что может привести к простоям оборудования и браку дорогостоящих деталей. Особенностью настройки данных станков является наличие двух диапазонов шагов резьбы, требующих применения различных расчетных формул. Целью работы является снижение трудоемкости расчетов и рисков ошибки, за счет создания специализированного программного обеспечения для автоматизации расчета и подбора оптимальных комбинаций зубчатых колес с автоматическим выбором нужной формулы в зависимости от заданного шага. В основе алгоритма лежит прямой перебор всех возможных комбинаций из доступного набора колес с проверкой соответствия расчетного шага резьбы заданному. Применение разработки позволяет существенно повысить эффективность использования оборудования и снизить издержки производства.

Современное машиностроительное производство характеризуется высокой номенклатурой изготавливаемых изделий и необходимостью частой переналадки оборудования. В условиях мелкосерийного и единичного производства важную роль играет оперативность технологической подготовки производства [1]. Одной из распространенных операций является нарезание резьбы на токарных станках. Для получения требуемого шага резьбы необходимо правильно подобрать гитару сменных зубчатых колес в кинематической цепи станка (рис.1). Актуальность работы заключается в том, что при подборе гитары сменных колес, важно учитывать необходимость замены изношенных колес, в период их ремонта и изготовления вновь.

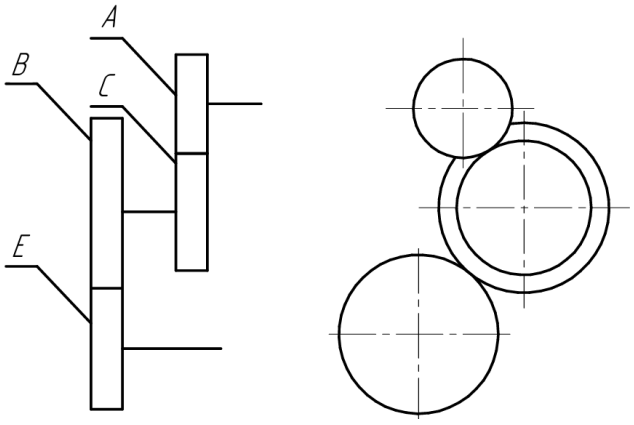


Рис. 1. Кинематическая схема гитары сменных зубчатых колес

- A – ведущее колесо (устанавливается на валу, который входит в зацепление с валом шпинделя);
- C – промежуточное колесо (находится в зацеплении с колесом A);
- B – промежуточное колесо (установлено на одном валу с колесом C);
- E – ведомое колесо.

Таким образом, передаточное отношение гитары определяется произведением двух простых передач: (A/C) × (B/E).

Традиционно данный процесс выполняется инженером-технологом вручную на основе справочных таблиц и расчетных формул. Такой подход требует значительного времени, особенно при необходимости поиска нестандартных шагов резьбы. Кроме того, существует риск ошибок в расчетах, которые могут привести к браку деталей или дополнительным затратам времени на переналадку оборудования. Одним из эффективных способов повышения эффективности технологической подготовки производства является автоматизация расчетных процедур с использованием специализированного программного обеспечения [2,3]. Целью данной работы является разработка специализированного программного обеспечения, позволяющего автоматизировать процесс подбора сменных зубчатых колес с автоматическим выбором нужной кинематической формулы в зависимости от заданного шага и учетом актуального состояния парка оснастки, что обеспечит минимизацию ошибок и существенное сокращение времени наладки.

Особенностью резьбошлифовальных станков моделей Mikromat GSU-315 и 5К822 является наличие двух диапазонов настройки, определяемых величиной шага нарезаемой резьбы. Разрабатываемое программное обеспечение предназначено для автоматического подбора комбинаций зубчатых колес, обеспечивающих требуемый шаг резьбы.

Для шага резьбы S в диапазоне от 0,25 до 2,5 мм должно выполняться условие по формуле (1):

$$\mathrm{i} = \frac{\mathrm{A}*\mathrm{B}}{\mathrm{C}*\mathrm{E}} = \frac{6*\mathrm{S}}{25.4} \quad (1)$$

Для шага резьбы S в диапазоне от 3 до 24 мм используется формула (2) с дополнительным редуктором 1:4:

$$i = \frac{A*B}{C*E} = \frac{6*S}{4*25.4} \quad (2)$$

где: i – передаточное отношение гитары сменных колес; S – заданный шаг резьбы (мм); A, B, C, E – количество зубьев на зубчатых колесах кинематической цепи станка; 6 – шаг ходового винта станка (мм); 25,4 – коэффициент перевода дюймов в миллиметры; 4 – передаточное отношение дополнительной редукторной вставки для диапазона крупных шагов.

Несмотря на кажущуюся простоту формулы, практическая реализация этого процесса сопряжена с рядом серьезных проблем. Как справедливо отмечается в работах, посвященных автоматизации подготовки производства [4], человеческий фактор и использование устаревших справочных данных являются основными источниками потерь времени и ресурсов. Технолог тратит до двух часов на ручной расчет и перебор возможных комбинаций по таблицам. Ошибка в расчетах или неверный учет имеющихся шестерен приводит к двойным потерям: браку дорогостоящей детали или партии деталей и простою станка или парку станков.

Таким образом, существующая практика ручного подбора зубчатых колес для резьбошлифовальных станков характеризуется высокой трудоемкостью, значительными временными затратами и повышенным риском ошибок, что негативно сказывается на эффективности производства. Автоматизация данной процедуры путем создания специализированного программного обеспечения, является актуальной научно-технической задачей, решение которой позволит существенно сократить время наладки и исключить влияние человеческого фактора.

Для решения поставленной задачи было разработано программное обеспечение на языке Python. Выбор данного языка обусловлен его широкими возможностями для математических вычислений, наличием богатого набора библиотек. Алгоритм поиска комбинаций основан на полном переборе всех возможных перестановок четырех колес из доступного набора. Для каждого набора (A, C, B, E) вычисляется расчетный шаг резьбы по формулам (1, 2).

На рис. 2 приведен пример работы программы. Для заданного шага резьбы 1,5 мм (диапазон мелких шагов) с допуском 0,001 мм программа за несколько секунд нашла несколько подходящих комбинаций, используя формулу (1).

```
================================================================================
ИТОГИ ПОИСКА:
Найдено реальных комбинаций: 1
РЕАЛЬНЫЕ            : A= 30 C= 32 B= 48 E=127 | Шаг: 1.500000 | Ошибка: 0.000000 | Отношение: 0.3543

Найдено гипотетических комбинаций: 37534
при ±1: 15699
при ±2: 13616
при ±3: 8219
```

Рис. 2. Пример вывода результатов поиска комбинаций зубчатых колес

Важно отметить, что программа автоматически определяет необходимость применения формулы (2) с редуктором 1:4 для шагов более 2,5 мм, что исключает ошибки технолога при выборе диапазона настройки станка. Помимо сокращения времени, важнейшим результатом является полное исключение ошибок, возможных при ручном расчете, а также ошибок, связанных с неправильным выбором диапазона настройки. Система также учитывает только те колеса, которые технолог отметил как имеющиеся в наличии, что исключает ситуацию, когда рассчитанная комбинация не может быть реализована на практике.

В результате выполнения работы разработано специализированное программное обеспечение для автоматизации подбора сменных зубчатых колес резьбошлифовальных станков Mikromat GSU-315 и 5К822. Программа полностью соответствует кинематической схеме оборудования с обозначениями колес A, C, B, E и реализует две формулы расчета в зависимости от диапазона шага резьбы (0,25–2,5 мм и 3–24 мм). Алгоритм, реализованный на языке Python, выполняет полный перебор доступных комбинаций колес с учетом их фактического наличия и степени износа, ранжирует результаты по точности и обеспечивает автоматический выбор нужной кинематической формулы.

Литература:

1. Исаченко, А. С. Сокращение времени переналадки в цехах изготовления оснастки для заготовительно-штамповочного производства / А. С. Исаченко, Д. А. Журавлев // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2018. – Т. 22, № 10(141). – С. 20–28.

2. Программа для подбора корпуса и пластины токарного резца: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021616697 / В. Д. Пономарева, А. И. Фасхутдинов; правообладатель ПАО «КАМАЗ». – № 2021615714

3. Groover, M. P. Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems. – 6th ed. – Hoboken: Wiley, 2020.

4. Бондаренко, Н. В. Система расчета припуска для механической обработки деталей / Н. В. Бондаренко, И. В. Татаринцев, М. В. Соколов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2025. – № 7.

Development of Software for Optimizing the Setup of Thread Grinding Machines

Matlygin G.V.[1,a], Garbuza A.S.[1,b], Starnovskaya V.V.[1,c]
[1]Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontov st., Irkutsk, Russian Federation
[a]matlygingv@ex.istu.edu, [b]sasha.garbuza.03@mail.ru, [c]valeria.starnovskaya@yandex.ru

Keywords: thread grinding, equipment setup, gears, automation, software, Python, optimization

This paper addresses a critical issue in mechanical engineering manufacturing: the high labor intensity and risk of errors associated with the setup of thread grinding machines, specifically the Mikromat GSU-315 and 5K822 models. The current process of selecting change gears for the division gear train is performed manually by process engineers. This manual selection is time-consuming and carries a significant risk of errors, potentially leading to machine downtime and the scrapping of high-cost components. A distinctive feature of configuring these machines is the presence of two thread pitch ranges, each requiring the application of different calculation formulas. The objective of this work is to reduce computational labor and mitigate error risks by developing specialized software. This software automates the calculation and selection of optimal gear combinations, with automatic formula selection based on the specified thread pitch. The underlying algorithm employs an exhaustive search of all feasible combinations from the available gear set, verifying the calculated thread pitch against the target value. The implementation of this development significantly enhances equipment utilization efficiency and reduces production costs.

УДК 621.373.31

Исследование режимов электромеханического упрочнения на физико-механические свойства и качество поверхностей деталей

Марков А. Н.[1,a], Марков В. А.[1,b], Войнаш С. А.[2,c], Наседкин И.В.[3,d], Вохмянин Н.А. [4,e]
[1]Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, Высшая школа технологии и энергетики, ул. Ивана Черных 4, Санкт-Петербург, Россия
[2]Рубцовский индустриальный институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», ул. Тракторная 2/6, Рубцовск, Россия
[3]Военная орденов Жукова и Ленина Краснознаменная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного», Тихорецкий проспект, д. 3, Санкт-Петербург, Россия
[4]Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, Институтский пер., д.5, Санкт-Петербург, Россия
[a]markovan-63@mail.ru, [b]mactor85@mail.ru, [c]sergeyvoinash@yandex.ru, [d]nasedkin.i@rambler.ru, [e]nvohm@mail.ru

Ключевые слова: электромеханическое упрочнение, поверхностный слой, микротвердость, шероховатость поверхности, глубина упрочненного слоя, износостойкость, остаточные напряжения, восстановление деталей, режимы обработки, металлопокрытия.

В статье рассмотрены физические основы электромеханического упрочнения (ЭМУ) деталей, заключающегося в сочетании термического и силового воздействия на поверхностный слой. Описаны состав оборудования и оснастка для реализации метода на токарных станках. Представлены результаты экспериментальных исследований влияния

режимов ЭМУ (силы тока, напряжения, усилия, скорости) на микротвердость, шероховатость и глубину упрочненного слоя. Приведены эмпирические зависимости, полученные для различных способов предварительного восстановления деталей (наплавка в CO_2, электроконтактная наплавка, железнение). Показано, что применение ЭМУ позволяет значительно повысить износостойкость (в 1,4–1,8 раза) и предел выносливости деталей, а также улучшить прочность сцепления покрытий с основным металлом.

Электромеханическое упрочнение основано на сочетании термического и силового воздействия на поверхностный слой обрабатываемой детали. Сущность этого способа заключается в том, что в процессе обработки через место контакта инструмента с изделием проходит ток большой силы и низкого напряжения, вследствие чего выступающие гребешки поверхности подвергаются сильному нагреву, под давлением инструмента, деформируются и сглаживаются, а поверхностный слой металла упрочняется [1].

Электромеханическое упрочнение (ЭМУ) – окончательная чистовая операция, при помощи которой можно повысить чистоту поверхности после обработки резцом, заменив, таким образом, шлифование; этим способом можно повысить твердость поверхностного слоя в 2…4 раза и увеличить износостойкость контактной поверхности в 2…11 раз, в зависимости от исходной термообработки детали, а также повысить усталостную (циклическую) прочность детали в 2…6 раз, в зависимости от конструкции детали и характера переходных сечений [2]. Таким образом, электромеханическое упрочнение применяют на финишных операциях технологического процесса, вместо или после термической обработки, часто вместо абразивной и отделочной обработки [3].

Схема электромеханической обработки представлена на рис.1.

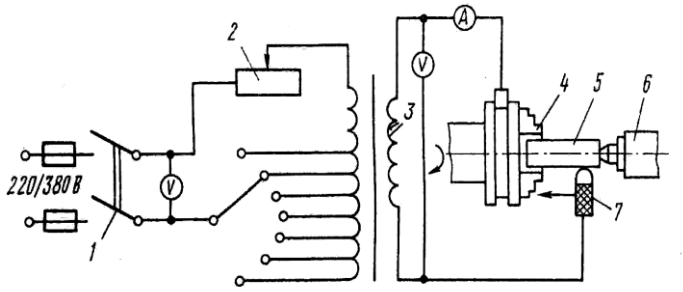


Рис. 1. Схема электромеханической обработки:
1 – рубильник; 2 – реостат; 3 – вторичная обмотка; 4 – патрон;
5 – деталь; 6 – задняя бабка; 7 – инструмент

Технология электромеханического упрочнения заключается в следующем. Обрабатываемую деталь устанавливают на токарном станке. Электрический ток силой 350…1500 А и напряжением 2…6 В поступает в зону контакта детали и инструмента от электросети 220/380 В через силовой понижающий трансформатор. При этом один конец вторичной обмотки трансформатора подводят к электроконтактному приспособлению, служащему для передачи тока к детали через вращающийся патрон, а другой – к инструменту, укрепленному изолированно в резцедержателе станка. В державке (инструменте) укреплена твердосплавная пластина, которая в процессе работы находится в контакте с вращающейся деталью. Электрическое сопротивление контакта велико, ввиду его малой площади, поэтому в месте контакта выделяется значительная электрическая энергия, которая мгновенно нагревает зону контакта до высокой температуры.

Поверхность детали, подвергаясь в месте контакта действию радиального усилия инструмента сглаживается, рис.2.

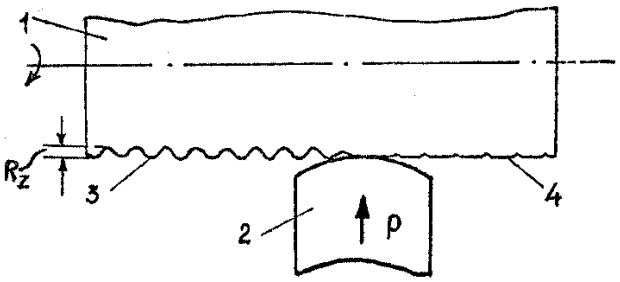


Рис. 2. Схема электромеханического упрочнения поверхности:
1 – деталь; 2 – выглаживающий ролик; 3 – первоначальная поверхность;
4 – поверхность после упрочнения

Объем высокотемпературного нагрева при этом ничтожно мал по сравнению с массой детали, следствием чего является высокая скорость охлаждения поверхностного слоя за счет отвода тепла внутрь детали и его закалка до высокой твердости.

Глубину упрочнения можно определить по формуле [1]:

$$\delta = \frac{K\mu\left(0{,}24\eta JU + \frac{Pvf}{42{,}7}\right)}{cvB\rho T_{\phi}} \qquad (1)$$

где K – коэффициент, учитывающий количество поглощаемой теплоты, K = 0,234; μ – коэффициент, определяющий количество теплоты, создаваемой в зоне контакта и отводимой в упрочняемую деталь (0,5…0,6); η – коэффициент, учитывающий потери во вторичной цепи трансформатора (0,42); J – сила тока А; U – напряжение тока во вторичной цепи, 2–6 В; P – нормальное давление, $P = 300 \ldots 600$ Н; v – скорость сглаживания; f – коэффициент трения (0,65…0,75); c – удельная теплоемкость металла, Дж/(г·°С); B – ширина контакта, мм; ρ – плотность, г/мм^3; T_{ϕ} – температура фазового превращения металла.

Державка для выполнения электромеханического упрочнения представлена на рис. 3.

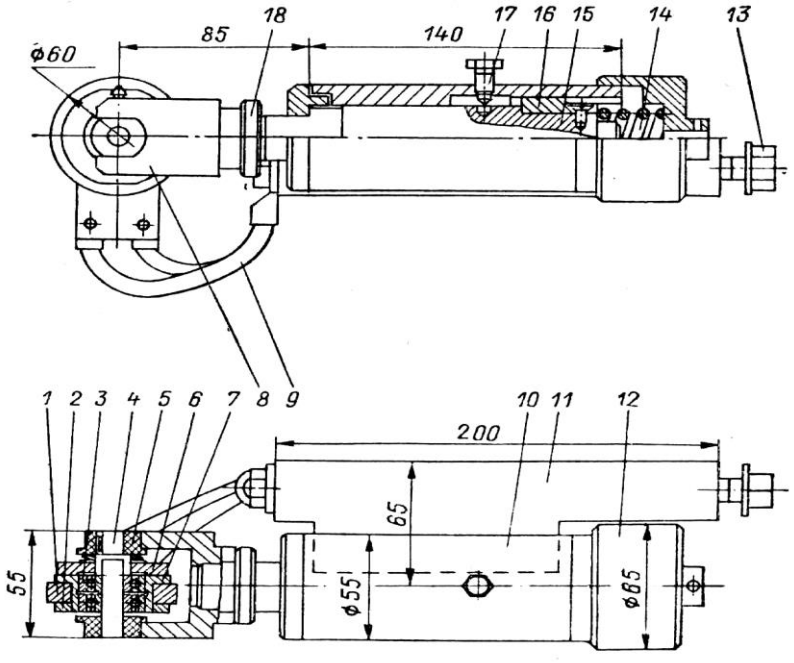


Рис. 3. Державка для выполнения электромеханического упрочнения:
1 – твердосплавное кольцо; *2* – шайба; *3* – подшипники; *4* – ось; *5* – изоляционная втулка; *6* – токосъемное кольцо; *7* – ролик; *8* – вилка; 9 – токоподводящая шина; *10* – корпус; *11* – место для крепления в резцодержателе; *12* – колпачковая гайка; *13* – гайка крепления токопровода;*14* – пружина; *15* – шток; *16* – шпонка; *17* – болт; *18* – гайка крепления вилки

Давление обрабатывающей пластины ЭМУ создает тангенциально направленную силу трения, которая способствует вытягиванию наружных слоев металла и возникновению растягивающих остаточных напряжений.

Учеными СПбГЛТУ им. С.М. Кирова были проведены исследования по оценке влияния режимов ЭМУ на микротвердости поверхности, шероховатости и глубины упрочнения применительно к наиболее распространенным маршрутам восстановления деталей.

В качестве образцов для проведения исследований ЭМУ выбирались детали, изготовленные преимущественно из углеродистых качественных сталей, наиболее распространенных в промышленном машиностроении и ремонте.

В результате обработки экспериментальных данных на деталях получены следующие зависимости выходных факторов (H_{50} – микротвердость, R_a – шероховатость поверхности, δ – глубина упрочнения) от режимов обработки при электромеханическом упрочнении покрытия, нанесенного наплавкой в CO_2 с последующим точением:

$$\begin{aligned} \mathrm{H}_{50} &= 1{,}0384 J^{0{,}9051} p^{0{,}1073} v^{-0{,}0127} s^{-0{,}459}; \\ R_a &= 0{,}0116\, J^{0{,}4855}\, p^{-0{,}3791} v^{0{,}7159} s^{-0{,}0323}; \\ \delta &= 0{,}0275 J^{0{,}4147} p^{0{,}0162} v^{-0{,}0971} s^{-0{,}0262} \end{aligned} \quad (2)$$

Применительно к электромеханическому упрочнению покрытия, полученного электроконтактной наплавкой (точение эльбором-Р) исходные зависимости, следующие:

$$\begin{aligned} \mathrm{H}_{50} &= 2182\, J^{1{,}14} p^{0{,}034} v^{-0{,}065} s^{-0{,}035} r^{-0{,}073}; \\ R_a &= 0{,}054\, J^{-2{,}343} p^{-0{,}225} v^{-0{,}013} s^{0{,}12} r^{0{,}082}; \\ \delta &= 0{,}95\, J^{1{,}787} p^{-0{,}102} v^{-0{,}21} s^{-0{,}09} r^{-0{,}07}. \end{aligned} \quad (3)$$

При упрочнении покрытия, полученного железнением, преимущество остается за вращающимся роликовым инструментом из сплава Т15К6 диаметром 40 мм и радиусом профиля 7 мм. Режимы электромеханического упрочнения деталей, восстановленных железнением: J = 650…850 А, v = 12…20 м/мин; p = 600…700 Н; S = 0,2…0,4 мм/об.; число проходов 1–2. В ряде случаев железнение снижает предел выносливости восстановленных деталей до 50%, в результате же применения ЭМУ он повышается на 63%, а для стали 45 превышает ее исходные значения на 13%. Прочность сцепления покрытия с основным металлом при ЭМУ превышается на 15…40%. Больший процент увеличения прочности относится к более глубокому упрочнению.

Сглаживание может производиться как подвижным, так и неподвижным инструментами. При одинаковых режимах электромеханической обработки глубина упрочненного слоя выше при сглаживании неподвижным инструментом. В этом случае имеет место трение скольжения, что приводит к образованию завихренной текстуры поверхностного слоя и более интенсивному измельчению его структуры. Детали, упрочненные подвижным инструментом, обладают большей выносливостью и износостойкостью, а также повышается микротвердость в 1,5…2 раза с глубиной упрочнения 0,3…0,4 мм [4, 5]. При работе неподвижным инструментом, имеющим радиусный профиль, на нем быстро образуется площадка. Поэтому на радиусе выполняют поясок шириной 0,5 мм, что в несколько раз увеличивает стойкость инструмента. Перед каждой очередной операцией инструмент – ролик поворачивают на угол 10…15º для обновления поверхности контакта. К недостаткам неподвижного инструмента относится его сравнительно небольшая стойкость.

Преимущества вращающегося ролика: высокая стойкость, возможность упрочнения деталей на большую глубину. Вращающийся ролик применяют при обработке широких поверхностей, когда не предъявляется высоких требований к волнистости [6, 7, 8].

Для повышения стойкости инструмента целесообразно применять охлаждение сжатым воздухом, эмульсией или любой пожаробезопасной охлаждающей средой.

Выводы.

1. В результате проведения исследований установлены функциональные зависимости влияния режимов технологического процесса ЭМУ на микротвёрдость, шероховатость поверхности и глубину упрочнения при наиболее распространенных маршрутах восстановления деталей машин.

2. При электромеханическом упрочнении происходит значительное повышение износостойкости и циклической прочности деталей. Износостойкость повышается в 1,4…1,8 раза, предел выносливости – на 10…20% по сравнению с новыми деталями.

3. Электромеханическое упрочнение нашло применение для повышения твердости металлопокрытий (предела выносливости), улучшения качества цилиндрических, плоских, винтовых и зубчатых поверхностей из стали, при ремонте деталей из чугуна, подшипниковых сплавов и т.д.

Литература:

1. Аскинази Б.М. Упрочнение и восстановление деталей электромеханической обработкой. М.: Машиностроение, 1989. 200 с.

2. Балихин В.В., Быков В.В., Иванов Н.Ю. Технология ремонта машин и оборудования: учеб. для студентов вузов. СПб.: СПбГЛТА, 2006. 523 с.

3. Ельцов В.В. Восстановление и упрочнение деталей машин: электронное учебное пособие. Тольятти: Изд-во ТГУ, 2015. 335 с.

4. Родионов Ю.В., Севастьянов А.В. Основы ремонта автомобилей: учебное пособие. Пенза: ПГУАС, 2014. 300 с.

5. Горобченко С.Л., Ковалёв Д.А., Соколова В.А., Григорьев И.В., Тарабан М.В., Чураков А.В. Разработка технического задания на АРМ "пластдеталь" с применением системного подхода // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2025. № 2. С. 33-40.

6. Добрецов Р.Ю., Добрецова С.В., Войнаш С.А., Соколова В.А. Межосевой механизм распределения мощности для трансмиссий лесных и транспортных колесных машин // Лесное хозяйство в условиях глобальных вызовов: новые парадигмы устойчивого развития. Forestry - 2025. материалы Международного лесного форума, приуроченного к празднованию 95-летия ВГЛТУ. Воронеж, 2025. С. 521-524.

7. Маликов В.Н., Ишков А.В., Войнаш С.А., Соколова В.А., Ореховская А.А., Ворначева И.В. Вихретоковый метод исследования дефектов ферромагнитных и неферромагнитных материалов // Вестник машиностроения. 2025. Т. 104. № 5. С. 399-406.

8. Захаренко Ю.А., Морозова А.П., Чуваева Д.О., Маликов В.Н., Войнаш С.А., Марков В.А., Соколова В.А. Дефектоскопия сплавов методом вихревых токов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 1. С. 466-474.

Investigation of the effects of electromechanical hardening on the physical and mechanical properties and surface quality of parts

Markov A.N.[1,a], Markov V.A.[1,b], Voinash S.A.[2,c], Nasedkin I.V.[3,d], Vokhmyanin N.A.[4,e]

[1]St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, Higher School of Technology and Energy, 4 Ivan Chernykh St., St. Petersburg, Russia

[2]Rubtsovsk Industrial Institute (branch) of the Altai State Technical University named after I.I. Polzunov, 2/6 Traktornaya St., Rubtsovsk, Russia

[3]Military Orders of Zhukov and Lenin, Red Banner Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny, Tikhoretsky Prospekt, 3, St. Petersburg, Russia

[4]Saint Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov, Institutsky per., 5, Saint Petersburg, Russia

[a]markovan-63@mail.ru, [b]mactor85@mail.ru, [c]sergeyvoinash@yandex.ru, [d]nasedkin.i@rambler.ru, [e]nvohm@mail.ru

Keywords: electromechanical hardening, surface layer, microhardness, surface roughness, depth of hardened layer, wear resistance, residual stresses, restoration of parts, processing modes, metal coatings.

This article examines the physical principles of electromechanical hardening (EMH) of components, which involves a combination of thermal and mechanical action on the surface layer. The equipment and tooling required for implementing the method on lathes are described. The results of experimental studies examining the influence of EHM modes (current, voltage, force, speed) on microhardness, roughness, and the depth of the hardened layer are presented. Empirical relationships obtained for various methods of preliminary restoration of components (CO_2 surfacing, electric resistance surfacing, and iron plating) are presented. It is shown that the use of EHM significantly increases the wear resistance (by 1.4–1.8 times) and the fatigue limit of components, as well as improves the adhesion strength of coatings to the base metal.

УДК 621.9

Гибридные технологии при обработке высокопрочных материалов: анализ эффективности и перспективы внедрения

Холов Б.А.[1,a], Архипов П.В.[1,b], Чуев В.Д.[1,c], Тосенко Д.С.[1,d], Елистратов А.М.[1,e]

[1]Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия

[a]kholov_bakhrom@bk.ru, [b]pavded@yandex.ru, [c]vitsescpc@yandex.ru, [d]darja.tosenko@rambler.ru, [e]crock828@yandex.ru

Ключевые слова: гибридные технологии, высокопрочные материалы, деформационное упрочнение, комбинированная обработка.

В статье представлен комплексный анализ гибридных технологий, применяемых при обработке высокопрочных материалов. Рассмотрены три основных направления: комбинирование аддитивного производства с деформационным упрочнением, интеграция механической обработки с физико-техническими методами воздействия и создание гибридных станочных систем, совмещающих упрочнение и размерную обработку на единой базе. На основе проведенного анализа установлены количественные закономерности влияния гибридной обработки на структуру и свойства высокопрочных сталей и титановых сплавов. Показано, что применение волнового деформационного упрочнения при технологии, совмещающей дуговую сварку металлическим электродом и волновое деформационное упрочнение металлических деталей, позволяет повысить твердость в 2,5 раза, предел прочности – в 1,5 раза при одновременном измельчении структуры до 10 раз. Интеграция высокоэнергетического нагрева и шлифования на одном станке обеспечивает рост производительности в 1,9 раза. Ионно-пучковая обработка поверхностных слоев увеличивает усталостную долговечность деталей из стали в 1,5…2,0 раза. Сформулированы рекомендации по проектированию технологических процессов гибридной обработки и модернизации станочного оборудования.

Возрастающие требования к эксплуатационным характеристикам деталей и узлов ответственного назначения авиакосмической техники, энергетического машиностроения, оборудования для нефтегазового комплекса требуют применения материалов с уникальным сочетанием прочностных свойств, жаростойкости, коррозионной стойкости и других. К таким материалам относятся высокопрочные стали, титановые и никелевые сплавы,

композиционные материалы, обработка которых традиционными методами сопряжена со значительными трудностями [1, 6].

Высокопрочные материалы характеризуются низкой обрабатываемостью резанием, склонностью к деформационному упрочнению в процессе обработки, высокой температурой в зоне резания, что приводит к интенсивному износу инструмента и снижению качества поверхностного слоя. Традиционные методы лезвийной обработки часто не позволяют достичь требуемых параметров точности и качества при экономически приемлемой производительности [3, 8].

Перспективным направлением преодоления указанных ограничений является разработка и внедрение гибридных технологий, основанных на сочетании различных видов энергетического и силового воздействия на обрабатываемый материал в едином технологическом цикле. Под гибридными технологиями понимают процессы, в которых одновременно или последовательно реализуются два и более механизма обработки, обеспечивающих усиливающий совместный эффект, недостижимый при раздельном применении этих механизмов [6, 9].

Актуальность исследования гибридных технологий при обработке высокопрочных материалов обусловлена несколькими факторами. Во-первых, растущей потребностью в изделиях сложной геометрической формы из труднообрабатываемых материалов, которые не могут быть получены традиционными методами литья или обработки давлением. Во-вторых, необходимостью повышения производительности обработки при одновременном улучшении качества поверхностного слоя. В-третьих, возможностью управления структурно-фазовым состоянием материала непосредственно в процессе формообразования, что позволяет получать изделия с градиентными свойствами.

Целью настоящей работы является систематизация и анализ современных гибридных технологий обработки высокопрочных материалов, оценка их эффективности на основе количественных показателей и выработка рекомендаций по практическому применению.

Методики исследований.

Исследование гибридных технологий базировалось на комплексной методологии, включающей теоретический анализ, моделирование и экспериментальную проверку достоверности информации и результатов.

В качестве материалов для анализа выбраны высокопрочные стали и сплавы, наиболее широко применяемые в ответственных конструкциях: подшипниковая сталь [7], жаропрочный сплав, коррозионностойкая сталь аустенитно-мартенситного класса авиационного назначения [2], титановый сплав [10], а также нержавеющая сталь [5].

Для анализа тепловых и деформационных процессов при гибридной обработке применялся пакет прикладного программного обеспечения [6, 7].

Структурно-фазовые исследования проводились методами оптической и сканирующей электронной микроскопии. Оценка микротвердости осуществлялась по шкале Виккерса. Измерение шероховатости и отклонений формы выполнялось на профилографе-профилометре, топография поверхности оценивалась с использованием инструментального микроскопа. Остаточные напряжения определялись рентгеновским методом.

Для исследования комбинированной ультразвуковой обработки применялись режимы с частотой колебаний 20…40 кГц и амплитудой 5…50 мкм [8]. Ионно-пучковая обработка реализовывалась на установке с ускоряющим напряжением до 80кВ и плотностью тока до 2 мА/см² [2].

Результаты и обсуждение.

На основе анализа литературных источников и результатов собственных исследований предложена классификация гибридных технологий применительно к обработке высокопрочных материалов, включающая три основных направления:

Гибридные аддитивные технологии, сочетающие послойный синтез и деформационное упрочнение (лазерно-ударно-волновую обработку или волновое деформационное упрочнение) [3, 7].

Комбинированные методы обработки, объединяющие механическое воздействие с физико-техническими методами (ультразвуковая обработка, электроискровое легирование, криогенное охлаждение, лазерный нагрев) [8, 9].

Интегрированные станочные системы, реализующие на единой базе операции формообразования и поверхностного упрочнения (шлифование и высокоэнергетический нагрев токами высокой частоты и другие) [6].

Исследование гибридной технологии, объединяющей дуговую сварку металлическим электродом и волновое деформационное упрочнение, проведенное на жаропрочном сплаве, показало следующие результаты [3].

Применение волнового деформационного упрочнения после наплавки каждого слоя привело к существенному измельчению структуры: размер зерна уменьшился до 10 раз по сравнению с материалом, полученным без упрочнения. Микротвердость повысилась в 2,5 раза, предел прочности – в 1,5 раза, предел текучести – в 2 раза при сохранении ударной вязкости на приемлемом уровне.

Моделирование гибридной аддитивной технологии с использованием лазерно-ударно-волновой обработки подшипниковой стали [7] позволило установить, что частота упрочненного слоя является критическим технологическим параметром, влияющим на перераспределение остаточных напряжений. Установлено, что оптимальный режим обработки позволяет трансформировать растягивающие остаточные напряжения, неизбежно возникающие при аддитивном синтезе, в сжимающие, что значительно повышает усталостную долговечность изделий.

Анализ ультразвукового резания высокопрочных материалов показал, что наложение высокочастотных колебаний (20…40кГц, амплитуда 5…50мкм) на режущий инструмент позволяет снизить усилие резания в 2…4 раза для титановых сплавов [8]. Вибрационный характер контакта инструмента с заготовкой обеспечивает дробление стружки и снижение температуры в зоне резания на 200…300°С для титановых сплавов.

Комбинированная ультразвуковая обработка поверхности, сочетающая ультразвуковое воздействие и механическое трение, обеспечивает повышение твердости поверхностного слоя, благоприятное перераспределение напряжений и снижение шероховатости [4]. Формирование так называемого «белого слоя» в поверхностной структуре способствует повышению износостойкости и долговечности обработанных поверхностей.

Электроискровое легирование, реализуемое непосредственно в процессе фрезерования (напряжение 150…250В, сила тока 10…50А, длительность импульса 50…200мкс), позволяет формировать износостойкий поверхностный слой толщиной 50…200мкм без выделения этой операции в отдельный технологический переход [8].

Разработка и внедрение гибридной станочной системы, интегрирующей многолезвийную обработку и поверхностное упрочнение высокоэнергетическим нагревом токами высокой частоты на единой станочной базе, позволила получить следующие результаты [6]: повышение производительности обработки в 1,9 раза по сравнению с традиционной технологией; исключение возможности брака при финишном шлифовании; сокращение вспомогательного и подготовительно-заключительного времени; уменьшение межоперационных заделов деталей.

Модернизация многоцелевого металлорежущего станка для реализации высокоэнергетического нагрева потребовала разработки методологии структурно-кинематического анализа и создания специализированного постпроцессора для системы ЧПУ, обеспечивающего реализацию всех функциональных возможностей гибридной станочной системы [6].

Гибридная ионно-пучковая технология, разработанная в Институте физики прочности и материаловедения СО РАН, представляет собой комплексный подход, совмещающий подготовку поверхности и нанесение нанокомпозитных покрытий [2]. Технология позволяет проводить обработку без нагрева изделий (менее 150°С), что особенно важно для материалов с низкой температурой отпуска.

Применение данной технологии обеспечило следующие результаты: – повышение усталостной долговечности деталей из коррозионностойкой стали аустенитно-мартенситного класса в 1,5…2,0 раза; – увеличение ресурса режущего инструмента в 3…6 раз; – повышение стойкости вырубных штампов в 4…6 раз.

Важной особенностью является возможность одновременного повышения прочности и пластичности – свойств, которые при традиционных способах упрочнения изменяются в противоположных направлениях.

Исследование гибридных заготовок из титанового сплава, полученных методом горячей осадки с кручением [10], показало, что при температуре 600°С и подогреве штампа до 300°С обеспечивается надежное неразъемное соединение за счет пластической деформации. Металлографические исследования при увеличении до ×5000 подтвердили высокое качество соединения, что позволяет использовать данный метод для получения комбинированных заготовок под последующую объемную штамповку.

Модификация титановых сплавов с использованием двойной имплантации ионов и последующей обработки сильноточным электронным пучком приводит к изменению усталостной прочности, твердости и повышению коррозионной стойкости [5].

Проведенный анализ позволяет выделить общие закономерности, характерные для гибридных технологий обработки высокопрочных материалов.

Во всех рассмотренных случаях комбинирование различных видов воздействия приводит к эффекту, превышающему аддитивный вклад каждой составляющей. Это проявляется в изменении структурно-фазового состояния материала на более глубоких уровнях (формирование наноструктур, многослойных композиций с градиентными свойствами), недостижимых при использовании технологий в раздельности.

Ключевым преимуществом гибридных технологий является возможность целенаправленного формирования полей остаточных напряжений. Если традиционные аддитивные технологии приводят к возникновению растягивающих остаточных напряжений, вызывающих коробление и растрескивание, то введение операций деформационного упрочнения (лазерно-ударно-волнового, волнового, ультразвукового) позволяет создавать благоприятные сжимающие напряжения в поверхностном слое.

Гибридная обработка обеспечивает измельчение зеренной структуры, что приводит к повышению прочностных характеристик. При этом важной особенностью является сохранение или даже повышение пластических свойств, что нетипично для традиционных методов упрочнения.

Интеграция операций на единой станочной базе позволяет сократить производственный цикл, исключить промежуточные транспортировки и переустановки деталей, снизить межоперационные заделы. Повышение производительности при одновременном улучшении качества свидетельствует о высокой экономической эффективности гибридных технологий.

Основные выводы.

На основе проведенного анализа могут быть сформулированы следующие рекомендации по разработке и внедрению гибридных технологий:

При проектировании технологических процессов обработки высокопрочных материалов целесообразно рассматривать возможность применения гибридных схем на ранних стадиях подготовки производства, используя функционально-ориентированный подход.

Для эффективной реализации гибридных технологий необходима модернизация существующего станочного парка с разработкой специализированного инструмента, оснастки и постпроцессоров для систем ЧПУ.

При выборе параметров гибридной обработки следует использовать методы математического моделирования для определения оптимальных режимов, обеспечивающих требуемое структурно-фазовое состояние и поля остаточных напряжений.

Для титановых сплавов и жаропрочных сталей наиболее перспективными являются гибридные технологии, сочетающие аддитивный синтез с деформационным упрочнением, а также методы ионно-пучковой модификации поверхности.

При обработке высокопрочных материалов резанием рекомендуется применение ультразвукового воздействия и криогенного охлаждения для снижения усилий резания и повышения качества поверхностного слоя.

Целесообразно создание специализированных научно-производственных центров по разработке и внедрению гибридных технологий, объединяющих усилия научных организаций, производителей оборудования и промышленных предприятий.

Литература:

1. Advanced Manufacturing Techniques for Engineering and Engineered Materials / edited by Rajasekaran Thanigaivelan, N. Rajan, T. G. Argul. - Hershey, PA: Engineering Science Reference, 2022. – 374p. – Текст: электронный

2. Гибридная нанотехнология и установка комбинированной ионно-пучковой обработки // Институт физики прочности и материаловедения СО РАН: [сайт]. – URL: https://www.ispms.ru/all_developments/gibridnaya-nanotekhnologiya-i-ustanovka-kombinirovannoy-ionnopuchkovoy-obrabotki.php?ysclid=mmbhzoqbgm785988053 (дата обращения: 04.03.2026).

3. Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Баринов С.В., Федонина С.О. Волновое деформационное упрочнение в процессе аддитивного синтез] // Наукоёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 9 (171). С. 31-40. doi: 10.30987/2223-4608-2025-9-31-40.

4. Lauwers B., Klocke F., Klink A., Tekkaya A.E., Neugebauer R., McIntosh D. Hybrid processes in manufacturing // CIRP Annals - Manufacturing Technology. 2014. Т. 63. № 2. С. 561-583. DOI: 10.1016/j.cirp.2014.05.003

5. Попов А.И. Анализ технологической возможности управления параметрами шероховатости нержавеющих сталей в процессе струйной комбинированной электролитно-плазменной обработки // Воронежский научно-технический Вестник. 2025. Т. 3. № 3 (53). С. 10-24.

6. Skeeba V., Ivancivsky V., Chernikov A. [et al.]. Design and Technological Aspects of Integrating Multi-Blade Machining and Surface Hardening on a Single Machine Base // Journal of Manufacturing and Materials Processing. – 2024. – № 8(5). – P. 200. DOI: 10.3390/jmmp8050200

7. Сахвадзе Г.Ж. Конечноэлементное моделирование гибридной аддитивной технологии с использованием лазерно-ударно-волновой обработки // Проблемы машиностроения и надежности машин. - 2023. - №2. - С. 94-102. doi: 10.31857/S0235711923020074

8. Механика + Физика: комбинированные методы обработки //CNC66.ru: [сайт]. – 2025. – URL: https://cnc66.ru/blog/mehanika--fizika-kombinirovannye-metody-obrabotki (дата обращения: 04.03.2026).

9. Salenko A.F., Klimenko S.A., Orel V.N., Kholodny V.Yu., Gavrushkevich N.V. Using the functional approach in the development of hybrid processes in engineering: practical aspects // Mechanics and Advanced Technologies. – 2022. – № 6 (3). – P. 317-327. DOI:10.20535/2521-1943.2022.6.3.269900

10. Получение гибридных заготовок из титанового сплава ОТ4-1 горячей осадкой с кручением / Петров П.А., Бурлаков И.А., Нгуен Хань Тоан, Во Фан Тхань Дат // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №2. С. 120-127. https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-2- 120-127

Hybrid technologies in high-strength materials processing: analysis of efficiency and implementation prospects

Holov B.A.[1,a], Arkhipov P.V. [1,b], CHuev V.D. [1,c], Tosenko D.S. [1,d], Elistratov A.M. [1,e]
[1]Bratsk State University, st. Makarenko 40, Bratsk, Russia
[a]kholov_bakhrom@bk.ru, [b]pavded@yandex.ru, [c]vitsescpc@yandex.ru, [d]darja.tosenko@rambler.ru, [e]crock828@yandex.ru

Keywords: hybrid technologies, high-strength materials, strain hardening, combined processing.

This article presents a comprehensive analysis of hybrid technologies used in the processing of high-strength materials. Three main approaches are considered: combining additive manufacturing with strain hardening, integrating mechanical processing with physical and technical methods of impact, and creating hybrid machine tools that combine hardening and dimensional processing on a single platform. Based on the conducted analysis, quantitative patterns of the influence of hybrid processing on the structure and properties of high-strength steels and titanium alloys are established. It is shown that the use of wave strain hardening in a technology combining metal arc welding and wave strain hardening of metal parts allows for a 2.5-fold increase in hardness and a 1.5-fold increase in tensile strength, while simultaneously refining the structure up to 10 times. The integration of high-energy heating and grinding on a single machine ensures a 1.9-fold increase in productivity. Ion-beam processing of surface layers increases the fatigue life of steel parts by 1.5 to 2.0 times. Recommendations for the design of technological processes for hybrid processing and modernization of machine tool equipment are formulated.

УДК 621.9

Технологические особенности и области применения комбинированных методов обработки высокопрочных материалов

Тосенко Д.С.[1,a], Архипов П.В. [1,b], Елистратов А.М. [1,c], Холов Б.А. [1,d], Чуев В.Д. [1,e]
[1]Братский Государственный Университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия
[a]darja.tosenko@rambler.ru, [b]pavded@yandex.ru, [c]crock828@yandex.ru, [d]kholov_bakhrom@bk.ru, [e]vitsescpc@yandex.ru

Ключевые слова: комбинированные методы обработки, гибридные технологии, высокопрочные и труднообрабатываемые материалы

В статье представлен системный анализ современных комбинированных (гибридных) методов обработки высокопрочных материалов, основанных на одновременном или последовательном применении различных физических методов и энергетических источников. Рассмотрены технологические особенности трех основных классов гибридных технологий: электромеханическая обработка, электрофизические комбинированные методы и комбинированные методы поверхностного упрочнения. Систематизированы методики исследований, включая планирование многофакторных экспериментов, методы оптимизации и анализа микроструктуры. Приведены количественные результаты: лазерное резание обеспечивает снижение силы резания до 69 %, уменьшение износа инструмента на 46 % и улучшение качества поверхности на 56 %; комбинированное ионно-плазменное упрочнение повышает износостойкость деталей в 2…10 раз, ресурс режущего

инструмента – до 65%, микротвердость достигает 46 ГПа; комбинированная алмазная обработка с совместным применением лазерного и магнитного полей обеспечивает формирование наноразмерной структуры поверхности. Разработаны некоторые рекомендации по области применения и особенностях комбинированных методов обработки.

Современное машиностроение, особенно аэрокосмическая, энергетическая и оборонная отрасли, предъявляет постоянно растущие требования к применяемым материалам. Высокопрочные стали, жаропрочные никелевые и титановые сплавы, твердые сплавы, керамика и композиционные материалы обладают уникальным сочетанием механических свойств, но одновременно являются труднообрабатываемыми традиционными методами резания [1, 6]. При механической обработке таких материалов возникают серьезные проблемы: интенсивный износ инструмента, низкая производительность, ухудшение качества поверхностного слоя, высокие энергозатраты [6, 9].

Решение этих проблем видится в разработке комбинированных (гибридных) методов обработки, основанных на одновременном или последовательном применении различных видов энергетического воздействия на обрабатываемый материал [6, 8]. Под комбинированной обработкой понимается процесс, в котором на материал воздействуют различные формы энергии или различные способы воздействия, создающие синергетический эффект и позволяющие достичь результатов, недоступных при традиционных методах [5, 8].

Анализ современной научно-технической литературы показывает, что комбинированные методы обработки развиваются по нескольким ключевым направлениям: электромеханическая обработка (лазерное резание, ультразвуковая обработка, магнитно-полевое содействие), электрофизические комбинированные методы (электроэрозионная обработка гибридных композитов, ионно-плазменное упрочнение) и комбинированные методы поверхностного упрочнения [2, 3, 6, 7].

Цель настоящей работы – систематизация технологических особенностей комбинированных методов обработки высокопрочных материалов, анализ количественных показателей эффективности и определение областей их применения на основе современных исследований.

Методики исследований

На основе анализа современной научно-технической литературы выделены следующие классы комбинированных методов [1, 2, 5, 6, 8], которые приведены в табл.. 1.

Таблица 1

Классификация комбинированных методов обработки высокопрочных материалов

Класс методов	**Технологии**	**Комбинируемые воздействия**
Электромеханическая обработка	Лазерное точение	Лазерный нагрев + механическое резание
	Ультразвуковая обработка	Ультразвуковые колебания + резание
	Дуально-полевая алмазная обработка	Лазерное + магнитное поле + резание
	Магнитно-импульсная обработка	Магнитное поле + резание
Электрофизические комбинированные методы	Электроэрозионная обработка	Электрические разряды + эрозия
	Порошково-смешанная электроэрозия	Порошковые добавки + электроэрозионная обработка
	Электрохимическое шлифование	Электрохимическое растворение + абразив
Комбинированные методы упрочнения	Ионно-плазменная обработка	Ионная имплантация + плазменное осаждение
	Лазерно-плазменное упрочнение	Лазерная обработка + плазменное напыление

Для анализа эффективности комбинированной обработки применяется комплекс взаимодополняющих методов [1, 2, 3, 7]:

Металлографический анализ – оптическая и электронная микроскопия для изучения микроструктуры, выявления дефектов, оценки толщины модифицированных слоев;

Растровая электронная микроскопия (РЭМ) – исследование морфологии поверхности, анализа изломов, характера разрушения;

Просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ) – изучение наноразмерных структурных элементов, дислокационной субструктуры, выделений упрочняющих фаз;

Рентгеноструктурный анализ – определение фазового состава, параметров кристаллической решетки, остаточных напряжений;

Измерение микротвердости – оценка градиента свойств по глубине модифицированного слоя;

Механические испытания – испытания на износостойкость, усталостную прочность, коррозионную стойкость;

Профилометрия – контроль параметров шероховатости обработанной поверхности.

Для оптимизации параметров комбинированной обработки применяются следующие методы: планирование многофакторных экспериментов – использование ортогональных массивов, центральных композиционных планов, методологии поверхности отклика; многокритериальные методы оптимизации, а также методы искусственного интеллекта.

Результаты и обсуждение.

Исследование лазерного точения показало высокую эффективность применения локального лазерного нагрева перед режущим инструментом. Принцип метода заключается в термическом разупрочнении материала в зоне резания, что снижает сопротивление деформированию и разрушению.

Количественные результаты применения данного метода для обработки жаропрочных сплавов представлены на рис. 1.

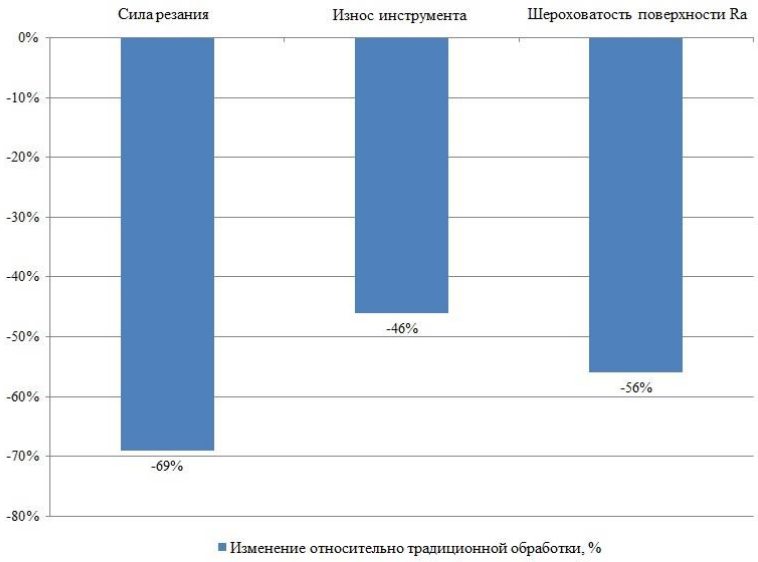


Рис. 1. Сравнительная диаграмма эффективности лазерного точения

Исследование механизмов износа инструмента показало, что при традиционной обработке преобладают усталостные механизмы и абразивный износ, тогда как при лазерном точении с повышением температуры доминирующими становятся окислительный износ и адгезия, что требует применения специальных износостойких покрытий [9].

Дуально-полевая алмазная обработка – метод одновременного применения лазерного и магнитного полей при алмазном резании [3]. Данный метод позволяет преодолеть ограничения традиционных одно-полевых методов обработки, которые приведены в табл. 2.

Таблица 2

Сравнение условий обработки при дуально-полевом воздействии

Условия обработки	Воздействие	Эффект
Без поля	Отсутствует	Базовый уровень
Лазерное поле	Термическое разупрочнение	Локальное снижение прочности
Магнитное поле	Влияние на течение материала	Управление пластическим течением
Дуально-полевое	Термо-магнито-механическое	Синергетический эффект

Совместное применение лазерного и магнитного полей создает уникальные термо-магнито-механические условия в зоне обработки, обеспечивающие: формирование более гладких обработанных поверхностей; уменьшение повреждений подповерхностного слоя; более стабильное удаление материала; заметное снижение износа инструмента.

Анализ результатов с использованием комплекса методов (от оценки макроскопических характеристик поверхности до атомарной структуры) позволил установить механизмы синергетического эффекта дуально-полевого воздействия [3].

Обобщение результатов исследований ультразвуковой обработки высокопрочных материалов позволяет выделить следующие количественные эффекты, которые приведены в табл. 3 [6].

Таблица 3

Эффективность ультразвуковой обработки

Показатель	Эффект
Снижение сил резания	30…50 %
Уменьшение температуры в зоне контакта	20…25 %
Повышение стойкости инструмента	1,5…2,5 раза
Улучшение отвода стружки	существенное

Ультразвуковое воздействие изменяет кинематику процесса резания – контакт инструмента с заготовкой становится прерывистым, что особенно эффективно при обработке слоистых композиционных материалов, позволяя минимизировать расслоение и сколы на выходе отверстия [6].

Электроэрозионная обработка является одним из наиболее эффективных методов формообразования деталей из электропроводных высокопрочных материалов. Для гибридных металломатричных композитов, содержащих несколько типов упрочняющих частиц, данный метод становится предпочтительным благодаря отсутствию механического контакта и возможности обработки независимо от твердости материала [2].

В табл. 4 представлены обобщенные данные о влиянии параметров электроэрозионной обработки на основные показатели [2].

Таблица 4

Влияние технологических параметров на показатели обработки

Параметр	Влияние на скорость съема материала	Влияние на шероховатость	Влияние на износ инструмента
Ток разряда	↑↑ (положительное)	↑↑ (увеличение)	↑↑ (увеличение)
Длительность импульса	↑ до оптимума, затем ↓	↑ (увеличение)	варьируется
Пауза между импульсами	↓ (снижение)	↓ (снижение)	↓ (снижение)
Напряжение	↑ (положительное)	↑ (увеличение)	↑ (увеличение)
Содержание упрочняющих частиц	↓ (снижение)	↑ (увеличение)	↑ (увеличение)

Примечание к таблице: ↑↑ – сильное положительное влияние, ↑ – положительное влияние, ↓ – отрицательное влияние.

Исследование комбинированных методов упрочнения, сочетающих ионную имплантацию с плазменным осаждением покрытий, показало существенное повышение эксплуатационных характеристик деталей и инструмента. Результаты представлены в табл. 5.

Таблица 5

Эффективность комбинированного ионно-плазменного упрочнения

Объект упрочнения	Комбинированная обработка	Эффект повышения
Стальные детали	Имплантация + осаждение Mo/W	Износостойкость ↑ в 2…10 раз
Твердые и быстрорежущие сплавы	Ионно-плазменное азотирование + нитридные покрытия	Износостойкость ↑ в 1,5…3 раза
Режущий инструмент	Комплексное упрочнение	Стойкость ↑ до 65 %
Детали машин	Комбинированное упрочнение	Износостойкость ↑ до 60 %
Детали машин	Комбинированное упрочнение	Коррозионная стойкость ↑ до 3 раз
Детали машин	Комбинированное упрочнение	Усталостная прочность ↑ до 1,5 раз

Ключевым механизмом повышения свойств является формирование наноструктурированных слоев с размером зерен 10…50нм. Такие нанокомпозиты эффективно препятствуют распространению трещин и повышают пластичность поверхности. Комбинирование методов позволяет улучшить адгезию покрытий, снижая отслаивание в 1,5…2 раза.

Основные технологические параметры процесса включают: ионную имплантацию при энергиях ионов 50…200 кэВ, глубина модифицированного слоя достигает 1 мкм; плазменное осаждение, которое формирует слои толщиной 1…10 мкм; достигаемая микротвердость составляет до 46 ГПа; коэффициент трения снижается до 0,1…0,3.

Ключевым преимуществом комбинированных методов является возникновение синергетических эффектов – явлений, при которых совместное действие различных факторов превосходит сумму эффектов от их раздельного применения [3, 6].

Основные выводы.

Электромеханическая обработка является эффективным направлением комбинированных технологий. Лазерное точение обеспечивает снижение силы резания до 69 %, уменьшение износа инструмента на 46 % и улучшение качества поверхности на 56 %. Ультразвуковая обработка позволяет снизить силы резания на 30…50 % и повысить стойкость инструмента в 1,5…2,5 раза.

Дуально-полевая алмазная обработка с совместным применением лазерного и магнитного полей представляет собой принципиально новый подход, обеспечивающий формирование наноразмерной структуры поверхности и недостижимые при одно-полевом воздействии результаты.

Электроэрозионная обработка является предпочтительным методом формообразования гибридных металломатричных композитов, содержащих несколько типов упрочняющих частиц. Применение методов многокритериальной оптимизации позволяет достичь оптимального сочетания скорости съема, качества поверхности и износа инструмента.

Комбинированное ионно-плазменное упрочнение обеспечивает формирование наноструктурированных слоев с размером зерен 10…50нм, повышение износостойкости деталей в 2…10 раз, ресурса режущего инструмента до 65 %, микротвердости до 46 ГПа.

Основные области применения комбинированных методов включают аэрокосмическую промышленность, энергетическое машиностроение, инструментальное производство, медицинскую технику и автомобилестроение – отрасли, где требуется обработка труднообрабатываемых материалов с высокими требованиями к качеству и производительности.

При проектировании технологических процессов комбинированной обработки необходимо учитывать синергетические эффекты от сочетания различных видов воздействия. Наиболее перспективными являются методы, основанные на одновременном применении нескольких физических полей (лазерное + магнитное, ультразвук + электроэрозия).

Внедрение систем мониторинга в реальном времени (измерение сил резания, температуры, акустической эмиссии) необходимо для адаптивного управления параметрами комбинированных процессов и обеспечения стабильного качества обработки.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на изучение механизмов комплексного энергетического взаимодействия, разработку теоретических основ комбинированной обработки, создание новых гибридных процессов для перспективных высокопрочных материалов и интеграцию с методами искусственного интеллекта для интеллектуального управления процессами.

Литература:

1. Кудряшов Е.А., Смирнов И.М., Гришин Д.В. Технологические особенности обработки комбинированных поверхностей деталей // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2018. – Т. 22, № 1. – С. 71-77. DOI: 10.21869/2223-1560-2018-22-1-71-77.

2. Satesh Sah, Santanu Sardar, Ashim Guha, Debdulal Das. Electrical discharge machining of hybrid metal matrix composites: a comprehensive review // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2025. – Vol. 136. – P. 447–526. DOI: 10.1007/s00170-024-14805-z.

3. He T, Rehan M, Sun L, Tang J, Li D, Chen L, et al. (2025) Investigation of nanotexture fabrication by magnetic field assisted ultra-precision diamond cutting // PLoS One. – 2025. – 20(6): e0326046. DOI: 10.1371/journal.pone.0326046.

4. Елисеева А.В., Ровкин А.М., Тимошенко М.Д., Морев Д.С. Оптимальная обработка изделий из композиционных материалов // Молодой ученый. – 2017. – № 52 (186). – С. 41-45.

5. Sharma A., Uppal A.S., Pathri B.P., Babbar A., Prakash C. (eds.) Modern Hybrid Machining and Super Finishing Processes: Technology and Applications. – 1st ed. – Boca Raton: CRC Press, 2024. – 200 p.

6. Zhao G., Zhao B., Ding W. et al. Nontraditional energy-assisted mechanical machining of difficult-to-cut materials and components in aerospace community: a comparative analysis // International Journal of Extreme Manufacturing. – 2024. – Vol. 6, No. 2. – P. 022007. DOI: 10.1088/2631-7990/ad1ddf .

7. Borisov D.A., Ablyaz T.R., Muratov K.R., Zhurin A.V., Patrakova E.V. Thermal processes in electric discharge machining of parts produced by hybrid additive technology // Russian Engineering Research. 2022. Т. 42. № 8. С. 847-849.

8. Zeng K., Wu X., Jiang F. et al. The non-traditional and multi-energy field hybrid machining processes of cemented carbide: a comprehensive review // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2024. – DOI: 10.1007/s00170-024-13791-6 .

9. Yadav R.N. Electro-chemical spark machining–based hybrid machining processes: research trends and opportunities // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. 2019. Т. 233. № 4. С. 1037-1061.

10. Саленко А.Ф., Щетинин В.Т., Федотьев А.Н. Повышение точности контурного гидроабразивного резания пластин из твердых сплавов и сверхтвердых материалов // Сверхтвердые материалы. – 2014. – № 3. – С. 73-84.

Technological features and areas of application of combined methods for processing high-strength materials

Tosenko D.S.[1,a], Arkhipov P.V. [1,b], Elistratov A.M. [1,c], Holov B.A. [1,d], Chuev V.D. [1,e]

[1]Bratsk State University, st. Makarenko 40, Bratsk, Russia

[a]darja.tosenko@rambler.ru, [b]pavded@yandex.ru, [c]crock828@yandex.ru, [d]kholov_bakhrom@bk.ru, [e]vitsescpc@yandex.ru

Keywords: combined processing methods, hybrid technologies, high-strength and difficult-to-machine materials

The article presents a systems analysis of modern combined (hybrid) methods of processing high-strength materials based on the simultaneous or sequential application of various physical methods and energy sources. Technological features of three main classes of hybrid technologies are considered: electromechanical processing, combined electrophysical methods, and combined methods of surface hardening. Research methods, including planning of multivariate experiments, optimization methods, and microstructure analysis, are systematized. Quantitative results are presented: laser cutting provides a reduction in cutting force by up to 69%, a decrease in tool wear by 46%, and an improvement in surface quality by 56%; combined ion-plasma hardening increases the wear resistance of parts by 2...10 times, the service life of cutting tools - up to 65%, microhardness reaches 46 GPa; combined diamond processing with the joint use of laser and magnetic fields ensures the formation of a nanoscale surface structure. Some recommendations on the scope of application and features of combined processing methods are developed.

УДК 621.9

Аддитивные технологии при изготовлении изделий из высокопрочных материалов

Елистратов А.М.[1,a], Архипов П.В. [1,b], Тосенко Д.С. [1,c], Холов Б.А. [1,d], Чуев В.Д. [1,e]

[1]Братский Государственный Университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия

[a]crock828@yandex.ru, [b]pavded@yandex.ru, [c]darja.tosenko@rambler.ru, [d]kholov_bakhrom@bk.ru, [e]vitsescpc@yandex.ru

Ключевые слова: аддитивные технологии, высокопрочные материалы, микроструктура, механические свойства.

В статье представлен анализ современных аддитивных технологий, применяемых при изготовлении и последующей обработке высокопрочных материалов. Рассмотрены основные методы: лазерное порошковое плавление, электронно-лучевое плавление, прямое лазерное выращивание и проволочная электродуговая наплавка. Систематизированы методики исследований микроструктуры, механических свойств и дефектов. Приведены некоторые количественные результаты для титанового сплава по пределу прочности и относительному удлинению, для жаропрочного сплава по пористости и высокотемпературным свойствам, для инструментальной стали прямом лазерном выращивании по пределу прочности и относительному удлинению. Установлено, что для инструментальных сталей применение аддитивных технологий позволяет сократить отходы материала до 80% и время изготовления на 30…50% по сравнению с традиционными методами. Сформулированы рекомендации по выбору режимов обработки для различных классов высокопрочных материалов.

Современное машиностроение предъявляет постоянно растущие требования к материалам, способным работать в экстремальных условиях при высоких температурах, давлениях и в агрессивных средах. Высокопрочные титановые и жаропрочные никелевые сплавы, инструментальные стали, твердые сплавы и композиты обладают уникальным сочетанием механических свойств, однако их обработка традиционными методами сопряжена с серьезными трудностями: низкой обрабатываемостью резанием, высоким износом инструмента и значительными отходами материала [1, 4].

Аддитивные технологии – послойное выращивание изделий по цифровым моделям, которые открыли принципиально новые возможности для изготовления деталей из высокопрочных материалов. К основным преимуществам аддитивных технологий можно отнести: свобода геометрического формообразования, возможность создания деталей с внутренними полостями и решетчатыми структурами, сокращение отходов материала (коэффициент использования материала до 95%), снижение массы изделий и сокращение производственного цикла [4, 6].

Среди многообразия методов аддитивного производства металлов наибольшее распространение получили две основные группы технологий: порошковые (PBF – Powder Bed Fusion) и технологии прямого подвода материала (DED – Directed Energy Deposition) [4]. Лазерное порошковое плавление (L-PBF) обеспечивает высокую точность и качество поверхности, что особенно важно для прецизионных деталей аэрокосмического и медицинского назначения [6]. Технологии DED, включая проволочную электродуговую наплавку (WAAM – Wire Arc Additive Manufacturing), характеризуются высокой производительностью (до нескольких килограммов в час) и применяются для изготовления крупногабаритных конструкций [5, 9].

Особое место занимают электронно-лучевые технологии, позволяющие обрабатывать химически активные материалы в вакууме и получать уникальные микроструктуры благодаря высоким скоростям охлаждения [2]. Как отмечается в работе [4], высокопрочные алюминиевые сплавы традиционно считались труднообрабатываемыми методами аддитивных технологий из-за склонности к горячему растрескиванию, однако применение методов инокуляции позволяет преодолеть эти ограничения.

На сегодняшний день достигнут значительный прогресс в понимании фундаментальных механизмов формирования структуры и свойств материалов при аддитивном производстве [1, 2, 7]. Цель настоящей работы – систематизация современных методик исследования, анализ количественных результатов, полученных при изготовлении высокопрочных материалов различными аддитивными методами, и формулирование основных выводов о современном состоянии и перспективах развития данной области.

Методики исследований.

Для анализа микроструктуры материалов, полученных аддитивными методами, применяется комплекс методов, таких как: оптическая микроскопия, растровая электронная микроскопия, просвечивающая электронная микроскопия, электронный обратный дифракционный анализ, который используется для построения карт ориентации зерен, выявления текстур, анализа границ зерен и локальной кристаллографической неоднородности, а также рентгеноструктурный анализ для определения фазового состава, параметров кристаллической решетки, остаточных напряжений [1, 2, 7].

Комплекс механических испытаний включает: испытания на растяжение при комнатной и повышенных температурах с определением предела прочности ($\sigma_в$), предела текучести ($\sigma_{0,2}$), относительного удлинения (δ) и модуля упругости (E); испытания на твердость (по Виккерсу) для оценки сопротивления пластической деформации; испытания на сжатие для оценки прочности решетчатых структур и определение скорости деформационного упрочнения – важный параметр для оценки способности материала сопротивляться разрушению [2, 6, 7].

Для выявления и количественной оценки дефектов применяются: металлографический анализ шлифов, рентгеновская топография, а также ультразвуковой контроль, который используется для обнаружения внутренних дефектов в крупногабаритных изделиях [1, 5, 6].

Для оптимизации параметров аддитивного производства применяются: планирование многофакторных экспериментов, численное моделирование, а также машинное обучение с использованием нейронных сетей для прогнозирования свойств и оптимизации параметров процесса [4, 7].

Результаты и обсуждение.

Исследование [2], посвященное изучению эволюции микроструктуры и механических свойств титанового сплава, легированного железом методом двухпроволочного электронно-лучевого аддитивного производства позволило определить влияние содержания железа на структуру и свойства сплава, результаты которого представлены в таб. 1.

Установлено, что увеличение содержания железа от 1,5 до 8,0 мас.% приводит к переходу от столбчато-равноосной зеренной структуры к равноосной, что обусловлено увеличением фактора ограничения роста зерен и расширения зоны концентрационного переохлаждения [2]. Оптимальное содержание железа (2,5 мас.%) обеспечивает повышение прочности на 26 % за счет измельчения структуры. При содержании 7,5 мас.% Fe в сплаве образуются выделения ω-фазы, которая способствует хрупкому разрушению, но повышает твердость на 40 % [2].

Таблица 1

Влияние содержания железа на структуру и свойства титанового сплава

Содержание Fe, мас.%	**Структурные изменения**	**Предел прочности $\sigma_в$, МПа**	**Изменение прочности**	**Микротвердость**
0 (исходный)	Столбчато-равноосные зерна	~845	базовое	базовое
1,7	Равноосные зерна	785	-7 %	—
2,5	Размер β-зерен ↓ с 890 до 560 мкм, толщина α-пластин ↓ в 1,7 раза	1064	+26 %	+11 %
7,5	Образование ω-фазы (объемная доля 81 %)	Хрупкое разрушение	—	+40 %

Исследование [6], показало высокую эффективность легирования титанового сплава ниобием при лазерном порошковом плавлении, результаты которого представлены в табл. 2.

Таблица 2

Влияние содержания ниобия на механические свойства титанового сплава

Содержание Nb, мас.%	**Предел прочности $\sigma_в$, МПа**	**Относительное удлинение δ, %**	**Модуль упругости E, ГПа**
0 (базовый)	1050	8,8	105
3	1181	10,5	~95
10	1135	15,6	80

Добавление 3% ниобия повышает предел прочности на 12,5% и пластичность на 19,3%. При увеличении содержания ниобия до 10% пластичность возрастает на 77% при сохранении высокой прочности (1135 МПа). Снижение модуля упругости до 80 ГПа приближает этот показатель к модулю костной ткани (10…30 ГПа), что критически важно для биомедицинских имплантатов [6].

Исследование [7] другой марки титанового сплава, демонстрирует возможность получения высоких механических свойств непосредственно в процессе метода прямого энергетического осаждения без последующей термической обработки за счет контроля межслойного интервала во времени, результаты которого представлены в табл. 3.

Таблица 3

Механические свойства титанового сплава при различных условиях обработки

Условия обработки	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %	Микроструктура
Без межслойного интервала	базовое значение	базовое значение	преимущественно β-фаза
С межслойным интервалом 26 с	1198	16	α/β-структура с видманштеттеновыми элементами

Введение 26-секундного межслойного интервала при одновременном изготовлении нескольких образцов создает контролируемые термические условия, способствующие формированию благоприятной α/β-микроструктуры непосредственно в процессе осаждения. Достигнутое сочетание предела текучести (1198 МПа) и пластичности (16%) превосходит показатели термообработанных образцов и образцов, полученных традиционными методами.

Согласно источнику [8], аддитивное производство инструментальных сталей является одним из наиболее динамично развивающихся направлений. Классификация таких сталей приведена в табл. 4.

Таблица 4

Классификация инструментальных сталей для аддитивного производства

Класс	Марки	Температура эксплуатации	Применение
Холодно-деформируемые	O1, D2, K340	< 200 °C	Штампы, пуансоны, ножи
Горяче-деформируемые	H11, H13	> 200 °C	Литьевые формы, штампы горячей штамповки
Быстрорежущие (HSS)	M2, T1	Высокие скорости резания	Режущий инструмент

Эффективность аддитивных технологий для изготовления изделий из инструментальных сталей можно свести в виде табл. 5.

Таблица 5

Преимущества аддитивных технологий для инструментальных сталей

Показатель	Эффект
Сокращение отходов материала	до 80 %
Сокращение времени изготовления	30…50 %
Увеличение срока службы восстановленного инструмента	30…50 %

Методы порошкового плавления обеспечивают высокое разрешение и качество поверхности, что важно для прецизионных инструментов. Методы прямого лазерного выращивания предпочтительны для ремонта и восстановления изношенных поверхностей благодаря более высокой производительности и возможности нанесения материала на существующие детали.

Основные проблемы использования высокопрочных алюминиевых сплавов для аддитивного производства, которые склонны к горячему растрескиванию при 3D-печати, и пути их решения представлены в табл. 6 [4].

Таблица 6

Сравнение условий обработки при дуально-полевом воздействии

Проблема	Причина	Стратегия решения
Горячее растрескивание	Рост столбчатых зерен, широкий интервал кристаллизации	Инокуляция (введение частиц-зародышей)
Пористость	Испарение легкоплавких элементов	Оптимизация параметров процесса
Анизотропия свойств	Текстурные эффекты	Термическая обработка

Методы инокуляции, включая введение Sc, Zr, TiB_2, позволяют инициировать гетерогенное зарождение α-Al, способствуют формированию равноосных зерен и полностью подавляют горячие трещины. Эффективность различных инокулянтов зависит от кристаллографического соответствия с матрицей и условий затвердевания [4].

В работе [10] установлено, что особо прочные, но при этом легкие алюмоматричные композиты можно получить с помощью селективного лазерного плавления и добавления микронных частиц нитрида циркония в сплав, что обеспечивает прочное связывание компонентов и образование новых твердых частиц внутри сплава, повышая твердость и прочность материала.

Аддитивные технологии также применяются для изготовления крупногабаритных изделий массой более 750 кг для промышленного применения в энергетике, авиакосмической, железнодорожной и других отраслей методом электродуговой наплавки [5, 9]

Основные выводы.

Аддитивные технологии позволяют получать изделия из титановых сплавов с пределом прочности 1064…1198 МПа и пластичностью 10,5…16 %. Легирование железом (2,5 мас.%) повышает прочность на 26 % за счет измельчения зерна. Легирование ниобием (3…10 мас.%) повышает прочность на 12,5% и пластичность на 19…77 % при снижении модуля упругости на 24%. Контроль межслойного интервала позволяет достичь предела текучести 1198 МПа при пластичности 16% без последующей термообработки. Для изготовления изделий из таких материалов следует применять лазерное порошковое плавление или электронно-лучевое аддитивное производство с последующим горячим изостатическим прессованием.

Аддитивное производство изделий из инструментальных материалов позволяет сократить отходы материала до 80% и время изготовления на 30…50 % при возможности восстановления изношенного инструмента и продлении срока его службы. Ключевое значение имеют пост-обработка и оптимизация параметров процесса. Для изготовления инструментальной оснастки наиболее эффективно применение технологии прямого подвода материала с возможностью ремонта и восстановления изношенных поверхностей. Выбор класса стали определяется условиями эксплуатации.

Применение методов инокуляции позволяет преодолеть проблему горячего растрескивания и получать бездефектные изделия из высокопрочных алюминиевых сплавов, а микронное армирование нитридом циркония обеспечивает прочное связывание компонентов и повышение прочностных характеристик.

Технологии электродуговой наплавки позволяют изготавливать детали массой до 750кг и размерами до нескольких метров, что особенно важно при изготовлении крупногабаритных изделий в энергетическом машиностроении.

Внедрение систем мониторинга процесса в реальном времени и методов машинного обучения необходимо для стабильного качества ответственных изделий и оптимизации параметров аддитивного производства.

Аддитивные технологии активно внедряются в аэрокосмической, энергетической, медицинской, автомобильной и других отраслях. Спрос на крупноформатные аддитивно-изготовленные металлические компоненты неуклонно растет.

Литература:

1. Кабалдин Ю.Г., Аносов М.С., Манцеров С.А. Исследование процессов деформирования и разрушения конструкционных сплавов, полученных аддитивной электродуговой наплавкой с акустико-эмиссионным контролем // Вестник машиностроения. – 2025. – Т. 104 - № 1. – С. 53-58.

2. Nikolaeva A., Zykova A., Vorontsov A. et al. Microstructure and Strength Evolution in Ti4Al3V-xFe Alloys Obtained by Dual-Wire Electron Beam Additive Manufacturing // Metals and Materials International. – 2025. – DOI: 10.1007/s12540-025-02106-3.

3. Desktop Metal выпустила инструментальную сталь H13 для своей системы Studio System // Аддитивные технологии. – 2019. – URL: https://additiv-tech.ru/news/desktop-metal-vypustila-instrumentalnuyu-stal-h13-dlya-svoey-sistemy-studio-system.html (дата обращения: 18.02.2026).

4. Rometsch PA, Zhu Y, Wu X, Huang A. Review of high-strength aluminium alloys for additive manufacturing by laser powder bed fusion. Materials and Design. 2022;219: 110779. DOI: 10.1016/j.matdes.2022.110779

5. СПбПУ и компания «Силовые машины» напечатали рекордную металлическую заготовку // Центр развития базовых отраслей промышленности. – 2026. – URL: https://3dtoday.ru/blogs/news3dtoday/spbpu-i-kompaniya-silovye-masiny-napecatali-rekordnuyu-metalliceskuyu-zagotovku (дата обращения: 18.02.2026).

6. Additive manufacturing progress update – APR 2025 // Engineering.com. – 2025. – URL: https://www.engineering.com/additive-manufacturing-progress-update-apr-2025/ (дата обращения: 18.02.2026).

7. Schaal H., Castany Ph., Gloriant T. Outstanding strain-hardening of a new metastable β-titanium alloy elaborated by in situ additive manufacturing L-pbf process // Materials Science and Engineering: A. 2023. Т. 875. С. 145117.

8. Tool steels and their additive manufacturing for fabrication and repair via PBF and DED processes: techniques, challenges, and applications // Materials & Design. – 2025. – Vol. 258. – P. 114639. DOI: 10.1016/j.matdes.2025.114639 .

9. Supchinsky O., Melnikova M., Kholopov A., Melnikov D., Bogdanov A. Additive technologies features for manufacturing metal products from powder materials by direct laser deposition / В сборнике: Networked Control Systems for Connected and Automated Vehicles. // Conference proceedings. Switzerland, 2023. С. 393-403.

10. Микронное армирование: прорыв в аддитивном производстве материалов для высокотехнологичных отраслей стал ближе // Поиск - новости науки и техники. – 2025. – URL: https://poisknews.ru/v-rossii/mikronnoe-armirovanie-proryv-v-additivnom-proizvodstve-materialov-dlya-vysokotehnologichnyh-otraslej-stal-blizhe/ (дата обращения: 18.02.2026).

Additive manufacturing technologies for high-strength materials

Elistratov A.M.[1,a] Arkhipov P.V. [1,b], Tosenko D.S. [1,c], Holov B.A. [1,d], Chuev V.D. [1,e]

[1]Bratsk State University, st. Makarenko 40, Bratsk, Russia

[a]crock828@yandex.ru, [b]pavded@yandex.ru, [c]darja.tosenko@rambler.ru, [d]kholov_bakhrom@bk.ru, [e]vitsescpc@yandex.ru

Keywords: additive manufacturing, high-strength materials, microstructure, mechanical properties.

This article presents an analysis of modern additive technologies used in the manufacture and subsequent processing of high-strength materials. The main methods considered are laser powder melting, electron beam melting, direct laser deposition, and wire arc cladding. Methods for studying microstructure, mechanical properties, and defects are systematized. Some quantitative results are presented for a titanium alloy in terms of tensile strength and relative elongation, for a heat-resistant alloy in terms of porosity and high-temperature properties, and for tool steel using direct laser deposition in terms of tensile strength and relative elongation. It is established that the use of additive technologies for tool steels allows for a reduction in material waste of up to 80% and manufacturing time by 30…50% compared to traditional methods. Recommendations for selecting processing modes for various classes of high-strength materials are formulated.

УДК 621.438, 621.833

Вопросы расчета, конструирования и технологии монтажа редукторных и трансмиссионных узлов газотурбинных двигателей и агрегатов на их основе

Ерошков В.Ю.[1,a], Шеховцева Е.В.[2,b], Шеховцева Т.В.[3,c]
[1, 2]Публичное акционерное общество «ОДК-Сатурн», пр. Ленина 163, Рыбинск, Россия
[3]Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева, ул. Пушкина 53, Рыбинск, Россия
[a]eroschkow@mail.ru, [b]evgeniya.shekhovtseva@uec-saturn.ru, [c]prikl_mehanika@mail.ru

Ключевые слова: силовая турбина газотурбинного двигателя, трансмиссия, редуктор, монтаж, центрирование.

В публикации раскрыты особенности конструкций редукторов, многоопорных трансмиссий и валопроводов газотурбинных двигателей и агрегатов на их основе. Представлен пример конструкции силовой турбины, требования к сборке данной сборочной единицы, определяемые ее условиями работы. В публикации особое внимание отводится специфики ГТД с силовой турбиной. Вопрос наличия в конструкции ГТД высокооборотных турбин, сложных высоконагруженных редукторов, а в конструкции ГТА – длинномерных многокомпонентных трансмиссии с демпфирующими гибкими муфтами и опорными подшипниками, существенно усложняет как процесс их проектирования, так и изготовления. Соответственно рассмотрены технические решения, обеспечивающие основные моменты, связанные с центровкой, обеспечением соосности валов и трансмиссий. Так же достаточно подробно представлены требования к редукторным зубчатым передачам ГТД, изучены этапы, которые позволяют разработать редуктор с заданными характеристиками. По результатам исследования предложены оптимальные технические и технологические решения в сфере сборочно-монтажных работ, а так же перспективные направления применения цифровых средств измерения.

В настоящей публикации рассматриваются вопросы проектирования и изготовления силовых газотурбинных агрегатов (ГТА) на основе газотурбинных двигателей (ГТД) с выводом мощности на выходной вал свободной турбины (СТ) в части оптимизации конструкции и технологии сборки редукторных и трансмиссионных передач. Такие изделия характеризуются высоким уровнем мощности при хорошем КПД при малых габаритах, а также высокое техническое совершенство, так как в них транслированы современные технологии авиадвигателестроения, имеющие широкое серийное применение и высокую степень востребованности в экономике. Однако, с конструктивной точки зрения, наличие в конструкции ГТД высокооборотных турбин, сложных высоконагруженных редукторов, а в конструкции ГТА – длинномерных многокомпонентных трансмиссии с демпфирующими гибкими муфтами и опорными подшипниками существенно усложняет как процесс проектирования, так и изготовления данных изделий. Неправильная постановка задачи на стадии технического проекта, ошибки в выборе методики проектирования, сложность технологии сборки выявляется на этапах испытания ГТД и ГТА самым негативным образом: дефектами, поломками, срывами сроков производства и поставок. При этом существуют различные математические аппараты и технические решения позволяющие оптимизировать процесс поиска оптимальных, верных с конструктивной и технологической точки зрения решений.

Вопросы производства газотурбинных агрегатов различного назначения с каждым годом приобретают все большую актуальность в связи с импортозамещением, ориентацией отечественной базы энергомашиностроения, судостроения на движительные установки (ГТД и ГТА) собственного производства. Конструктивной особенностью ГТА является наличие ГТД со свободной турбиной [1]. Такие изделия характеризуются редукторными передачами и трансмиссионными сборочными единицами, с высокими требованиями по соосности, обеспечивающими передачу крутящего момента от силовой турбины ГТД к редуктору без вибраций и потерь мощности (точнее, в допустимых техническими условиями значениях).

На рис. 1. представлена типовая конструкция силовой турбины ГТД. В конструктивном плане – это свободная турбина, ротор которой кинематически не связан с газогенератором двигателя. Ее назначение – преобразование реактивной энергии газового потока ГТД в механическую энергию на выходной вал (фланец), и далее на трансмиссию потребителя мощности через редуктор. Редуктор нужен так как частота оборотов СТ ГТД на порядок больше частоты вращения потребителя мощности (газовой турбины, электро-турбогенератор, воздушный или водяной винт и т.п.).

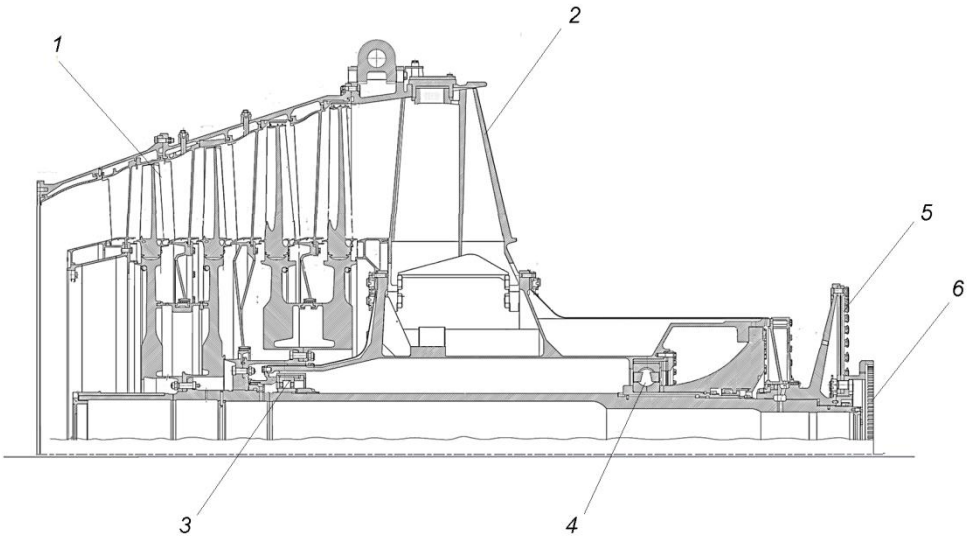


Рис. 1. Силовая турбина ГТД (пример компоновки):
1 – ротор; 2 – опорный венец; 3 – подшипник роликовый передней опоры; 4 – подшипник шариковый задней опоры; 5 – муфта; 6 – фланец

Роторная часть двигателя вращается с очень высокими скоростями, например ротор КВД с частотой до 10000 об/мин, силовая турбина – до 3500 об/мин. Компрессоры низкого давления, высокого давления, и приводящие их во вращение турбины образуют два механически между собой не связанных контура: контур низкого давления и контур высокого давления, которые имеют различные частоты вращения на каждом режиме работы ГТД, но все они исчисляются тысячами оборотов. При этом, в рамках данной публикации будут изучены не газодинамические, а механические вопросы данного узла, а именно вопросы точной сборки таких конструкций, определяемые техническими условиями чертежа.

Роторы низкого и высокого давления снабжены подшипниками качения. Силовая турбина содержит и подшипник качения, и подшипник скольжения. В ГТД редукторные зубчатые передачи используются в узлах раскрутки и управления, в агрегатах на базе ГТД – редуктор(а) являются одним из основных узлов трансмиссионной части. Требования к ним чрезвычайно высокие.

В большей степени качество сборки СТ зависит от точности обеспечения зазоров в опорах – подшипниковых узлах, зазоров между лопатки ротора СТ и статора, между конструктивными элементами дисков, лабиринтных уплотнений ротора и износостойких приставок статора. На надежность и ресурс СТ и ГТД, в целом, влияет соблюдение условий

затяжки крепежа, особенно обеспечивающего сборку роторной части, так как он находится во внешне не доступных местах и на вращающихся частях. Так же в данном случае особого короля требует обеспечение правильного, регламентированного стопорения крепежа, которое в особо ответственных местах выполняется по контрольным образцам.

Для обеспечения требований соосности деталей и снижения технологического дисбаланса, сборку деталей ротора (дисков, валов, цапф) выполняют по рискам, лопатки в диски расставляют по статическим моментам, крепеж расставляют с учетом минимального разновеса.

Узким технологическим местом при сборке и монтаже на стенде является сборка рассмотренной конструкции с трансмиссионным валом, а также обеспечение минимального излома и смещения осей СТ и вала.

Это лишь основные требования сборочных чертежей, по которым видно, что практический каждый шаг сборщика рассчитан и контролируется.

Далее рассмотрим некоторые технические решения, обеспечивающие основные моменты, связанные с центровкой, обеспечением соосности валов и трансмиссий, но перед этим следует более подробно рассмотреть требования к редукторным зубчатым передачам ГТД.

Как уже было отмечено ранее, ключевым вопросом проектирование редукторных передач является высокая скорость вращения трансмиссионных и редукторных узлов газотурбинных агрегатов, соответственно есть риск быстрого неконтролируемого износа трущихся пар, и, как следствие – снижение ресурса работы изделия. Становится очевидным, что в данном случае, необходимо разрабатывать комплекс как конструкторских, так и связанных с этим технологических решений, повышающих надежность и ресурс, как отдельных деталей, узлов, так и изделия в целом.

Требования к компактности редукторов ГТД и ГТА при одновременном обеспечении коаксиальности связано со снижением прочностных характеристик зубчатых колес, что не допустимо. Данное обстоятельство стимулировало внедрение планетарных и дифференциальных зубчатых соединений. Однако, учитывая обширность доступных конфигураций и временные ограничения, возникает острая потребность в технологичности процесса проектирования.

В работе [2] описан способ разработки зубчатых соединений, который включает несколько ключевых этапов. На первом этапе происходит ввод исходных параметров, включающие в себя такие требования как передаваемая мощность, скорость вращения, модуль, число зубьев и другие сведения, которые влияют на выбор конструкции зубчатой передачи. Следующий этап заключается в определении габаритных размеров передачи. На этом этапе проектировщик определяет размеры зубчатых колес, такие как диаметр, ширина венца и т.д., которые будут влиять на работу передачи. После этого происходит этап фильтрации по габаритным размерам, на котором выбираются зубчатые соединения, соответствующие заранее установленным диапазонам значений, указанным на этапе ввода исходных данных. Это позволяет сузить выбор и сосредоточиться на тех вариантах, которые могут соответствовать требованиям проекта. После фильтрации осуществляется оценка прочностных характеристик выбранных зубчатых передач. Это критически важный этап, так как он позволяет определить, смогут ли выбранные параметры передачи выдерживать рабочие нагрузки без разрушений. На основе этой оценки выбираются окончательные габаритные размеры зубчатого соединения, которые будут использоваться в дальнейшем проектировании.

Однако у данного способа есть ряд недостатков, которые ограничивают его применение. Во-первых, он имеет узкую область применения, так как подходит только для разработки отдельных зубчатых соединений, но не может быть использован для более сложных систем, таких как планетарный и/или дифференциальный редуктор, так как в реальных условиях часто требуется учитывать взаимодействие нескольких передач в

системе. Кроме того, данный способ выполняет только этап прочностной аналитической оценки, что негативно сказывается на окончательных размерах зубчатой передачи. Фильтрация по ширине венца не учитывает другие важные параметры, такие как коэффициент перекрытия, который также играет важную роль в прочности и долговечности передачи. Модификация зубчатого венца может значительно повысить прочностные характеристики при меньших длинах размеров венца, что не учитывается в данном способе. Таким образом, можно сделать вывод, что для выбора передачи, особенно в сложных системах, необходим комплексный подход, который учитывает все аспекты работы зубчатых передач и их взаимодействия в системах, чтобы обеспечить надежность и эффективность работы механизмов.

В работе [3] в «КОМПАС 3D», последовательно реализованы этапы, которые позволяют разработать редуктор с заданными характеристиками. Процесс начинается с ввода исходных сведений, которые являются основой для дальнейших расчетов и проектирования. Затем следует этап определения геометрических характеристик редуктора, форм и размеров его компонентов. После этого осуществляется оценка прочностных показателей передачи, что позволяет убедиться в надежности и долговечности конструкции. Далее, на этапе рабочей компоновки, происходит формирование общей схемы редуктора, где определяется, как будут располагаться все элементы устройства. Наконец, завершающий этап включает создание детализированной модели разрабатываемого редуктора, на котором выбираются технологические и конструктивные параметры, такие как материал для зубчатых колес и тип подшипников. Это важно для обеспечения эффективной работы редуктора и его соответствия всем необходимым стандартам.

Однако этот способ имеет ряд значительных недостатков. Во-первых, отсутствует компоновка на этапе эскизного проекта, что приводит к увеличению времени проектирования. Это связано с тем, что без предварительных эскизов сложно быстро и эффективно подобрать оптимальную конструкцию редуктора. Высокая квалификация персонала также становится необходимостью, так как для анализа проектируемых конструкций требуется глубокое понимание всех особенностей проектирования редукторов. Еще одним ограничением данного метода является его узкая область применения. Он подходит только для разработки простых одноступенчатых редукторов, которые имеют один входной и один выходной вал. Более того, данный метод ограничен только передачами с внешним зацеплением, что сужает возможности проектирования и не позволяет учитывать более сложные конструкции, такие как многоступенчатые редукторы или редукторы с внутренним зацеплением. Это создает дополнительные трудности для инженеров, работающих над проектами, требующими более сложных решений и инновационных подходов. Таким образом, существуют серьезные ограничения, которые могут значительно затруднить процесс проектирования редукторов и снизить его эффективность.

В работе [4] рассмотрен процесс проектирования редуктора, который включает несколько ключевых этапов. На первом этапе происходит ввод исходных параметров, что является основой для дальнейшей разработки. Затем следует этап, связанный с проектированием планетарной передачи. В этом процессе важно обеспечить такие условия, как соседство элементов, их соосность и возможность последующей сборки. Эти факторы играют критическую роль в том, чтобы редуктор работал эффективно и надежно. После этого наступает этап фильтрации по передаточному числу. На этом этапе выбирается конструкция редуктора, которая соответствует заданным исходным данным и обеспечивает необходимое итоговое передаточное число. Это число должно удовлетворять всем требованиям, определенным на начальном этапе, чтобы гарантировать, что редуктор будет функционировать должным образом в заданных условиях. Тем не менее, существуют и другие методы проектирования редукторов, которые имеют свои недостатки. Одним из основных недостатков таких методов является отсутствие прочностной оценки на этапе разработки конструкции. Это может привести к тому, что конечный вариант редуктора не будет достаточно прочным для выполнения своих функций. Также отсутствуют условия для

выбора оптимального варианта конструкции редуктора, что в итоге означает, что выбор окончательной конструкции часто зависит от квалификации и опыта инженера, который занимается проектированием. Таким образом, конечный результат может варьироваться в зависимости от уровня подготовки специалиста, что является значительным риском. Кроме того, многие из этих методов имеют ограниченную область применения, что связано с конкретными задачами, для которых предназначен данный механизм. Это ограничение может существенно снизить универсальность редуктора и его способность адаптироваться к различным условиям эксплуатации. В результате, выбор метода проектирования редуктора требует внимательного анализа, чтобы избежать потенциальных проблем в будущем и обеспечить надежную работу механизма в различных условиях.

На ПАО «ОДК-Сатурн» применяется комплексный подход [5] разработки редукторов, который включает в себя несколько последовательных этапов. Начинается этот процесс с этапа введения первоначальных данных, где формируется необходимая информация для разработки. На этом этапе собираются все параметры и требования, которые будут учитываться в дальнейшем проектировании. Важно, чтобы эти данные были максимально полными и точными, так как они служат основой для всех последующих действий. После завершения этапа ввода данных начинается этап генерации конструктивных вариантов. На этом этапе инженеры разрабатывают максимально возможное количество различных конструкций редукторов. Это позволяет рассмотреть широкий спектр решений и выбрать наиболее подходящие для дальнейшей работы. Каждое из предложенных решений должно быть тщательно проанализировано и оценено. Следующий этап – фильтрация. На этом этапе происходит отбор редукторов по геометрическим параметрам. Это значит, что из общего числа разработанных конструкций выбираются только те, которые соответствуют заданным критериям и могут быть использованы для построения структурной схемы. Этот процесс необходим для того, чтобы исключить неподходящие варианты и сосредоточиться на тех, которые имеют реальную возможность реализации. После фильтрации инженеры переходят к этапу эскизной компоновки. Здесь разрабатываются эскизы кинематических схем нескольких редукторов, учитывающие топологические связи и основные параметры зубчатых колес. На этом этапе важно определить не только общую компоновку, но и наличие планетарной передачи, что требует особого внимания к условиям соосности, соседства и сборки элементов редуктора. Далее следует этап рабочей компоновки, на котором происходит более детальная проработка выбранных конструкций. Инженеры оценивают каждую из разработанных моделей по различным критериям: прочностным, конструктивным, эксплуатационным и технологическим параметрам. На основании этого анализа выбирается наиболее подходящий вариант конструкции редуктора, который будет рекомендован для дальнейшей разработки. На завершающем этапе разрабатываются чертежи, по которым изготавливается редуктор, снабженный двумя выходными валами. После создания редуктора проводится серия испытаний, целью которых является подтверждение заявленных исходных данных и проверка работоспособности изделия. Важно отметить, что после этапа фильтрации по геометрическим параметрам может быть проведен дополнительный этап, в рамках которого разрабатываются варианты редуктора с уравнительным механизмом. Здесь также учитываются различные сочетания типа зацепления и типа передачи, что позволяет расширить возможности проектирования. Кроме того, после завершения этапа эскизной компоновки вводится дополнительный этап фильтрации, на котором группа выбранных редукторов оценивается по основным параметрам. На этом этапе из группы отобранных редукторов выбираются те, которые имеют значения основных параметров, соответствующие диапазонам, установленным на этапе ввода исходных данных. Это позволяет сузить круг возможных решений и сосредоточиться на тех конструкциях, которые имеют наибольшие шансы на успешную реализацию.

Таким образом, процесс разработки редуктора на ПАО «ОДК-Сатурн» представляет собой многоступенчатую систему, где каждый этап играет важную роль в достижении конечного результата. Это позволяет создавать высококачественные и надежные редукторы, соответствующие современным требованиям и стандартам.

Способ, представленный в работе [5] – это инновационное решение, позволяющее создавать редукторы с оптимальной конструкцией, которые полностью соответствуют требованиям и ожиданиям заказчиков. Данный способ изготовления редуктора обладает высокой универсальностью, так как он позволяет разрабатывать конструкции редукторов различного типа – от самых простых до более сложных, таких как планетарные и дифференциальные редукторы. Это достигается благодаря тому, что в процессе разработки учитываются возможности сочетания различных передач с разнообразными вариантами зацепления и механизмов, что открывает широкие горизонты для проектирования. Использование данного метода значительно снижает трудоемкость на этапе проектирования и изготовления редуктора. Это связано с наличием четко структурированных наглядных этапов, таких как этапы эскизной и рабочей компоновки, что позволяет визуально оценить проект на разных стадиях его разработки. Также предусмотрены этапы фильтрации по геометрическим показателям и этапы оценки и выбора по различным критериям, включая конструктивные, технологические, прочностные и эксплуатационные характеристики. Все эти аспекты в совокупности обеспечивают более эффективный и качественный процесс проектирования редуктора.

Обращаясь к важным компонентам, таким как опоры и подшипники качения, которые используются в газотурбинных двигателях, необходимо подчеркнуть, что подшипники на валу играют одну из ключевых ролей в обеспечении надежности и работоспособности изделий турбостроения. В связи с этим в последние годы активно ведутся исследования и разработки, направленные на повышение эффективности и надежности подшипниковых опор валов. Эти усилия обусловлены общими тенденциями в развитии техники, которые требуют создания более компактных машин и агрегатов, обладающих высокой надежностью и долговечностью. В рамках научных исследований [6], посвященных совершенствованию опор высокооборотных турбин, были проведены детальные исследования, направленные на выявление несоответствий в эксплуатации подшипниковых опор валов. В ходе этих исследований были изучены причины возникновения выкрашивания на беговых дорожках наружной обоймы подшипниковых опор вала на различных этапах развития повреждения рабочей поверхности. Также были рассмотрены основные конструкции подшипниковых опор валов авиационных газотурбинных двигателей и различные способы их смазки, что позволило выявить недостатки существующих систем. В результате проведенных исследований была разработана усовершенствованная конструкция узла подшипниковой опоры вала газотурбинного двигателя. Эта новая конструкция позволяет значительно улучшить условия смазки и охлаждения подшипниковой опоры вала. Это достигается за счет равномерного подвода масла к зонам контакта наружного кольца подшипника и тел качения, а также за счет принудительного отвода масла из зоны контакта внутреннего кольца подшипника и тел качения. Таким образом, удалось не только повысить надежность работы подшипниковых опор, но и улучшить условия их эксплуатации. Дополнительно решена задача, касающаяся улучшения условий подвода смазки к внутренней обойме подшипниковой опоры вала. Все эти нововведения направлены на повышение общей надежности и долговечности подшипниковых систем, что в конечном итоге способствует улучшению работы газотурбинных двигателей и повышению их эффективности. Системный подход к проектированию и оптимизации подшипниковых опор валов является важным шагом в развитии технологий газотурбостроения и способствует созданию более совершенных и надежных двигателей, отвечающих современным требованиям.

Обеспечение характеристик редуктора при уменьшении его габаритов достигается за счет повышения его энергоэффективности и снижения износа опор валов. Кроме того, обеспечивается равномерное распределение нагрузок по валам, что способствует

достижению оптимального баланса сил (рис. 2) [7]. Планетарно дифференциальный редуктор состоит из входного вала-шестерни 1, имеющего внешнее зубчатое зацепление 2 с блоком сателлитов 3, внутреннего выходного вала 4, наружного выходного вала 5 с телом вращения 6 (рис. 2). При этом в наружный выходной вал 5 концентрично установлен внутренний выходной вал 4. Тело вращения 6 наружного выходного вала 5 содержит зубчатый венец внутреннего зацепления 7.

Входной вал-шестерня 1 снабжен опорами 8. Одна опора 8 входного вала-шестерни 1 концентрично установлена во внутреннем выходном валу 4. Входной вал-шестерня 1 сопряжен косозубым внешним зубчатым зацеплением 2 с малым зубчатым венцом 9 блока сателлитов 3, связанным с внутренним выходным валом 4.

Внутренний выходной вал 4 имеет опору 10, установленную концентрично относительно опоры 11 наружного выходного вала 5. Большой зубчатый венец 12 блока сателлитов 3 сопряжен внутренним прямозубым зубчатым зацеплением 13 с зубчатым венцом 7 тела вращения 6, при этом $D_Ш/D_К$ = 1,5…2, где $D_Ш$ – диаметр начальной окружности зубчатого венца внутреннего зацепления 7 наружного выходного вала 5 (рис. 2), $D_К$ – диаметр начальной окружности входного вала-шестерни 1 (рис. 2).

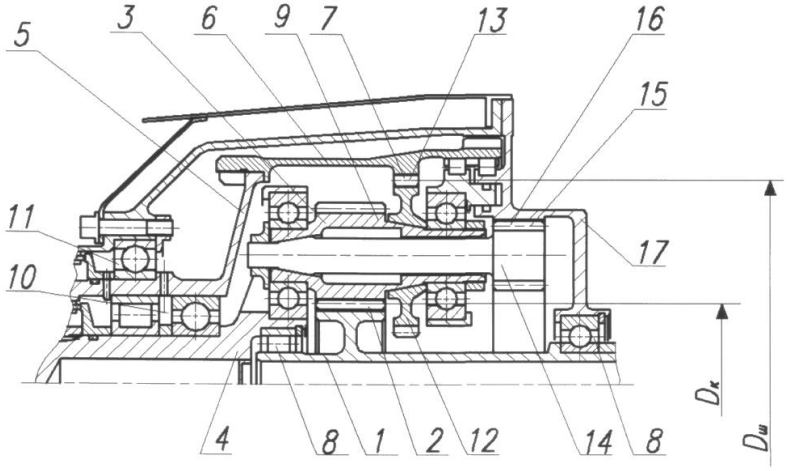


Рис. 2. Конструкция планетарно-дифференциального редуктора

Блок сателлитов 3 дополнительно снабжен шестерней 14 с прямозубым зубчатым венцом 15, сопряженной внутренним зубчатым зацеплением 16 с крышкой 17, выполненной с возможностью прохода входного вала-шестерни 1. Так как в редукторе применяется планетарно-дифференциальная схема зацепления, то передаточные отношения на валах 5 и 4 определяются согласно формулам (1) и (2):

$$i_5 = 1 + 2 \cdot \frac{(Z_7 \cdot Z_9)}{(Z_{12} \cdot Z_1)}; \quad (1)$$

$$i_4 = \frac{(Z_{16} \cdot Z_9)}{(Z_{15} \cdot Z_1)}, \quad (2)$$

где i_5 – передаточное отношение наружного выходного вала 5; i_4 – передаточное отношение внутреннего выходного вала 4; Z_7 – число зубьев зубчатого венца внутреннего зацепления 7 тела вращения 6; Z_9 – число зубьев малого зубчатого венца 9 блока сателлитов 3; Z_{12} – число зубьев большого зубчатого венца 12 блока сателлитов 3; Z_1 – число зубьев зубчатого венца на валу-шестерне 1; Z_{16} – число зубьев внутреннего зубчатого зацепления 16 на крышке 17; Z_{15} – число зубьев шестерни 15.

Благодаря наличию блока сателлитов 3, который обеспечивает одновременное соединение с наружным выходным валом 5 и внутренним выходным валом 4, становится возможным увеличение количества зубьев малого зубчатого венца 9 этого блока. Это, в свою очередь, способствует повышению коэффициента полезного действия (КПД) редуктора:

$$\eta = \pi \cdot f \cdot \cos\beta \cdot \left(\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_9} \right) \cdot \frac{\left(\varepsilon_{a1}^2 + \varepsilon_{a9}^2 \right)}{\left(\varepsilon_{a1} + \varepsilon_{a9} \right)}, \quad (3)$$

где η – КПД редуктора; f – суммарный коэффициент трения в паре зубчатых колёс; β – угол наклона зубчатого колеса; Z_1 и Z_9 – число зубьев входного вала-шестерни и малого зубчатого венца блока сателлитов соответственно; ε_{a1} и ε_{a9} – коэффициенты дополюсного и заполюсного зацеплений соответственно, для зацепления с углом профиля зуба 20° ε_{a1} = 0,78, ε_{a9} = 0,9.

Количество блоков сателлитов 3 в планетарно-дифференциальном редукторе должно быть от 3 до 7 штук (рис. 3).

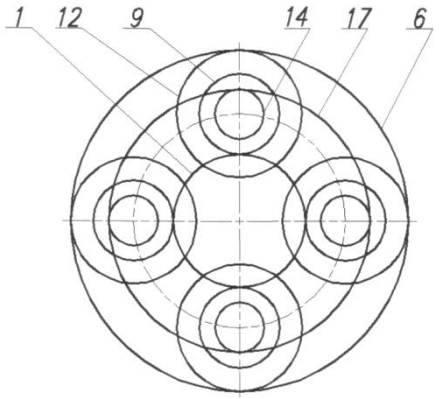


Рис. 3. Кинематическая схема зацепления планетарно-дифференциального редуктора

Разработанная конструкция обеспечивает увеличение коэффициента полезного действия редуктора за счет снижения нагрузки на опоры как входного, так и выходных валов, а также уменьшения габаритов самого редуктора. Это достигается благодаря тому, что блок сателлитов дополнительно оснащен шестерней с прямозубым зубчатым венцом. Эта шестерня соединена с крышкой редуктора через внутреннее зубчатое зацепление, которое позволяет проходить входному валу-шестерне. Такой подход обеспечивает более равномерное распределение нагрузки от нагружающих элементов по валам редуктора, что, в свою очередь, помогает достичь необходимого баланса сил внутри устройства.

Рассмотрев отдельные сборочные элементы ГТА (свободную турбину и редукторные передачи) переходим к общей сборке данного изделия в части трансмиссионных узлов.

Успешное освоение производства ГТД и ГТА на предприятиях непосредственно связано с обеспечением эффективности их монтажа на заводских стендовых испытаниях [8]. Важным условием качества стендового монтажа является обеспечение соосности всех роторных машин, узлов и агрегатов. Эффективность процесса монтажа определяется затратами труда на выверку и фиксацию положения всех компонентов газотурбинных агрегатов. Ограничительными факторами процесса монтажа является сложность конструкции, высокие требования к точности расположения элементов, в частности соосности, значительные габариты и массы компонентов, тепловые расширения, приводящие к изгибам валопроводов и соединительных муфт, и другие негативные внешние факторы [9].

В частности, основными видами отклонений от соосности являются линейные и угловые смещения осей всех сопрягаемых компонентов от номинального положения общей оси вращения. Поэтому выверка узлов ГТА предполагает наличие в конструкции регулировочных элементов, позволяющих выполнять коррекцию положения в горизонтальном, вертикальном и угловых направлениях, то есть в трёхмерном пространстве с высокой точностью, а также жестко фиксировать без дополнительных податливостей в процессе закрепления. Обеспечить регламентируемую величину соосности (смещения и

изломов осей компонентов агрегата до 1 мм/м и менее) с первого раза, как правило, не удается, приходится производить многократную дополнительную повторную центровку компонентов изделия.

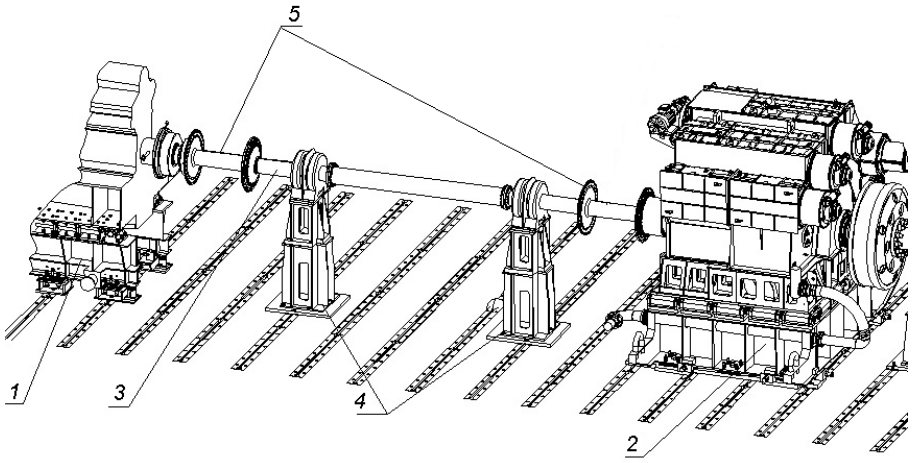


Рис. 4. Размещение многоопорной трансмиссии агрегата на испытательном стенде:
1 – тепловая машина – источник механической энергии агрегата (дизельный или ГТД со свободной турбиной), 2 – редуктор, 3 – трансмиссия, 4 – опорные подшипники (обеспечивают устойчивую работу трансмиссии без прогиба и вибрации), 5 – гибкие соединительные муфты

С учетом конструктивных особенностей по центрированию исследуемых изделий, к их многоопорным трансмиссиям (они называются валопроводы) (рис. 4) предъявляется достаточно большой ряд требований, усложняющие процесс их сборки, в частности:

– сборку отдельных частей трансмиссии следует выполнять по меткам взаимного положения («красным меткам»), это делается как для обеспечения удобства сборки/разборки деталей, так и для сборки деталей, которые прошли совместную балансировку;

– крепеж индивидуален для каждого стыка, особенно с точки зрения разновеса деталей в комплекте;

– обеспечение жестких требований к соосности соединяемых соединений: смещению осей от 0,5 (иногда 0,2 мм), излому осей до 1 мм/м (иногда и до 0,2 мм/м);

– при окончательной сборке, после центрирования трансмиссии, необходимо контролировать правильную сборку муфтовых соединений – гибких муфт (поз. 7, рис. 4) и редукторных муфт (поз. 8, рис. 4). Данные узлы необходимы для компенсации перекосов, смещений, вибраций трансмиссии, они работают как демпфирующие устройства;

– из-за обеспечения требований по растяжке гибких муфт (поз. 7 на рис. 4), на габаритный размер данных сборочных единиц накладывается достаточно жесткий допуск, например, ± 0,5 мм, и даже жестче, который гарантирует стабильные демпфирующие свойства данного узла и надежность работы. При этом, детали гибкой муфты, особенно основная часть – катушка, выполненная из неметаллических материалов, например стеклотекстолита, имеют более свободные, в два, три или четыре раза, допуски на изготовление, что существенно усложняет процесс их монтажа;

– при сборке трансмиссии необходимо обеспечивать совмещение шлицевых зубчатых соединений и смещенных отверстий во фланцах во всех ее стыках;

– обеспечение требований по зазорам вкладышей опорных подшипников, т.е. кроме требований точной центровки необходимо трансмиссию в опорных подшипниках располагать так, чтобы ее опорные шейки не заклинивало при работе, и не было перегрева трущихся пар;

– затяжка крепежа деталей трансмиссии и опор к стендовому полу или основанию изделия выполняется на значительный нормируемый крутящий момент, в итоге затяжка крепежа существенно влияет на положение центрируемых деталей в существенной степени.

Анализ вышеперечисленных требований позволяет сделать вывод, что часть требований достаточно трудно обеспечить из-за того, что выполняя одно требование – можно нарушить другое. Например, при выполнении центрирования валопровода одновременно с корректировкой положения трансмиссии относительно базы, нарушаются зазоры вкладышей опорных подшипников, то есть их перекашивает относительно вала, и требуется каким-то образом «подправлять» их положение относительно вала, не нарушая его положения и достигнутых параметров центрирования.

Даже первый взгляд на представленную конструкцию дает понимание сложности центрирования ее компонентов, с учетом того, что даже малейшие отклонения от требуемых значений соосности приведут к поломке агрегата или стендовых систем. Важнейшим вопросом в данном случае является вопрос центрирования компонентов ГТА.

Чаще всего центрирование трансмиссий ГТА выполняется классическим способом, широко используемым в машиностроении на основе косвенного метода измерения с помощью специальных приспособлений и часовых индикаторов. Точность центрирования, которая является формулярным (паспортизируемым) параметром для ГТА, фиксируется в документации как при монтаже на испытательном стенде, так и при монтаже в изделии, и определяется величинами излома и смещения осей валов трансмиссии изделия и компонентов ГТА.

Относительная величина излома осей в плоскости наибольших отклонений индикатора (рис. 5) определятся по формуле:

$$A_{изл} = \frac{A_{контр}}{2R_{уст}} \tag{4}$$

где $A_{изл}$ – относительная величина излома (расцентровки валов) в мм/м; $A_{контр}$ – наибольшая величина измеренного излома при контроле несоосности в процессе центрирования, мм; $R_{уст}$ – расстояние точки замера (места установки индикатора часового типа или лазерной головки) от оси вращения, м.

В качестве примера приведем расчет относительной величины расцентровки (для $R_{уст}$ = 0,3 м) по формуле (4):

$$A_{изл} = \frac{0{,}11}{2 \cdot 0{,}3} = 0{,}18(^{мм}/_{м}), \tag{5}$$

где 0,11 мм есть сумма абсолютных показаний индикатора в наибольшей и наименьшей точке с отклонениями (то есть |+0,01| + |-0,10|).

Особенностью данного способа контроля и последующей регулировки является то, что при измерении только радиального биения фиксируется угловое смещение осей валов. Если же мы имеем только линейную расцентровку, такая схема контроля не позволяет выявить смещение осей. Это недостаток данной методики.

Другим недостатком представленной методики оценки несоосности агрегатов является влияние на результаты измерений деформаций муфт, фланцев валов, на которые устанавливается измерительные средства, и которые при силовом замыкании меняют положение стыковочных плоскостей в виду их конструктивно заложенной компенсационной способности. С этой точки зрения для обеспечения соосности валов и агрегатов проводят измерение и регулировки положения компонентов ГТА на разомкнутой трансмиссии по исполнительным поверхностям выходных узлов (фланцев).

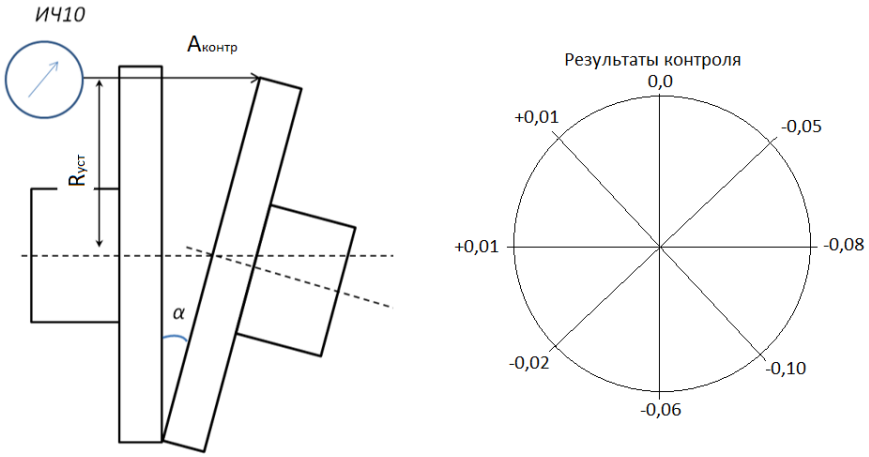


Рис. 5. Схема определения излома осей трансмиссии и результаты контроля

При монтаже ГТА и центрировании его компонентов в производстве, с первого раза обеспечить требуемую величину расцентровки не удается. Процесс заключается в многократной центровке компонентов за счет изменения расстояний между опорными поверхностями установочной рамы ГТД и полом испытательного стенда, то же самое для редуктора и опор трансмиссии, если они имеются. Затем подбираются клинья (подкладки) под каждую из опор. Таким образом, определение положения рам, опор в пространстве – операция трудоёмкая, интуитивная и требует значительного навыка и умения в проведения подобной работы. Подобная технология характеризуется высокой трудоемкостью, необходимостью использования специально обученного персонала, возможностью ошибок при расчетах, то есть налицо существенный человеческий фактор, от которого стараются в последнее время на производстве уходить. Пожалуй, единственным преимуществом рассмотренной методики центрирования является ее простота, возможность использования элементарной оснастки, измерительных средств, которые легко поверить, отремонтировать или заменить.

Однако, существуют и другие методы контроля расцентровки (излома и смещения) осей. Так, при монтаже ГТА и центрирования его компонентов в условиях производства апробирован прямой метод измерения, основанный на использовании системы лазерной центровки [10]. Погрешность центрирования валов данной системой составляет 0,01 мм, разрешающая способность 0,001 мм, т.е. на порядок выше, чем при центрировании, например, индикаторными часами ИЧ-10 (0,1 мм).

В целом не рассматривая конструкции данного оборудования, отметим, что после достаточно простого монтажа устройства для центровки на валу [10], выполняется ввод необходимых размеров соединяемых деталей в программу на пульте управления компьютера, в частности: расстояние от центра стыкуемых фланцев (муфты) до датчика, диаметр фланца (муфты), на который установлен датчик, частота вращения вала (выбирается из имеющихся), расстояния от центра муфты до передней опоры изделия, расстояния между передней и задней опорой изделия и другие дополнительные параметры при необходимости.

После выполнения вышеуказанных подготовительных операций выполняется корректировка положения лазерного луча с целью обеспечения попадания его точно в центр датчика – приемника.

Результаты контроля положения осей трансмиссии в пространстве отображаются на экране монитора в виде значений смещения фланцев и зазора в стыке муфты, как для горизонтальной, так и вертикальной плоскостей (рис. 6). Положительное значение зазора отображается при обзоре сверху или сбоку от наблюдателя в том случае, если вал правой машины в точке муфтового соединения располагается выше и дальше. Данное изображение означает, что опора перемещаемого оборудования поднята вверх или смещена в сторону от

наблюдателя; отрицательное значение показывает, что опора перемещаемого оборудования опущена вниз или смещена навстречу.

Когда определены результаты центрирования, можно выполнять корректировку положения изделия: на мониторе оно условно изображено электродвигателем, хотя на самом деле это может быть и ГТД, и редуктор, и вал.

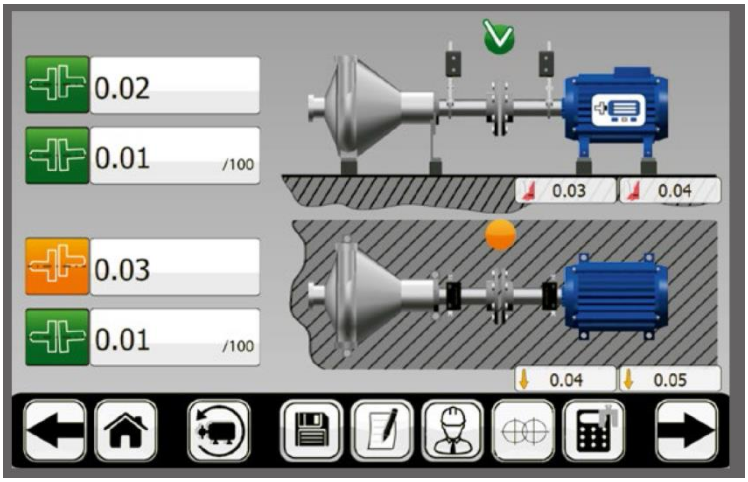


Рис. 6. Результаты предварительного измерения относительного расположения агрегатов на мониторе компьютера лазерной системы центровки (изображение типовое, приведено для примера, может отличаться у поставщиков лазерных систем центровки)

Операция центрирования выполняется до тех пор, пока на экране монитора компьютера лазерной системы центровки не появятся необходимые значения и положительный зеленый индикатор (в некоторых системах счастливый смайлик), определяемые исходными данными в виде допуска излом и смещения осей компонентов агрегатов. Опыт показывает, что достаточно от 3 до 5 циклов повтора операций определения расцентровки валов и корректировки положения рамы, при этом при «ручной» центровке индикаторами часового типа циклы повторяться десятки раз с переменным успехом.

Итак, с технической точки зрения, вопрос центрирования компонентов ГТА с помощью лазерной системы центровки решен. Теперь следует решить метрологический вопрос, связанный с отображением результатов центрирования и документирования процедур в соответствии с требованиями заказчика, т.е. обеспечить «паспортизируемый» излом осей трансмиссии.

Возвратимся к схеме контроля на рис. 5: с геометрической точки зрения $A_{изл}$ (мм/м) (1) является угловой несоосностью, которая может быть выражена как тангенс угла осей α, с учетом пересчета величины $A_{изл}$:

$$tg\alpha = \frac{A_{изл}}{2R_{уст}} \times 10^{-3}, \tag{6}$$

или

$$tg\alpha = A \cdot 10^{-3}, \tag{7}$$

при этом

$$A_{изл} = 1000\, tg\alpha. \tag{8}$$

Изобразим схему контроля излома с дополнительными геометрическими построениями (рис. 7). Из схемы видно, что угол α соответствует расчетному углу,

представленному на рис. 2, и по факту является нормируемым показателем – углом излома осей, что и подтверждает достоверность выбранного метода расчета расцентровки.

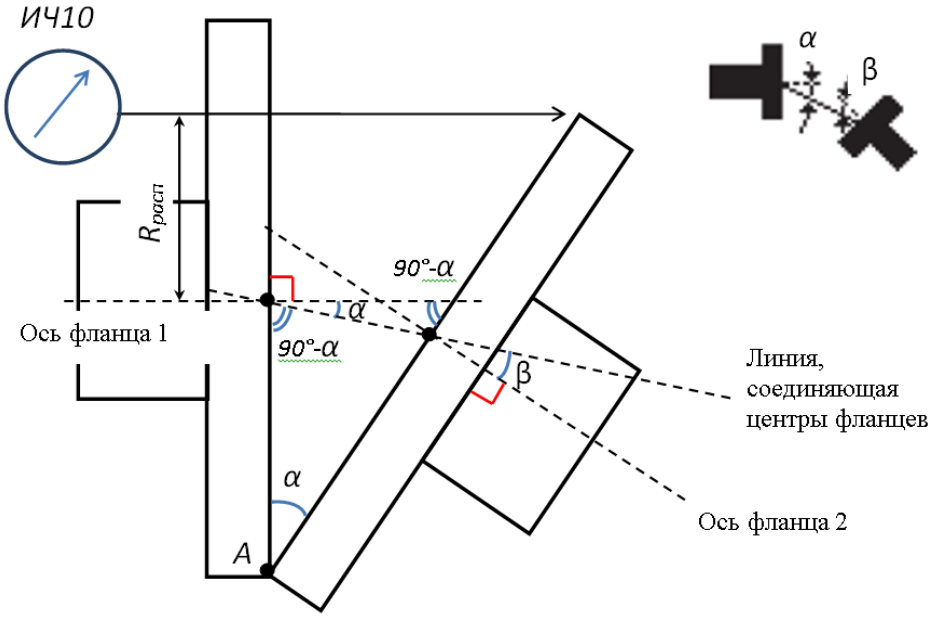


Рис. 7. Схема соотношения углов расценровки фланцев валов

Используя формулу (8) , зная зависимость обеспечения точности центрирования в линейной размерности «мм/м» при настройке компьютера лазерной системы центровки, был успешно апробирован специальный режим отображения результатов «Угол α/ Угол β», который позволил получить данные соответствующие нормативной документации заказчика.

Рассмотренная методика оценки центрирования не требует каких-либо дополнительных затрат, дополнительного обучения персонала, и может помочь успешно применять системы лазерной центровки валов на практике, в производстве.

Таким образом, в рамках публикации, мы рассмотрели особенности конструкций свободной турбины, редукторных узлов, многоопорных трансмиссий и валопроводов энергетических агрегатов, выполнили обзор технических решений, позволяющих усовершенствовать процессы монтажа, в части центрирования данных изделий. Была изучена конструкция силовой турбины, требования к сборке данной сборочной единицы, определяемые ее условиями работы. Достаточно подробно представлены требования к редукторным зубчатым передачам ГТД, изучены этапы, которые позволяют разработать редуктор с заданными характеристиками.

В заключительной части были предложены оптимальные технологические и технические решения в сфере сборочно-монтажных работ, а так же перспективные направления применения современных цифровых средств измерения и контроля с учетом специфики требований нормативно-технической документации.

Литература:

1. Обзор вариантов измерения крутящего момента для испытательного стенда ГТД // Р/Ж Авиационные и ракетные двигатели.2024. № 03. – С.14.- Реф. 24.03-34.88.

2. Авиационные зубчатые передачи и редукторы: Справочник / под. ред. Э.Б. Вулгакова. – М. Машиностроение, 1981. 374 с.

3. Кидрук, М. Авторское приложение для КОМПАС-3D. Автоматизируем проектирование редукторов / Максим Кидрук; http://www.sapr.ru/article.aspx?id=14850&iid=705, дата обращения 30.04.2014.

4. Saulesce, Radu On the use of 2 dof planetary gears as “speed increasers” in small hydros and wind turbines / Radu Saulesce, Oliver Climescu, Codruta Jaliu, Dorin Valentin Diaconescu: Proceedings of

the ASME 2011 International Desidn Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Confeerence IDETC/CIE 2011. – USA, Washington, DC, 2011.

5. Пат 2561649 Российская Федерация, МПК7 G06F 17/00. Способ изготовления редуктора // Шеховцева Е.В., Никифоров В.А.; заявитель и патентообладатель: Открытое акционерное общество «Научно-производственное объединение «Сатурн». – № 2014120167/11; заявл. 19.05.2014; опубл. 27.08.2015, бюл. №24.

6. Шеховцева Т.В., Шеховцева Е.В. Методика проектирования планитарно-дифференциального редуктора / Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии // Орел, ОГУ имени И.С. Тургенева. 2018. № 2 (328). С. 59 – 69.

7. Пат 2528236 Российская Федерация, МПК7 F02C 7/36. Планетарно-дифференциальный редуктор // Шеховцева Е.В., Никифоров В.А.; заявитель и патентообладатель: Открытое акционерное общество «Научно-производственное объединение «Сатурн». – № 2013139903-06; заявл. 27.08.2013; опубл. 10.09.2014, бюл. № 25.

8. Ерошков В.Ю. Прогресс в области технологий монтажа и испытания морских газотурбинных агрегатов на испытательных стендах и направления их совершенствования // Вестник РГАТУ имени П. А. Соловьева. 2021. № 3 (58). С. 11 – 13.

9. Ерошков В.Ю., Шеховцева Т.В. Конструкторско-технологические решения в области совершенствования редукторных и трансмиссионных узлов газотурбинных агрегатов» // Сборник докладов 8 Международного научно-технического семинара "Современные технологии сборки", Москва: МАМИ. 2023. С. 21 – 33.

10. Ерошков В.Ю., Шеховцева Т.В. Перспективные технологические решения и современное оборудование в области автоматизации сборки силовых агрегатов с многозвенными трансмиссионными связями и редукторными передачами // Научное периодическое издание по материалам XXIV Всероссийской научно-технической конференции "Механики XXI веку", 2025. № 24. С. 156 - 162.

Issues of calculation, design and technology of installation of gearboxes and transmission units of gas turbine engines and units based on them

Eroshkov V.Yu.[1,а], Shehovtseva E.V.[2,б] , Shehovtseva T.V.[3,в]
[1, 2] Public Joint Stock Company "UEC-Saturn", 163 prospect Lenina, Rybinsk, Russia Federation
[3]FSBEI HE "P. A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical University"
[а]eroschkow@mail.ru, [б]evgeniya.shekhovtseva@uec-saturn.ru, [в]prikl_mehanika@mail.ru

Keywords: gas turbine engine power turbine, transmission, gearbox, mounting, centering

The publication reveals the design features of gearboxes, multi-support transmissions and shaft lines of gas turbine engines and units based on them. An example of the design of a power turbine is presented, as well as the assembly requirements for this assembly unit, determined by its operating conditions. The publication pays special attention to the specifics of a gas turbine turbine engine with a power turbine. The issue of the presence of high–speed turbines, complex high-load gearboxes in the design of GTE, and long multicomponent transmissions with damping flexible couplings and support bearings in the design of GTE significantly complicates both the process of their design and manufacture. Accordingly, technical solutions are considered that provide the main points related to alignment, alignment of shafts and transmissions. The requirements for GTD gearboxes are also presented in sufficient detail, and the steps that make it possible to develop a gearbox with specified characteristics are studied. Based on the results of the study, optimal technical and technological solutions in the field of assembly and assembly work, as well as promising areas of application of digital measuring instruments, are proposed.

УДК 621.791.052

Повышение качества сварки профильного проката путём рационализации режимов на основе численного моделирования и экспериментальных исследований

Лобанов П.О.[1,a], Рычков Д.А.[1,b]
[1]Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, 665709, Россия
[a]lobapasha@gmail.com, [b]dielektrik84@mail.ru

Ключевые слова: сварка профильного проката, рационализация режимов, аналитические расчёты, тепловые процессы, дефекты сварки, прочность сварного соединения.

В статье предложен новый комплексный подход к рационализации режимов сварки профильного проката, сочетающий аналитические методы расчёта тепловых процессов с экспериментальной верификацией. Разработана инженерная методика прогнозирования размеров зоны термического влияния и вероятности возникновения дефектов, учитывающая геометрические особенности двутавров и швеллеров. На основе классических решений теплопроводности впервые для профилей данного типа получены количественные зависимости между отклонениями режимных параметров (ток, напряжение, скорость сварки) и остаточной прочностью соединения. Экспериментально подтверждено, что применение предложенной методики позволяет снизить разброс прочностных характеристик на 15–20 % по сравнению с традиционным эмпирическим подбором. Результаты могут быть использованы при разработке технологических карт сварки ответственных металлоконструкций.

Введение.

Сварка профильного проката (двутавров, швеллеров, уголков) остаётся одним из основных способов соединения элементов в строительных и машиностроительных металлоконструкциях. Качество сварных швов определяет надёжность и долговечность всей конструкции. Однако из-за сложной геометрии профилей и неравномерного распределения тепла при сварке часто возникают дефекты: не провары, прожоги, остаточные деформации [1, 2].

Традиционные методы назначения режимов базируются на справочных данных и опыте технолога, что не всегда гарантирует оптимальность. В последние годы активно развиваются подходы, основанные на математическом моделировании тепловых процессов [3, 4], однако их применение к сортаменту профильного проката изучено недостаточно. Особую сложность представляет учёт пространственного теплоотвода в полках и стенке, что требует адаптации существующих моделей.

Цель работы – разработка и апробация методики рационализации режимов сварки профильного проката, включающей аналитический расчёт температурных полей с учётом геометрических особенностей профилей и экспериментальную оценку механических свойств соединений.

Научная новизна заключается в создании инженерной расчётной модели, адаптированной для типовых профилей (двутавр №16, швеллер №12), на основе классических решений теории теплопроводности для движущегося источника тепла. В отличие от существующих подходов, ориентированных на листовые конструкции, впервые предложены поправочные коэффициенты, учитывающие перераспределение тепловых потоков в элементах профиля, и установлены количественные зависимости «параметры режима – прочность шва», позволяющие обоснованно выбирать режимы, минимизирующие дефекты.

Методика исследования.

Исследование включало три последовательных этапа.

Аналитический расчёт тепловых процессов. Для стыкового соединения двутавровой балки (сталь Ст3) выполнены расчёты температурных полей по схеме быстродвижущегося линейного источника тепла (методика Н.Н. Рыкалина) с учётом эффективной тепловой мощности дуги, теплофизических свойств материала и граничных условий. Расчёты проводились для следующих варьируемых параметров: сварочный ток (90–130 А), напряжение (22–26 В), скорость сварки (4–8 мм/с). Определялись максимальная температура в зоне шва, ширина зоны термического влияния (ЗТВ) и скорость охлаждения. Учёт геометрии профиля осуществлялся через поправочные коэффициенты, учитывающие отвод тепла в полки и стенку.

Экспериментальная часть. Проведена серия сварки образцов из двутавра №16 длиной 300 мм методами ММА (электрод УОНИ 13/55) и MIG/MAG (проволока Св-08Г2С). Режимы выбирались по результатам расчётов: оптимальный (расчётный) и два заведомо неоптимальных (заниженный ток и завышенная скорость). После сварки образцы подвергались визуальному контролю, ультразвуковой дефектоскопии и механическим испытаниям на растяжение (разрывная машина ИР 5057-50).

Обработка данных. Выполнено сравнение расчётных и экспериментальных параметров, построены регрессионные зависимости.

Результаты и обсуждение.

Аналитические расчёты. Для оптимального режима (ток 110 А, напряжение 24 В, скорость 6 мм/с) расчётная ширина ЗТВ составила 4,0 мм, максимальная температура в ядре шва – 2180 °С. Распределение температуры по поперечному сечению шва соответствует известным закономерностям: наибольшие градиенты наблюдаются на границе проплавления.

Анализ чувствительности показал, что снижение тока до 90 А приводит к уменьшению расчётной ширины проплавления на 28 % и возрастанию градиента температур, что создаёт условия для образования не провара. Увеличение скорости сварки до 8 мм/с сужает ЗТВ до 2,8 мм и повышает скорость охлаждения в интервале 800–500 °С, что увеличивает риск образования холодных трещин.

Экспериментальные данные. Результаты испытаний образцов сведены в табл. 1.

Таблица 1

Влияние режимов сварки на прочность соединений (метод MIG/MAG)

Режим	Ток, А	Напряжение, В	Скорость, мм/с	Наличие дефектов (УЗК)	Временное сопротивление разрыву, МПа	Отклонение от основного металла, %
1	110	24	6	нет	415	92
2	90	24	6	непровар (2 мм)	320	71
3	110	24	8	микротрещины в ЗТВ	350	78

Для ручной дуговой сварки (ММА) получены аналогичные тенденции, но разброс прочности выше (до ±12 %) из-за влияния квалификации сварщика. Характерные дефекты, соответствующие режимам 2 и 3, представлены на рис. 1.

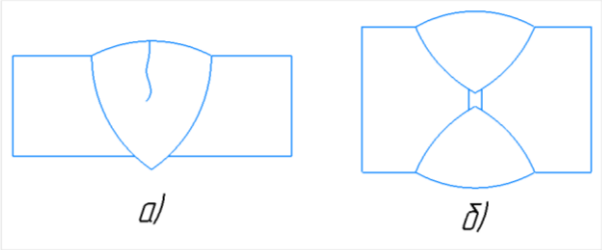


Рис. 1. Характерные дефекты, возникающие при отклонении от оптимального режима: *а* – непровар; *б* – трещины

Сравнение расчётных и экспериментальных данных показало удовлетворительную сходимость: расчётная ширина ЗТВ отличается от измеренной не более чем на 12 %. Это подтверждает применимость предложенной аналитической методики для инженерного прогнозирования. Наибольшее влияние на прочность оказывает ток: его отклонение на 20 % от оптимального снижает несущую способность на 21–23 %. Предложенная методика позволяет для каждого типоразмера профиля заранее определить «окно» рациональных параметров, гарантирующее получение бездефектного соединения.

Выводы.

Разработана инженерная расчётная методика для определения тепловых параметров сварки профильного проката, основанная на классических решениях теплопроводности и учитывающая геометрические особенности профилей. Методика позволяет прогнозировать размеры ЗТВ и температурные градиенты в зависимости от режимов.

Экспериментально подтверждено, что использование аналитических расчётов для выбора режимов (ток, напряжение, скорость) обеспечивает повышение прочности сварных соединений на 15–20 % по сравнению с эмпирическим подходом.

Установлены количественные зависимости: снижение тока на 20 % относительно оптимального вызывает падение прочности на 21–23 %, увеличение скорости на 30 % – на 12–15 %.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке технологических карт сварки балок двутаврового сечения и других профилей.

Литература:

1) Овчинников В.В. Технология ручной дуговой и плазменной сварки и резки металлов. М.: Академия, 2016. 240 с.

2) Калиниченко Н.П., Васильева М.А., Радостев А.Ю. Атлас дефектов сварных соединений и основного металла. Томск: Изд-во ТПУ, 2011. 71 с.

3) Рыкалин Н.Н. Расчёты тепловых процессов при сварке. М.: Машгиз, 1951. 296 с.
Березовский Б.М., Стихин А.С. Математическое моделирование тепловых процессов при дуговой сварке // Сварочное производство. 2019. № 5. С. 12–18.

4) Arkhipov P.V., Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Petrushin S.I. The effect of diamond tool performance capability on the quality of processed surface // Applied Mechanics and Materials. 2013. Vol. 379. P. 124–130.

Improving the quality of welding of shaped rolled products by rationalizing modes based on numerical simulation and experimental studies

Lobanov P.O.[1,a], Rychkov D. A.[1,b]
[1]Bratsk State University, 40 Makarenko st., Bratsk, 665709, Russian Federation
[a]lobapasha@gmail.com, [b]dielektrik84@mail.ru

Keywords: Shaped rolled products welding, rationalization of modes, analytical calculations, thermal processes, welding defects, weld strength.

The paper proposes a new integrated approach to rationalizing welding modes for shaped rolled products, combining analytical calculations of thermal processes with experimental verification. An engineering methodology has been developed for predicting the size of the heat-affected zone and the probability of defects depending on the mode parameters (current, voltage, welding speed), taking into account the geometric features of I-beams and channels. For the first time, for profiles of this type, quantitative dependences between deviations of the mode parameters and the residual strength of the joint have been obtained on the basis of classical heat conduction solutions. It has been experimentally confirmed that the proposed technique allows reducing the scatter of strength characteristics by 15–20 % compared to traditional empirical selection. The results can be used in the development of welding instructions for critical metal structures.

УДК 621.793

Сверхзвуковое дуговое распыление и методы напыления

Сәрсенқызы А[1,a]., Кокаева Г.А.[1,b],Рамазанова Ж.М.[1,c], Рыспек С.А.[1,d], Ілес Ж.Т.[1,e]

[1]Казахский агротехнический исследовательский университет имени Сакена Сейфуллина, город Астана, Республика Казахстан

[a]a.sarsenkyzy@kazatu.edu.kz, [b]gakokaeva@mail.ru, [c] zhanat2005@yandex.kz, [d]23B68134@kazatu.edu.kz, [e] 23B69676@kazatu.edu.kz

Ключевые слова: сверхзвуковое дуговое распыление, газотермическое напыление, электродуговое напыление, защитные покрытия, функциональные покрытия, структура покрытий, адгезия, износостойкость.

В работе рассмотрен метод сверхзвукового дугового распыления как один из перспективных методов нанесения защитных и функциональных покрытий. Описан принцип формирования покрытий на основе электродугового расплавления проволочных электродов и ускорения частиц в сверхзвуковом газовом потоке. Приведены основные преимущества метода по сравнению с традиционным дуговым напылением, включая повышение скорости частиц, улучшение адгезионной прочности и снижение пористости покрытий. Рассмотрены особенности структуры и свойств покрытий, получаемых данным методом, а также основные области его промышленного применения. Показано, что сверхзвуковое дуговое распыление является эффективной и экономически целесообразной технологией для упрочнения и восстановления деталей и механизмов.

Введение.

В современных отраслях промышленности — машиностроении, энергетике и пищевой промышленности – все более широкое распространение получают технологии поверхностного упрочнения деталей. Это связано с необходимостью повышения износостойкости, коррозионной стойкости и ресурса работы изделий без замены основного конструкционного материала. Одним из наиболее эффективных и универсальных способов решения данной задачи является нанесение защитных и функциональных покрытий методами напыления.

Существование большого количества методов напыления обусловлено разнообразием эксплуатационных условий деталей и требований к свойствам покрытий. В этой связи

актуальной является задача обоснованного выбора технологии напыления, обеспечивающей оптимальное сочетание качества покрытия и экономической эффективности процесса.

Виды нанесения покрытий методом напыления.

Газотермическое напыление - объединяет группу методов, в которых материал покрытия нагревается до расплавленного или пластичного состояния и переносится на поверхность основы высокоэнергетическим газовым потоком [1]. Нагревается и переносится газовым потоком.

При газопламенном напылении материал (проволока или порошок) плавится в пламени горючего газа (ацетилен, пропан) при температуре около 3000 °C. Скорость частиц составляет 50–100 м/с и является сравнительно низкой. Покрытие характеризуется высокой пористостью, при этом метод обладает такими преимуществами, как простота и дешевое оборудования.

Электродуговое напыление – отличается более высокой производительностью и эффективным использованием напыляемого материала. Между двумя металлическими проволоками горит электрическая дуга, расплавленный металл распыляется сжатым газом при температуре 4000 °C. Скорость частиц составляет 100–150 м/с. Характеризуется высокой производительностью и экономичностью. Данный фактор ограничивает применение дугового напыления для ответственных деталей, работающих в условиях высоких контактных нагрузок [2, 3].

Плазменное напыление основано на использовании плазменной струи сверхвысокой температуры, что позволяет напылять тугоплавкие материалы, включая керамические и композиционные. Здесь материал плавится в плазменной струе высокой температуры до 10 000 – 15 000°C. Скорость частиц составляет 200–500 м/с. Напыление характеризуется тугоплавких материалов и высокая универсальность [3].

Холодное газодинамическое напыление – это способ нанесения металлических или керамических покрытий, при котором частицы материала (порошок) не плавятся, а разгоняются газовым потоком до сверхзвуковых скоростей и впрыскиваются на поверхность детали, образуя прочное покрытие без плавления частиц. Здесь температура от < 800 °C и Скорость частиц составляет 500–1200 м/с. Приобретает такие свойства, как отсутствие окисления и минимальные термические искажения.

Сверхзвуковое дуговое напыление – это способ нанесения покрытий, при котором распыляемый материал нагревается электрической дугой, а затем переносится и ускоряется сверхзвуковой газовой струёй к поверхности детали [4]. Скорость частиц составляет 400–700 м/с. Полученные покрытия характеризуются высокой плотностью слоев, адгезией к основе, низкой пористостью, меньшим содержанием оксидов в покрытии и высокой износостойкостью.

Известно, что сверхзвуковое дуговое распыление является развитием классического электродугового метода и направлено на устранение его основных недостатков. Преимуществом данного метода являются:

- низкая пористость;
- высокая адгезия;
- минимальное тепловое воздействие;
- возможность использования биоинертных сплавов;
- устойчивость полученных покрытий к абразиву и коррозии.

Сверхзвуковое дуговое напыление наиболее рационально применять для восстановления шнеков маслопрессов, валков, изношенных рабочих поверхностей и других нагруженных элементов пищевых машин.

Как указывалось, выше в процессе напыления между двумя расходуемыми электродами возникает электрическая дуга, расплавляющая материал проволоки, после чего расплавленные частицы уносятся газовой струей, разогнанной в сопле до сверхзвуковой скорости. Применение сверхзвукового газового потока обеспечивает резкое увеличение

кинетической энергии частиц. При их соударении с поверхностью основы происходит интенсивная пластическая деформация и формирование прочных межламеллярных связей. В результате получается плотное равномерное покрытие с низкой пористостью, пониженным содержанием оксидов и высокой адгезией к подложке.

Сравнительный анализ показывает, что сверхзвуковое дуговое распыление является обоснованным выбором при необходимости получения износостойких и долговечных покрытий при по сравнению с плазменными и детонационными технологиями.

Сверхзвуковое дуговое распыление может найти применение при восстановлении и упрочнении валов, шнеков пищевого оборудования, посадочных поверхностей, деталей насосного и энергетического оборудования. Перспективы развития метода связаны с оптимизацией газодинамических параметров струи, расширением ассортимента напыляемых материалов и автоматизацией технологического процесса.

Заключение.

Для получения износостойких, коррозионостойких покрытий, а также для увеличения срока службы изделий машиностроения наиболее эффективными являются технологии напыления.

Среди различных методов особое место занимает сверхзвуковое дуговое напыление. Покрытия, полученные данным методом, сочетают в себе высокую плотность покрытия, низкую пористость, прочную адгезию и минимальное тепловое воздействие. Благодаря этим преимуществам данный метод является оптимальным решением для восстановления и упрочнения нагруженных деталей, особенно в пищевой, энергетической и машиностроительной отраслях, и имеет значительные перспективы дальнейшего развития.

Литература:

1. Гладкий А. В., Кудинов В. В. Газотермические покрытия в машиностроении. — М.: Машиностроение, 2010.

2. Кудинов В. В. Плазменное и дуговое напыление. — М.: Металлургия, 2008.

3. Федоров В. П., Ермаков А. Н. Современные методы газотермического напыления. — СПб.: Политехника, 2015.

4. Коломейченко А.В. и др. Свойства покрытий, полученных сверхзвуковой электродуговой металлизацией с аэрозольным флюсованием //Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия. – 2022.

Информация о финансировании.

Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки ивысшего образования Республики Казахстан (грант №AP26100883).

Supersonic Arc Spraying and Coating Methods

Sarsenkyzy A.[1,a], Kokayeva G.A.[1,b], Ramazanova Zh.M. [1,c], Ryspek S.A. [1,d], Iles Zh.T. [1,e]

[1]Saken Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, Republic of Kazakhstan

[a]a.sarsenkyzy@kazatu.edu.kz, [b]gakokaeva@mail.ru, [c]zhanat2005@yandex.kz, [d]23B68134@kazatu.edu.kz, [e]23B69676@kazatu.edu.kz

Keywords: supersonic arc spraying, thermal spraying, electric arc spraying, protective coatings, functional coatings, coating structure, adhesion, wear resistance.

This paper considers the method of supersonic arc spraying as one of the promising methods for applying protective and functional coatings. The principle of coating formation based on electric arc melting of wire electrodes and acceleration of particles in a supersonic gas flow is

described. The main advantages of the method over conventional arc spraying are presented, including increased particle velocity, improved adhesive strength and reduced coating porosity. The features of the structure and properties of coatings obtained by this method are considered, as well as the main areas of its industrial application. It is shown that supersonic arc spraying is an effective and economically feasible technology for strengthening and repairing parts and mechanisms.

УДК 004.942:681.5

Методология цифрового описания деталей и технологических возможностей оборудования в системе ТПП машиностроительного предприятия

Долгов А.Б.[1,a], Никифоров А.А. [1,2,b], Бочкарев П.Ю.[3,c]
[1]АО «Конструкторское бюро промышленной автоматики», г. Саратов, Российская Федерация;
[2]ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», г. Саратов, Российская Федерация,
[3]Камышинский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», г. Камышин, Российская Федерация
[a] andrdolgov@mail.ru; [b] ieei_director@mail.ru; [c] bpy@mail.ru

Ключевые слова: цифровая модель, технологическая подготовка производства, математическое моделирование, графовое представление, фрезерная обработка

В статье рассматриваются проблемы автоматизации технологической подготовки производства (ТПП) в машиностроении в условиях динамичного обновления номенклатуры и ужесточения требований к качеству продукции. Обоснована необходимость перехода к цифровой модели производства, интегрирующей административные и производственные процессы в единую информационную среду. Выявлены ограничения существующих систем автоматизированного проектирования технологических процессов (САПР ТП), связанные с низкой степенью автоматизации, недостаточной формализацией исходных данных и оторванностью от реальных производственных условий. В качестве решения предложена методология цифрового описания деталей и технологических возможностей оборудования, базирующаяся на математическом моделировании и графовом представлении информации. Особое внимание уделено формализации взаимосвязей поверхностей, размерно-точностных характеристик и параметров технологического оснащения применительно к фрезерной обработке. Реализация предложенного подхода позволяет повысить уровень автоматизации ТПП, сократить сроки проектирования, улучшить качество технологических решений и создать основу для построения интеллектуальных систем нового поколения.

Введение.

В современных условиях, когда сжаты сроки освоения и выпуска продукции, а запросы к точности приборов опережают технологический предел типового оборудования, обоснованным способом сохранить низкую себестоимость становится переход к цифровой модели производства. Цифровая модель производства базируется на слиянии административных и производственных процессов в общую информационную систему, непрерывное отслеживание состояния всех ресурсов — от микроклимата в цехах и износа инструмента до параметров конкретных деталей, возможность корректировать ТПП в режиме реального времени, адаптируясь под текущие условия. Внедрение данных мер

позволяет достичь требуемого качества продукции при одновременном росте пропускной способности предприятия.

Растущий спрос на инновационную продукцию вынуждает предприятия повышать эффективность в условиях регулярного обновления ассортимента. Это диктует необходимость сокращения цикла технологической подготовки и повышения точности проектных решений. Одним из инструментов здесь выступают автоматизированные системы (САПР ТП), адаптирующиеся к динамике производства. В текущий момент можно выделить ряд критических проблем в области автоматизации технологической подготовки производства (ТПП): большинство современных комплексов АСТПП обладают низкой степенью автоматизации и нуждаются во внедрении интеллектуальных алгоритмов. Оторванность систем от реальных производственных условий существенно снижает их практическую ценность. Традиционные методы унификации и типизации технологических процессов не находят должного воплощения в современном ПО.

Высокая итерационность проектирования и громоздкость документальных процедур требуют применения PDM-систем и workflow-технологий, однако их внедрение остается фрагментарным. Переход к виртуальным моделям производства требует принципиально иного уровня информационной интеграции между элементами процедуры. Можно сделать вывод, что ТПП сегодня — это сложная система, существующая в условиях динамичной цифровой среды. Для соответствия концепции «цифрового производства» необходим переход к разработке интеллектуальных АСТПП нового поколения. Центральным звеном ТПП выступает проектирование технологических процессов (ТП) изготовления деталей. Результативность этого этапа напрямую зависит от качества исходных данных, которое определяется их полнотой, системной структурированностью и оперативностью доступа к ним. Несмотря на то, что конструкторская документация (КД) служит первичным источником данных для реализации производственного плана, она обладает определенными недостатками при описании информации. Объективно описывая конечный продукт, КД не содержит напрямую информации по технологии его создания. Задача переработать конструкторское описание в детальную технологическую документацию, определяющую порядок выполнения работ, входит в компетенцию технологических служб при формировании технологии производства.

Внедрения методик интегрирования характеристик и требований, указанных в КД для использования интеллектуальными программными средствами, представляется актуальной задачей для проведения исследований, решение которой повысит степень автоматизации при ТПП.

Целью работы является анализ особенностей, подходов, предпосылок цифрового описания продуры ТПП и представление методики построения математических моделей обрабатываемых деталей и технологических возможностей обрабатывающего оборудования.

Для практической отработки выбирается развитие и углубленная формализации математических моделей описания технологических возможностей фрезерного оборудования, деталей, обрабатываемых на них и используемой технологической оснастки.

Методы.

При использовании методов анализа КД традиционным способом как правило не применяется свойство машиночитаемости, что не отвечает требованиям по ускоренному цифровому представлению и обработки информации в современное время.

Проектирование ТПП производится традиционно без использования средств автоматизации, доля ручной труда достаточно высокая в классических производственных отраслях. Это увеличивает затраты ТПП, удлиняет сроки внедрения новых технологий, препятствует повышению качества и снижению себестоимости производства.

Использование систем автоматизированного проектирования (САПРов) механизирует ТПП, обобщает базы данных. Однако занесение информации в базы, производится в ручном режиме. Снятие технических характеристик, самостоятельное интерпретация, анализ технологических характеристик детали, изделия выполняется инженером без системного

подхода и носит субъективных характер. Анализ и обработка КД вручную технологом, при большом потоке документации, задерживает процесс ТПП.

Для развития применения систем автоматизации при ТПП, требуется создания общего единого метода описания детали как объекта производства, для использования данной информации в машиночитаемом виде в процессе проектирования технологической операции.

В классических системах автоматизированного проектирования технологических процессов (САПР ТП) основным объектом является геометрическая CAD-модель детали. Однако для решения задач технологического проектирования — таких как назначение последовательности обработки, выбор баз, расчет операционных размеров и допусков, выполнения размерного расчета для подтверждения собираемости — одной геометрии недостаточно. Критически важной является информация о размерно-точностных взаимосвязях поверхностей, определяющая функциональные требования к детали и закладывающая основу для построения размерных цепей. В настоящее время эти связи, как правило, либо не формализованы в цифровой модели, либо существуют в виде технических требований на чертеже, что требует от технолога длительной и подверженной ошибкам ручной интерпретации.

В этой связи перспективным направлением исследований является разработка методологии построения математических моделей описания детали и технологических возможностей оборудования**.**

Ранее выполненные исследования позволили частично систематизировать подходы анализа взаимосвязей характеристик таких, как требования указания размеров на чертеже детали. Среди большого числа разработок в этой области можно выделить общие моменты, на которые авторы в той или иной степени рекомендуют ориентироваться при простановке размеров на чертежах деталей [1-4]. Например, имеются попытки классифицировать размеры, предлагая различать основные размеры и примыкающие, размеры, входящие в размерные цепи изделия, и свободные размеры.

Несовершенные методы получения информации в традиционном подходе проработки документации затрудняет анализ при ТПП, что препятствует повышению доли цифровизации при освоении производства, повышает трудоемкость ТПП производства изделия, снижает ее качество, увеличивает затраты времени на отладку технологических процессов

Подход к решению данной проблемы выбран на основе систематизации и цифрового моделирования процедур этапов технологической подготовки производства (ТПП) с учетом их взаимодействия не только внутри системы, но и с процедурами реализации ТП в производственной среде в реальном времени.

Чтобы перевести действия проектировщика в цифровые модели, готовые для программного обработки, требуются исследования структуры баз данных — их полноты, надежности и механизмов наполнения. В предыдущих работах создана методология представления детали как графовой структуры с переходом к информационной модели, содержащей все ключевые данные для разработки технологии [5, 6, 7].

Следующим шагом становится описание факторов и зависимостей для обрабатывающего оборудования обработки и технологического оснащения. Это позволяет сравнивать реальные возможности станков с параметрами детали и выбирать оптимальные средства технологического оснащения. Такая модель устанавливает связи между характеристиками заготовки и оснастки, отражая возможности оборудования: базы данных по связям поверхностей, допуски размеров, параметры качества с учетом функциональности детали, зоны обработки и конфигурации приспособлений для фиксации [8, 9].

Для расширения методологии заполнения баз знаний через формализацию связей элементов ТП предлагается поэтапный анализ на примере операции фрезерования. Планируется углубить изучение и описать взаимосвязи графо-аналитическим методом: влияния метода фрезерования на качество поверхности в переходе; пределов размеров и

характеристик баз; требований к пространственному положению баз для монтажа оснастки в координатах станка; диапазона зоны инструмента; зависимостей между поверхностями детали, оснасткой и оборудованием [10].

Концепция цифрового описания собирает данные о потенциале оборудования — от ограничений зоны до точностных параметров и компоновки с приспособлениями. Дальнейшая проработка взаимосвязей при выполнении фрезерных операций охватит влияние метода обработки на качество поверхности, конфигурацию базирующих поверхностей, ограничение установки в системе координат оборудования, зоны обработки и взаимодействия «деталь – оснастка – станок».

Выводы.

Внедрение методологии формализации описания данных по возможностям фрезерных операций (оснастка, инструмент, способ обработки заготовки, точность) для практической реализации при создании технологий обработки на фрезерном оборудовании, создаст универсальные инструменты роста производительности ТПП в условиях разнообразной номенклатуры. Модели описания проектных процедур фрезерования могут быть интегрируемы в автоматизированные системы ТПП.

Детальная формализация получения и обработки первичных данных о продукции изделия — ключевой этап цифровизации подготовки производства. Математическая модель базы данных для фрезерования, распространенного в машиностроении, способствует системам автоматизированного проектирования ТП, адаптированным к реальным условиям.

Литература:

1. Справочник технолога / под ред. А. Г. Суслова. — Москва : Инновационное машиностроение, 2019. — 800 с.

2. Суслов А. Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. — Москва : Машиностроение, 2000. — 320 с. : ил.

3. Базров Б. М. Базис технологической подготовки машиностроительного производства : монография. — Москва : КУРС, 2023. — 324 с.

4. Базров Б. М. Модульная технология в машиностроении. — Москва : Машиностроение, 2001. — 368 с. : ил.

5. Митин С. Г., Бочкарев П. Ю. Инновационные аспекты автоматизации проектирования операций механической обработки в многономенклатурном производстве // Инновационная деятельность. — 2013. — № 4 (27). — С. 36–41.

6. Бочкарев, П. Ю. Метод отображения технологических возможностей механообрабатывающего оборудования атрибутами теории графов / П. Ю. Бочкарев // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2025. – № 1(163). – С. 38-48. – DOI 10.30987/2223-4608-2025-1-38-48. – EDN OVBXRP.

7. Chakraborty S., Chowdhury R. Graph-theoretic-approach-assisted Gaussian Process for Nonlinear Stochastic Dynamic Analysis Under Generalized Loading // Journal of Engineering Mechanics. 2019. Vol. 145. № 12. P. 04019105.

8. Решетникова Е. П., Бочкарев П. Ю. Концепция группирования деталей механообрабатывающих производств при формировании рационального маршрута технологического процесса их изготовления // Наукоемкие технологии в машиностроении. — 2021. — № 3 (117). — С. 19–25.

9. Бочкарев П. Ю., Решетникова Е. П. Повышение качества технологической подготовки механообрабатывающих производств на основе расширенного анализа конструктивных характеристик деталей // Наукоемкие технологии в машиностроении. — 2023. — № 12 (150). — С. 30–36. — DOI: 10.30987/2223-4608-2023-30-36.

10. Бочкарев, П. Ю. Методические принципы структурированной унификации информационного обеспечения технологической подготовки механообрабатывающих производств / П. Ю. Бочкарев // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2025. – № 8(170). – С. 41-48. – DOI 10.30987/2223-4608-2025-8-41-48. – EDN QBELTW.

Methodology for digital description of parts and technological capabilities of equipment in the TPP system of a machine-building enterprise

Dolgov A.B.[1,ф], Nikiforov A.A.[1,2b], Bochkarev P.Yu.[3,c]
[1]JSC "Design Bureau of Industrial Automation", Saratov, Russian Federation
[2]Yuri Gagarin Saratov State Technical University, Saratov, Russian Federation
[3]Kamyshin Technological Institute (branch) of Volgograd State Technical University, Kamyshin, Russian Federation
[a] andrdolgov@mail.ru; [b] ieei_director@mail.ru; [c] bpy@mail.ru

Keywords. Digital model, technological production preparation, mathematical modeling, graph representation, milling

The article examines the problems of automating technological production preparation (TPP) in mechanical engineering under conditions of rapidly changing product ranges and increasing quality requirements. The necessity of transitioning to a digital production model that integrates administrative and manufacturing processes into a unified information environment is substantiated. Limitations of existing computer-aided process planning (CAPP) systems are identified, including low automation, insufficient formalization of initial data, and disconnection from real production conditions. As a solution, a methodology for the digital description of parts and technological capabilities of equipment is proposed, based on mathematical modeling and graph-based representation of information. Special attention is paid to the formalization of relationships between surfaces, dimensional and accuracy characteristics, and parameters of technological tooling for milling operations. The implementation of the proposed approach improves the level of TPP automation, reduces design time, enhances the quality of technological solutions, and creates a foundation for the development of next-generation intelligent systems.

УДК 621.9.02

Проблемы и перспективы обработки новых труднообрабатываемых материалов с применением комбинированного электроалмазного способа по методу двойного травления

Лосев Е.Д. [1a], Климов Н.Н.[1,b], Чуев В.Д.[1,c]
[1]Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия
[a]_elk_@mail.ru

Ключевые слова: труднообрабатываемые материалы, жаропрочные сплавы, титановые сплавы, керамические композиции, электроалмазная обработка, двойное травление, комбинированные методы, шлифование, электроэрозионная обработка, электрохимическая обработка.

В работе рассмотрены современные проблемы обработки новых труднообрабатываемых материалов, к которым относятся высокопрочные, жаро- и коррозионностойкие сплавы, керамические и композиционные материалы, а также аморфные и нанокристаллические сплавы. Показано, что основными технологическими ограничениями являются высокие силы и температуры в зоне обработки, интенсивный износ инструмента, снижение размерной точности и ухудшение качества поверхностного

слоя. Проанализированы методы механической, абразивной, электрофизической, электрохимической и комбинированной обработки труднообрабатываемых материалов с указанием их достоинств и ограничений. Особое внимание уделено комбинированному электроалмазному способу обработки по методу двойного травления, позволяющему одновременно осуществлять механическое срезание и электрохимическое удаление припека, что снижает засаливание алмазного круга и уменьшает тепловую нагрузку. Сделан вывод о высокой перспективности данного метода для отделочной обработки труднообрабатываемых материалов, особенно в условиях, когда требуется высокая точность, стабильное качество поверхности и малое термическое воздействие.

Развитие авиационной, энергетической, медицинской и космической техники приводит к все более широкому применению материалов с высокими эксплуатационными характеристиками: высокопрочные, жаропрочные и коррозионностойкие сплавы, керамические и композиционные материалы, а также аморфные и нанокристаллические сплавы. Эти свойства, с одной стороны, обеспечивают высокие эксплуатационные ресурсы изделий, а с другой — резко ухудшают технологичность их обработки. Вследствие этого традиционные методы механической обработки часто оказываются недостаточными с точки зрения производительности, износоустойчивости инструмента и качества получаемой поверхности.[1-4]

К труднообрабатываемым материалам относятся, в частности, титановые и никелевые сплавы, жаропрочные сплавы на основе никеля и кобальта, армированные волокнами полимерные и керамические композиты, а также твердые керамики. Общими особенностями этих материалов являются высокая прочность и твердость, низкая теплопроводность, склонность к пластическим деформациям и образованию трещин, а также высокая абразивная активность при контакте с инструментом. В результате возникают значительные силы резания, интенсивный износ режущего и шлифовального инструмента, повышенная склонность к вибрациям и термическим повреждениям поверхности.[4-6]

Указанные факторы обусловливают необходимость применения нетрадиционных и комбинированных методов обработки, в которых сочетаются механические и физико-технические принципы съема материала. Одним из перспективных направлений является комбинированная электроалмазная обработка по методу двойного травления, позволяющая снизить тепловую и силовую нагрузку на инструмент, уменьшить засаливание алмазного круга и обеспечить стабильное качество поверхности. В данной работе представлен сравнительный анализ существующих методов обработки труднообрабатываемых материалов, даны оценки их достоинств и недостатков, а также оценка целесообразности применения комбинированного электроалмазного способа по методу двойного травления.[4, 7-9]

К числу основных проблем обработки труднообрабатываемых материалов относится высокий уровень силовых и тепловых нагрузок, которые приводят к интенсивному износу инструмента, снижению жесткости технологической системы и ухудшению геометрической точности. В условиях низкой теплопроводности многие из этих материалов характеризуются концентрацией тепловыделения в зоне контакта инструмента с заготовкой, что вызывает прижоги, остаточные напряжения, микротрещины и другие повреждения поверхностного слоя.[3, 6, 7]

Второй серьезной проблемой является высокая абразивность и химическая инертность труднообрабатываемых материалов. Это приводит к ускоренному износу режущей и шлифующей части инструмента, нарушению геометрии режущих кромок и увеличению удельной энергоемкости процесса. В результате производительность обработки снижается, а стоимость единицы объема снимаемого материала возрастает, что делает технологию менее экономически эффективной.[3, 4]

Третьей группой проблем является получение стабильного качества поверхности. Для труднообрабатываемых материалов характерны повышенная шероховатость, склонность к

образованию микротрещин и выкрашиваний, а также неоднородность поверхностного слоя. Эти факторы особенно критичны при изготовлении деталей ответственного назначения, где требуется высокая точность и надежность эксплуатации.[5, 6]

К традиционным методам относятся точение, фрезерование, сверление и другие виды лезвийной обработки. Их основными достоинствами являются технологическая простота, широкая распространенность оборудования и относительно низкая стоимость внедрения. Однако для труднообрабатываемых материалов эти методы ограничены высоким уровнем сил и температур, интенсивным износом инструмента и низкой стабильностью качества поверхности.[3, 4, 6]

Абразивные методы, включая шлифование и алмазное шлифование, широко применяются на отделочных операциях при обработке твердых и хрупких материалов. Достоинствами являются высокая точность формообразования и возможность получения малой шероховатости поверхности. Недостатками являются быстрое засаливание шлифовального круга, высокая удельная энергоемкость, вероятность прижогов и термических повреждений, а также необходимость периодической правки и балансировки инструмента.[4, 8, 9]

Электроэрозионная обработка эффективна для обработки токопроводящих материалов с высокой твердостью и сложной формой. Преимуществами являются малые механические усилия, возможность формирования сложнопрофильных поверхностей и высокая стойкость инструмента. Недостатками являются наличие термически измененного слоя на поверхности, сравнительно низкая производительность при больших объемах съема материала, а также необходимость обеспечения стабильности электропроводности и параметров импульсного разряда.[7, 10]

Электрохимическая обработка основана на анодном растворении материала в электролите и характеризуется отсутствием значительных механических напряжений в зоне обработки. Это позволяет обрабатывать жаропрочные и коррозионностойкие сплавы без прижогов и термических дефектов. Однако метод требует сложного контроля межэлектродного зазора, развитой системы циркуляции электролита и учета экологических аспектов, что усложняет его реализацию в условиях серийного производства.[7,9]

Комбинированные технологии объединяют преимущества механических, электрофизических и электрохимических принципов обработки. К ним относятся электрофизико-механические, электрохимико-механические, ультразвуковые и комбинированные электроалмазные процессы. Их основное преимущество заключается в возможности распределения тепловой и силовой нагрузки между различными физическими механизмами, что позволяет снизить износ инструмента, повысить производительность и улучшить качество поверхности.[4]

В табл. 1 приведены основные характеристики рассмотренных методов обработки труднообрабатываемых материалов.

Таблица 1

Сравнительные характеристики методов обработки

Метод	Достоинства	Недостатки
1	2	3
Лезвийная обработка	Технологическая простота, доступность оборудования, высокая универсальность	Высокие силы и температуры, быстрый износ инструмента, ограничения по точности и качеству поверхности [3, 6]
Абразивная и алмазная обработка	Высокая точность, малая шероховатость, возможность обработки твердых материалов	Засаливание круга, высокая удельная энергоемкость, риск прижогов и термических повреждений [4, 8]

продолжение таблицы 1

1	2	3
Электроэрозионная обработка	Обработка твердых токопроводящих материалов, малые механические усилия, возможность формирования сложных профилей	Наличие термически измененного слоя, сравнительно низкая производительность при больших съемах, сложность режимов [7, 10]
Электрохимическая обработка	Отсутствие механических напряжений, высокая применимость к жаропрочным сплавам, малая склонность к прижогам	Сложность контроля межэлектродного зазора, необходимость электролитного хозяйства, экологические ограничения [7, 9]
Комбинированные методы	Синергия механизмов, снижение тепловой и силовой нагрузки, улучшение стабильности процесса	Сложность оборудования и настройки режимов, более высокая стоимость технологии [4]

Комбинированный электроалмазный способ по методу двойного травления представляет собой процесс, при котором алмазный круг одновременно участвует в механическом съеме материала и в электрическом/электрохимическом воздействии на зону обработки. Метод двойного травления основан на одновременной непрерывной правке рабочей поверхности круга и электрохимическом удалении припека материала с рабочей поверхности инструмента, что предотвращает его засаливание и обеспечивает стабильное состояние режущих вершин алмазных зерен.[8, 9]

Достоинствами данного способа являются снижение сил резания, повышение коэффициента режущей способности круга, уменьшение энергоемкости процесса и улучшение качества обработанной поверхности по сравнению с традиционным шлифованием. Кроме того, метод позволяет сохранять форму рабочей поверхности круга в течение длительного времени, что особенно важно при высокоточной отделочной обработке ответственных деталей из инструментальных сталей и труднообрабатываемых сплавов.[4, 8, 9]

Недостатками комбинированного электроалмазного способа являются повышенная сложность технологической системы, необходимость точной стабилизации электрических параметров и режимов обработки, а также повышенные требования к системе электролита и охлаждения. В то же время именно эти особенности определяют возможность тонкого управления процессом и достижения высокой воспроизводимости результатов.[4, 9]

С научно-технической точки зрения комбинированный электроалмазный способ по методу двойного травления является одним из наиболее перспективных направлений для финишной обработки труднообрабатываемых материалов. Его перспективность обусловлена тремя ключевыми факторами: снижением тепловой нагрузки на поверхности, уменьшением износа алмазного инструмента и обеспечением самозатачивания и постоянной активности его рабочей части.

Наиболее рационально применение данного метода при обработке инструментальных сталей, высокопрочных сплавов, а также некоторых композиционных и твердых материалов, где важны высокая точность, стабильность геометрии и отсутствие выраженных термических повреждений. В условиях растущих требований к качеству и надежности изделий именно комбинированные методы, включая электроалмазный способ по методу двойного травления, позволяют обеспечить оптимальный баланс между производительностью, точностью и стоимостью обработки.

Литература:

1. Григорьев, С. Н. Обработка труднообрабатываемых материалов: учебное пособие / С. Н. Григорьев, В. В. Маслов, А. В. Макаров. – М.: Машиностроение, 2020. – 320 с.
2. Климов, В. Л. Механическая обработка жаропрочных и титановых сплавов / В. Л. Климов. – М.: Машиностроение, 2018. – 276 с.
3. Козловский, Н. В. Справочник технолога машиностроителя. Т. 2: Обработка материалов резанием / Н. В. Козловский, А. Н. Козловский. – М.: Машиностроение, 2019. – 576 с.
4. Лебедев, В. И. Технология металлообработки: учебник для вузов / В. И. Лебедев, Л. Н. Варфоломеев. – СПб.: Политехника, 2007. – 496 с.
5. Попов, В. Ю. Теоретические основы комбинированной электроалмазной обработки труднообрабатываемых материалов / В. Ю. Попов. – Братск: БрГУ, 2023. – 112 с. (Научные доклады по направлению «Механика и технология обработки материалов»).
6. Яковенко, Л. Д. Электроалмазное шлифование и заточка металлорежущих инструментов / Л. Д. Яковенко. – М.: Изд во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2022. – 240 с.
7. Жарков, В. Н. Электрофизические методы обработки материалов в машиностроении / В. Н. Жарков. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд ние, 1983. – 160 с.
8. Носенко, В. А. Физико химические методы обработки материалов в машиностроении / В. А. Носенко, М. В. Даниленко. – Киев: Вища школа, 1990. – 304 с.
9. Кузнецов, В. В. Физико технические методы обработки в машиностроении: учебное пособие / В. В. Кузнецов. – СПб.: Изд во СПбГПУ, 2018. – 178 с.
10. Абрамов, О. В. Ультразвуковая обработка материалов / О. В. Абрамов. – М.: Машиностроение, 1984. – 280 с.

Problems and prospects of processing new hard-to-machine materials using a combined electrodiamond method by the double etching method

Losev E.D.[1,a], Klimov N.N.[1,b], Chuev V.D.[1,c]
[1]Bratsk State University, 40 Makarenko st., Bratsk, Russian Federation
[a]_elk_@mail.ru

Keywords: hard-to-machine materials, heat-resistant alloys, titanium alloys, ceramic composites, electrodiamond machining, double etching, combined methods, grinding, electrical discharge machining, electrochemical machining.

This paper examines current challenges in machining new, difficult-to-machine materials, including high-strength, heat- and corrosion-resistant alloys, ceramic and composite materials, as well as amorphous and nanocrystalline alloys. It is shown that the main technological limitations include high forces and temperatures in the machining zone, intense tool wear, reduced dimensional accuracy, and deterioration of the surface layer quality. The article analyzes mechanical, abrasive, electrophysical, electrochemical, and combined machining methods for difficult-to-machine materials, highlighting their advantages and limitations. Particular attention is paid to the combined electrodiamond machining method using a double-etching method, which allows for simultaneous mechanical cutting and electrochemical removal of deposits, reducing diamond wheel clogging and lowering thermal load. It is concluded that this method has high potential for finishing difficult-to-machine materials, especially in conditions where high precision, stable surface quality and low thermal impact are required.

УДК 004.8, 658.512

Использование технологии компьютерного зрения с искусственным интеллектом на производствах мехатроники и робототехники

Мохначев В.А.[1,a], Попов В.Ю.[1,b], Рычков Д.А.[1,c]
[1]Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, 665709, Россия
[a]vadim.mohnachev@gmail.com, [b]slapopov@gmail.com, [c]dielektrik84@mail.ru

Ключевые слова: искусственный интеллект, автоматизация машиностроения, CV AI, компьютерное зрение, контроль качества, цифровизация производства.

Статья посвящена анализу внедрения систем компьютерного зрения с искусственным интеллектом (CV AI) на машиностроительных производствах как альтернативы традиционным методам контроля качества. Рассматриваются недостатки ручного визуального осмотра (пропуск 20–30% брака, субъективность) и ограничения неразрушающих технологий (ультразвук, магнитопорошковый контроль), требующих остановок линий и подготовки поверхностей.

CV AI обеспечивает точность обнаружения дефектов 95–99,8%, высокоскоростную обработку на конвейере и интеграцию с MES-системами для управления процессами. Описаны архитектуры, метрики оценки и этапы реализации. Приведены кейсы POSCO (экономия 600 млн KRW/год), Siemens Amberg (годность 99%), BMW, Северсталь с ROI до 1900% и окупаемостью 6–12 месяцев.

Технология повышает эффективность оборудования на 10–20%, снижает брак на 20–60% и создаёт единую цифровую систему управления качеством на производстве.

Введение.

Наши прошлые работы [1–5], посвященные процессам алмазного и электроалмазного шлифования, детально раскрывают такие ключевые явления, как дефекты алмазных зерен [1], механизмы их разрушения [2], адгезионное взаимодействие в зоне контакта [3], а также температурные режимы [4] и измерение малых сил с помощью специализированных тензометрических вставок [5]. Все эти параметры – состояние режущей поверхности инструмента, характер износа, интенсивность адгезии, тепловое поле и динамика сил – являются критическими для обеспечения качества обработки в машиностроительном производстве. В традиционном производстве их контроль требует высокой квалификации персонала, трудоемких замеров или периодических остановок оборудования. Именно здесь технологии компьютерного зрения, усиленные методами искусственного интеллекта, открывают новые возможности для непрерывного автоматизированного мониторинга и управления.

Современные системы компьютерного зрения, обученные на размеченных данных, способны в реальном масштабе времени распознавать дефекты алмазных зерен по морфологии поверхности инструмента, оценивать степень их разрушения, фиксировать начало адгезионного износа и контролировать геометрические параметры обрабатываемой детали. Интеграция таких систем с данными тензометрических измерений [5] и температурных датчиков позволяет создавать гибридные интеллектуальные модели, прогнозирующие момент выхода инструмента из строя или необходимость корректировки режимов обработки. Как отмечают в работе [6], применение ИИ в промышленности становится драйвером повышения эффективности, а исследования [7] подчеркивают важность цифровизации для производственного сектора и образования [8]. Таким образом, синергия фундаментальных знаний о физике процессов шлифования, накопленных в

приведенных работах, с современными алгоритмами компьютерного зрения и машинного обучения позволяет перейти к созданию «умных» шлифовальных станков, способных самостоятельно диагностировать состояние инструмента и адаптировать технологические параметры, что полностью соответствует трендам цифровой трансформации, описанным в работах [9] и [10].

Традиционные методы контроля качества, используемые на производстве, являются его слабым местом. Они включают в себя ручной труд либо иные неразрушающие технологии, которые имеют ряд недостатков, а именно зависимость от человеческого фактора, низкой скорости, ограниченной универсальности и высокой стоимости. Эти недостатки несут в себе убытки предприятию, складывающиеся из пропуска брака (20-30%) и простоев конвейера.

Все эти подходы требуют обработки поверхности детали, квалифицированных специалистов и многоэтапных процедур, что и замедляет производство на 30–60%. При ручном визуальном осмотре изделий, человек может пропускать мелкие дефекты, а также, на проверку влияет субъективность оператора. Ультразвуковой и радиографический методы – не могут обнаружить поверхностные проблемы. Магнитопорошковый и капиллярный методы ограничены типом материала и очисткой. Тепловой метод зависит от среды и покрытий. Акустико-эмиссионный метод требует нагрузки и сложной интерпретации.

Таблица 1

Распространенные дефекты на производстве

Тип дефекта	Примеры	Доля брака, (%)	Последствия
Поверхностные	Царапины, вмятины, загрязнения	40-50	Коррозия, неправильная работа покрытий
Геометрические	Трещины, деформации, неровности	25-35	Нарушение допусков, вибрации
Сварные соединения	Неплотные швы, поры, непровары	15-20	Разрушение под нагрузкой
Сборочные	Смещения, зазоры, несоосность	10-15	Поломки при эксплуатации

Несмотря на специализацию ни один из методов не обеспечивает полной картины в реальном времени. Они не интегрируются в конвейер, игнорируют сложную геометрию, повышая брак на 10–20%.

Цель исследования: провести комплексный анализ экономического эффекта реальных примеров внедрения и перспективы развития систем CV AI на машиностроительных производствах для обоснования целесообразности их автоматизированного применения в контроле качества.

Методика исследования посвящена анализу применения систем CV AI для автоматизированного контроля качества на машиностроительном производстве. Работа использует теоретический и сравнительный подходы с акцентом на изучение реальных производственных примеров. Теоретический анализ включает обзор современных моделей CV AI и сравнение их с традиционными методами неразрушающего контроля, выявляя ограничения ручного труда и спецоборудования по скорости, точности и универсальности.

Сравнительный подход основан на примерах из практики: внедрение CV AI на различных машиностроительных предприятиях, российских производствах и глобальных отчетах. Анализ проводился по метрикам эффективности: F1-score, время обработки, экономический эффект и интеграция в конвейер.

Результаты и обсуждение.

Системы CV AI на машиностроительных производствах работают по принципу непрерывного видеомониторинга конвейера: камеры захватывают изображения деталей в реальном времени, нейросети анализируют их на дефекты, а система автоматически

сигнализирует или сортирует брак. Процесс автоматизирован, исключает человеческий фактор и интегрируется в производство без остановок.

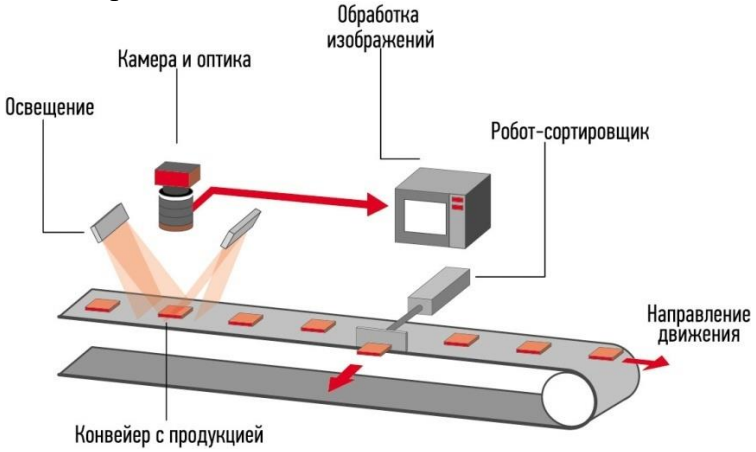


Рис. 1. Схема работы CV AI

CV AI дают производствам значительные преимущества: повышение точности контроля качества, ускорение процессов, снижение брака и затрат. Реальные примеры по всему миру подтверждают ROI до 1900% и сокращение отходов на 90%.

Технология обнаруживает дефекты (царапины, трещины, зазоры) с точностью 98–99,8%, минимизируя человеческий фактор. На сталелитейном заводе Matroid точность выросла с 70% до 98%, сэкономив $2 млн в год и дав ROI 1900%. Росатом в России снизил брак с 2,3% до 0,9%, уменьшив расходы на обслуживание на 30%.

Автоматизированный контроль на конвейере ускоряет инспекцию в 10–15 раз без остановок. BMW и Tesla сократили брак на 90%, повысив пропускную способность за счет реального времени анализа. Siemens уменьшила простои на 42%, операционные расходы на 38% и сэкономила $140 млн за год.

CV AI оптимизирует логистику, прогнозирует поломки и снижает трудозатраты на 70–75%. PepsiCo оцифровала процессы, сэкономив терабайты данных на обучение ИИ для запасов и маршрутов.

Таблица 2

Сравнение различных методов контроля качества

Подход	Точность (%)	Скорость (дет/мин)	Первоначальные затраты ($/линия)
Ручной	70–80	1–5	Низкие
Аппаратный	90–95	5–10	От 50 тыс.
Компьютерное зрение с ИИ	95–99	100+	От 100-200 тыс.

В ближайшее время можно ожидать рост спроса на технологию CV AI на большинстве крупных предприятиях. Дальнейшей ступенью развития данной технологии будет переход от отдельных систем, интегрированных на отдельные участки предприятия, которые друг с другом никак не взаимодействуют, к целой цепочке соединённых систем. Эта система будет позволять не только производить контроль качества, а участвовать на всех этапах производства.

Новые модели CV AI смогут не только выявлять брак, а отследить на каком этапе производства это произошло и анализируя данные, настроить иные параметры обработки на станках, во избежание дальнейшего брака. Единая система позволяет вносить правки без больших задержек, что позволяет использовать технологию даже на быстрых конвейерах. Программу можно будет легче настроить на выпуск новых изделий, не начиная обучение искусственного интеллекта с нуля. При производстве деталей с сложной геометрией, можно

будет использовать динамические камеры для построения 3D моделей, сравнивая их с эталоном в реальном времени и не допускать даже малейших отклонений.

Так же, важной функцией, для автоматизации производства будет связка всего производства с аналитикой и управлением. В конечном итоге, система будет следить не только за производством деталей, а за всем предприятием. Прогнозировать недостаток материалов и не только заказывать новые, но и анализировать поставляемое сырьё. Следить за складом готовой продукции, вовремя отгружать готовое и вести учёт изготовленного и необходимого к производству количества изделий.

Для демонстрации практической эффективности CV AI в машиностроении и металлургии приведём реальные примеры внедрения, где предприятия официально отчитались о результатах:

POSCO (Южная Корея) – мировой лидер по производству стали. Vision AI на прокатных станах выявляет дефекты поверхности, экономия превысила 600 млн KRW в год за счёт сокращения тестов и простоев.

Рис. 2. Производственное пространство POSCO

Voestalpine (Австрия) – высококачественная сталь для машиностроения. AI-камеры контролируют листы на микротрещины, брак снизился более чем на 20%.

Jabil (США) – контрактное машиностроение. Azure AI Vision на сборке, точность 97%, время инспекции сократилось вдвое.

Siemens Amberg (Германия) – производство электронных плат и компонентов. CV AI работает вместе с 50 млн датчиков, проверяя платы на всех этапах. Доля годной продукции выросла до 98%, показатели брака упали на 60%.

Северсталь (Россия) – крупный производитель стали и проката для машиностроения. CV AI проверяет качество поверхности металла и швы сварных конструкций. Система находит мелкие дефекты, брак упал на 25%, а готовая продукция отгружается быстрее.

Эти примеры подтверждают, что CV AI уже сегодня даёт измеримый экономический эффект и масштабируется на различные типы производства.

Выводы.

Внедрение CV AI на машиностроительных предприятиях показывает, что эта технология уже сейчас способна заменить традиционные методы контроля качества не только по точности, но и по влиянию на весь производственный процесс. Сравнение с классическими неразрушающими методами и ручным визуальным осмотром демонстрирует, что основная ценность CV AI заключается не только в снижении доли пропущенного брака, но и в существенном сокращении простоев, переработок и нагрузки на персонал.

Показатели производств, отчитавшихся об эффективности внедрения технологии, показывают, что экономический эффект от внедрения CV AI носит системный характер, а не является разовым улучшением отдельного участка. Важно, что технология хорошо

масштабируется: на основе уже обученных моделей можно относительно быстро расширять зону контроля на новые изделия и операции.

Литература:

1. Попов В.Ю., Янюшкин А.С., Хлыстов А.Н. Дефекты в алмазах – основа адгезии при шлифовании // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2017. № 1 (74). С. 30–39.

2. Попов В.Ю., Янюшкин А.С., Хлыстов А.Н. Разрушение алмазных зерен при шлифовании // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2016. № 4 (73). С. 16–23.

3. Popov V.Yu., Arkhipov P.V., Rychkov D.A. Adhesive wear mechanism under combined electric diamond grinding / ICMTMTE 2017 MATEC Web of Conferences 129 (2017), 01002.

4. Янюшкин А.С., Попов В.Ю., Сурьев А.А., Янпольский В.В. Тензометрическая вставка для измерения малых сил при электроалмазном шлифовании: пат. 2210749. Рос. Федерация; заявл. 13.06.01; № заявки 2001116429, опубл. 20.08.2003.

5. Янюшкин А.С., Лосев А.Б., Якимов С.А., Попов В.Ю. Роль температуры при затачивании инструментов алмазными кругами на металлической связке // Металлургия и машиностроение: ежеквартальный специализированный информационный бюллетень. 2006. № 1. С. 49–53.

6. Разумников С.В., Мишин И.В. Искусственный интеллект и машинное обучение: тенденции развития и применение в различных областях // В сборнике: Инновационные технологии в машиностроении. Сборник трудов XV Международной научно-практической конференции. Томск, 2024. С. 74–76.

7. Ратькова А.Б., Матвеев М.В., Мхаили Э.В. Искусственный интеллект в экономике и промышленности // В книге: Инновации и информационные технологии в условиях цифровизации экономики. Сборник тезисов III международной научно-практической конференции. Алчевск, 2025. С. 325–327.

8. Потехина А.С. Искусственный интеллект в образовании // Технологии образования. 2026. № 1 (35). С. 46–48.

9. Галачиева С.В., Хетагурова И.Ю., Хетагурова Т.Г. Процессы цифровой трансформации в транспортном комплексе // В сборнике: Современные тенденции развития информационных технологий в научных исследованиях и прикладных областях. Сборник докладов III Международной научно-практической конференции. Владикавказ, 2022. С. 158–163.

10. Протасеня С.И., Аллаева Г.Ж. Перспективы цифрового развития сектора материального производства // В сборнике: Проблемы современной экономики: глобальный, национальный и региональный контекст. Сборник научных статей. Гродно, 2025. С. 130–140.

Using computer vision technology with artificial intelligence in mechatronics and robotics production

Mokhnachev V.A.[1,a], Popov V.Y. [1,b], Rychkov D.A.[1,c]
[1]Bratsk State University, 40 Makarenko st., Bratsk, 665709, Russian Federation
[a]vadim.mohnachev@gmail.com, [b]slapopov@gmail.com, [c] dielektrik84@mail.ru

Keywords: CV AI, computer vision, quality control, mechanical engineering, surface defects, payback, POSCO, skipping defects, conveyor downtime.

This article analyzes the implementation of computer vision systems with artificial intelligence (CV AI) in mechanical engineering production as an alternative to traditional quality control methods. It examines the shortcomings of manual visual inspection (missing 20-30% of defects, subjectivity) and the limitations of non-destructive technologies (ultrasound, magnetic particle inspection), which require line stops and surface preparation.

CV AI provides defect detection accuracy of 95-99.8%, high-speed processing on a conveyor, and integration with MES systems for process management. The article describes the architectures, evaluation metrics, and implementation stages. Case studies are provided from

POSCO (savings of 600 million KRW/year), Siemens Amberg (99% availability), BMW, and Severstal, with ROI up to 1900% and a payback period of 6-12 months.

The technology increases equipment efficiency by 10–20%, reduces defects by 20–60%, and creates a unified digital quality management system for production.

УДК 004.8, 658.512

Применение технологий искусственного интеллекта для автоматизации подготовки технологической документации на предприятиях мехатроники и робототехники

Лобанов П.О.[1,a], Попов В.Ю.[1,b], Рычков Д.А.[1,c]
[1] Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, 665709, Россия
[a] lobapasha@gmail.com, [b] slapopov@gmail.com, [c] dielektrik84@mail.ru

Ключевые слова: искусственный интеллект, автоматизация машиностроения, технологические карты, промпт-инжиниринг, цифровизация производства.

В статье рассматривается актуальная проблема автоматизации подготовки технологической документации в машиностроении с использованием современных систем искусственного интеллекта (ИИ). Показано, что большие языковые модели (LLM) могут стать эффективным инструментом для ускорения разработки маршрутных и операционных карт, инструкций и других текстовых материалов. Основное внимание уделяется методологии взаимодействия с ИИ-системами, в частности, критически анализируются подходы к проектированию запросов (промптов). Предложен рациональный подход, фокусирующийся на задаче и специализации, а не на образе роли, что позволяет минимизировать генерацию избыточного и нерелевантного контента. На примере создания маршрутной карты обработки вала продемонстрирована эффективность предложенного подхода. В работе также рассмотрены практические кейсы внедрения ИИ на предприятиях (BMW, Toyota, Росатом), проведен анализ доступных инструментов и сформулированы основные риски и стратегии их минимизации при интеграции ИИ в производственные процессы. Сделан вывод о том, что наиболее перспективной является гибридная модель «человек – ИИ», где алгоритмы выполняют рутинные операции, а инженер осуществляет экспертный контроль и валидацию результатов.

Введение.

Современные технологические процессы, например, в области алмазного шлифования, характеризуются высокой сложностью физико-химических взаимодействий. В работах, этому посвящённых [1–5], детально рассмотрены такие явления, как дефекты в алмазах, влияющие на адгезию при шлифовании [1], механизмы разрушения алмазных зерен [2], а также адгезионно-диффузионное взаимодействие контактных поверхностей [3] и адгезионный износ при комбинированном электроалмазном шлифовании [4]. Патент РФ № 144708 на абразивный круг для электрохимического шлифования с косым расположением токопроводящих вставок [5] подтверждает необходимость точного соблюдения конструктивных и технологических параметров. Подготовка качественной технологической документации для таких процессов требует учета множества взаимосвязанных факторов (режимы обработки, свойства инструмента, характеристики дефектности зерен), что делает ручное составление документации трудоемким и подверженным ошибкам.

Именно здесь открываются широкие возможности для применения технологий искусственного интеллекта (ИИ). Как отмечается в работе [6] ИИ и машинное обучение

активно проникают в различные области машиностроения, позволяя автоматизировать обработку больших массивов данных. Похожие тенденции цифровой трансформации описываются для транспортного комплекса [7], материального производства [8] и образования [9]. Автоматизация подготовки технологической документации на основе ИИ может включать извлечение параметров из научных статей и патентов, формирование типовых операционных карт с учетом выявленных закономерностей (например, влияния дефектов алмазов на адгезию), а также адаптацию документации под конкретное оборудование. Это не только снижает временные затраты и минимизирует человеческий фактор, но и повышает точность и непротиворечивость инструкций, что особенно важно для сложных и наукоемких процессов, таких как электрохимическое алмазное шлифование. Внедрение ИИ в документооборот технологических служб, по аналогии с применением в экономике и промышленности [10], становится ключевым фактором повышения эффективности и качества подготовки производства.

Параллельно с этим наблюдается стремительное развитие технологий искусственного интеллекта, в частности, больших языковых моделей (LLM). По данным отраслевой статистики, объем мирового рынка ИИ в 2024 году достиг приблизительно 184 млрд долларов, а к 2030 году прогнозируется его рост до 826 млрд. Это свидетельствует о высоком потенциале внедрения ИИ в различные сферы промышленности.

Целью данной работы является анализ возможностей и разработка методики применения больших языковых моделей для автоматизации создания технологической документации в машиностроении. В задачи исследования входит: критический анализ существующих подходов к взаимодействию с ИИ, разработка эффективной структуры запроса для инженерных задач, обзор инструментов и анализ рисков внедрения.

Методология применения больших языковых моделей для генерации. технологических текстов. Основным фактором успешного взаимодействия с LLM является качество формулировки задачи – так называемый промпт-инжиниринг. Анализ современной практики показывает, что распространенный подход с присвоением модели детализированной роли («Ты опытный инженер-конструктор с 15-летним стажем») часто оказывается неэффективным. Вместо фокусировки на решении конкретной задачи модель начинает генерировать текст, соответствующий образу роли, наполняя его субъективными и избыточными фразами («в моей практике», «с моим опытом»). Это рассеивает точность результата «шум» и снижает его практическую ценность.

Для решения инженерных задач, требующих точности и соответствия стандартам, более рациональным представляется подход, ориентированный на формализацию задачи. Рекомендуемая структура промпта для генерации технологической документации включает следующие блоки:

1. *Специализация:* краткое указание области знаний (например, «Специалист по технологии машиностроения»).
2. *Формулировка задачи:* четкое описание того, что нужно сделать (например, «Разработать маршрутную карту обработки детали»).
3. *Контекстные сведения:* вся необходимая информация о детали (материал, размеры, требования к точности), оборудовании и нормативной базе.
4. *Параметры выходного материала:* требования к формату, структуре, терминологии и стандартам оформления (ГОСТ).
5. *Граничные условия:* ограничения и требования к достоверности данных (например, «Использовать только реальные режимы резания из справочников»).

Применение такого структурированного подхода позволяет минимизировать вероятность генерации моделью ложной информации («галлюцинаций») и получить готовый к экспертной проверке черновик документа.

Результаты и обсуждение.

Эффективность предложенной методики была проверена при решении типовой технологической задачи: создание маршрутной карты обработки вала. Входные данные: материал – Сталь 45 (ГОСТ 1050-2013), заготовка – поковка Ø45 мм, конечные размеры – Ø40 мм, шероховатость рабочей поверхности Ra 1,6 мкм, оборудование – токарные и шлифовальные станки. На основе структурированного промпта (табл. 1) была получена маршрутная карта, фрагмент которой представлен в табл. 2.

Полученный результат требует обязательной экспертной проверки и корректировки. И всё равно, время на подготовку первичного варианта документа сокращается в 5–10 раз по сравнению с традиционным подходом.

Таблица 1

Пример структурированного промпта для генерации маршрутной карты

Блок промпта	Содержание
Специализация	Специалист по технологии машиностроения
Формулировка задачи	Создай маршрутную карту механической обработки вала
Контекст	Материал: Сталь 45. Заготовка: поковка Ø45 мм. Готовая деталь: вал Ø40 мм, L = 140 мм, Ra 1,6. Оборудование: токарные, шлифовальные станки. Припуски по ГОСТ 7505.
Параметры вывода	Формат: таблица. Столбцы: № операции, Наименование и содержание операции, Оборудование, Инструмент, Режимы резания (t, S, V). Соответствие ЕСТД.
Граничные условия	Режимы резания должны соответствовать справочным данным для стали 45. Не включать вымышленные параметры.

Анализ международного опыта подтверждает высокую эффективность внедрения ИИ. Например, компания Toyota разработала внутреннюю ИИ-платформу, позволившую создать 10000 моделей для анализа дефектов и прогнозирования поломок, что обеспечило экономию более 10000 человеко-часов в год [11]. В российской практике система «Атом Майнд» госкорпорации «Росатом» анализирует более 2 млн технологических параметров, что привело к снижению расходов на обслуживание оборудования на 30% и уменьшению доли брака с 2,3% до 0,9% [12]. Эти примеры демонстрируют потенциал ИИ не только для анализа данных, но и для генерации отчетной документации.

Таблица 2

Фрагмент маршрутной карты обработки вала, сгенерированной с помощью ИИ

№ оп.	Наименование и содержание операции	Оборудование	Инструмент	Режимы резания
010	Токарная черновая. Подрезать торец, точить поверхность с Ø45 до Ø41 мм начерно.	Токарно-винторезный станок 16К20	Резец проходной упорный Т15К6	t = 2 мм, S = 0,3 мм/об, V = 120 м/мин
020	Токарная чистовая. Точить поверхность с Ø41 до Ø40 мм начисто.	Токарно-винторезный станок 16К20	Резец проходной чистовой Т30К4	t = 0,5 мм, S = 0,1 мм/об, V = 150 м/мин
030	Шлифовальная. Шлифовать поверхность Ø40 мм окончательно.	Круглошлифовальный станок 3М151	Круг шлифовальный 24А40ПСМ2 25К5	t = 0,01 мм, Vкр = 30 м/с

Однако, наряду с преимуществами, существуют и серьезные риски. Некоторыми из них являются:

- *технические риски:* «галлюцинации» моделей, генерация несоответствующих стандартам параметров;

- *юридические риски:* нарушение авторских прав при использовании платных баз данных, ответственность за документацию, созданную ИИ;
- *операционные риски:* зависимость от внешних сервисов и угроза утечки конфиденциальных данных.

Для минимизации этих рисков необходим комплексный подход, включающий многоуровневую валидацию результатов, использование локальных моделей для работы с чувствительными данными и разработку корпоративных регламентов использования ИИ.

Выводы.

1. Применение больших языковых моделей является перспективным направлением автоматизации подготовки технологической документации в машиностроении, позволяя значительно сократить время на создание первичных версий документов.
2. Основным условием эффективности является переход от ролевого моделирования к структурированной постановке задачи (промпту), которая включает специализацию, четкую формулировку, контекст, параметры вывода и граничные условия.
3. Наиболее эффективной моделью внедрения является гибридный подход «человек – ИИ», при котором искусственный интеллект выступает в роли помощника, генерирующего черновики и выполняя рутинные операции, а инженер-технолог осуществляет экспертизу, валидацию и принятие окончательных решений.
4. Успешная интеграция ИИ в производственные процессы требует тщательного управления рисками, включая технические, юридические и операционные аспекты, а также разработку соответствующих нормативных и регламентирующих документов на уровне предприятия.

Литература:

1. Попов В.Ю., Янюшкин А.С., Хлыстов А.Н. Дефекты в алмазах – основа адгезии при шлифовании // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2017. № 1 (74). С. 30–39.
2. Попов В.Ю., Янюшкин А.С., Хлыстов А.Н. Разрушение алмазных зерен при шлифовании // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2016. № 4 (73). С. 16–23.
3. Popov V.Yu., Arkhipov P.V., Rychkov D.A. Adhesive wear mechanism under combined electric diamond grinding / ICMTMTE 2017 MATEC Web of Conferences 129 (2017), 01002.
4. Popov V.Y., Yanyushkin A.S. Adhesion-diffusion interaction of contact surfaces with the treatment diamond grinding wheels // Eastern European Scientific Journal. 2014. № 2. С. 301–310.
5. Патент РФ № 144708. Абразивный круг для электрохимического шлифования с косым расположением токопроводящих вставок/Янюшкин А.С., Рычков Д.А., Лобанов Д.В., Попов В.Ю., Сурьев А.А., Архипов П.В., Кузнецов А.М., Медведева О.И./ Опубл. 27.08.2014. Бюл. № . (Заявка № 2014105641/02 от 14.02.2014.). Бюл. 24.
6. Разумников С.В., Мишин И.В. Искусственный интеллект и машинное обучение: тенденции развития и применение в различных областях // В сборнике: Инновационные технологии в машиностроении. Сборник трудов XV Международной научно-практической конференции. Томск, 2024. С. 74–76.
7. Галачиева С.В., Хетагурова И.Ю., Хетагурова Т.Г. Процессы цифровой трансформации в транспортном комплексе // В сборнике: Современные тенденции развития информационных технологий в научных исследованиях и прикладных областях. Сборник докладов III Международной научно-практической конференции. Владикавказ, 2022. С. 158–163.
8. Протасеня С.И., Аллаева Г.Ж. Перспективы цифрового развития сектора материального производства // В сборнике: Проблемы современной экономики: глобальный, национальный и региональный контекст. Сборник научных статей. Гродно, 2025. С. 130–140.
9. Потехина А.С. Искусственный интеллект в образовании // Технологии образования. 2026. № 1 (35). С. 46–48.
10. Ратькова А.Б., Матвеев М.В., Мхаили Э.В. Искусственный интеллект в экономике и промышленности // В книге: Инновации и информационные технологии в условиях цифровизации

экономики. Сборник тезисов III международной научно-практической конференции. Алчевск, 2025. С. 325–327.

11. Toyota разрабатывает ИИ-инструмент для проектирования будущих автомобилей. [Электронный ресурс] // Официальный новостной портал Toyota. 2024. URL: https://global.toyota/en/newsroom/corporate/ (дата обращения: 10.03.2026).

12. Цифровая трансформация Росатома: итоги и перспективы. [Электронный ресурс] // Официальный сайт госкорпорации «Росатом». 2025. URL: https://www.rosatom.ru/journalist/news/ (дата обращения: 10.03.2026).

Application of artificial intelligence technologies to automate the preparation of technological documentation at mechatronics and robotics enterprises

Lobanov P.O.[1,a], Popov V.Y. [1,b], Rychkov D.A.[1,c]
[1]Bratsk State University, 40 Makarenko st., Bratsk, 665709, Russian Federation
[a]lobapasha@gmail.com, [b]slapopov@gmail.com, [c]dielektrik84@mail.ru

Keywords: artificial intelligence, automation of mechanical engineering, process flow charts, industrial engineering, digitalization of production.

The article addresses the pressing issue of automating the preparation of technological documentation in mechanical engineering using modern artificial intelligence (AI) systems. It is shown that large language models (LLMs) can become an effective tool for accelerating the development of route and operation sheets, instructions, and other textual materials. The focus is on the methodology of interaction with AI systems, in particular, approaches to prompt design are critically analyzed. A rational approach is proposed, focusing on the task and specialization rather than the role image, which minimizes the generation of redundant and irrelevant content. The effectiveness of the proposed approach is demonstrated using the example of creating a route sheet for shaft machining. The paper also examines practical cases of AI implementation in enterprises (BMW, Toyota, Rosatom), analyzes available tools, and formulates the main risks and strategies for their minimization when integrating AI into production processes. It is concluded that the most promising is a hybrid "human-AI" model, where algorithms perform routine operations, and the engineer carries out expert control and validation of the results.

УДК 004.85:621.7

Применение методов машинного обучения в задачах резания материалов на производствах мехатроники и робототехники

Казаков Е.Г.[1,a], Попов В.Ю.[1,b]
[1]Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, 665709, Россия
[a]kazakovegor442@gmail.com, [b]slapopov@gmail.com

Ключевые слова: искусственный интеллект, резание материалов, автоматизация машиностроения, цифровизация производства, контроль качества.

В работе выполнен аналитический обзор современных подходов к применению методов машинного обучения в задачах обработки материалов в машиностроении. Рассмотрены основные направления использования интеллектуальных алгоритмов: прогнозирование и мониторинг износа режущего инструмента, предиктивное техническое обслуживание оборудования, контроль качества поверхности и оптимизация

технологических параметров. Проведён сравнительный анализ применяемых методов – от классических алгоритмов машинного обучения до современных архитектур глубокого обучения. По результатам обзора определены тенденции, актуальные на сегодняшний день, а также перспективные направления дальнейших исследований, связанные с интеграцией нейросетевых моделей и цифровых технологий в технологические процессы машиностроения.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются разработка методов работы в условиях малых выборок, создание интерпретируемых моделей, применимых в промышленной практике, а также глубокая интеграция алгоритмов машинного обучения с цифровыми двойниками машиностроительных процессов.

Введение.

Современное машиностроительное производство характеризуется возрастающим объёмом данных, генерируемых технологическим оборудованием, системами контроля качества и диагностическими комплексами. В условиях перехода к концепции «Индустрия 4.0» актуальной задачей становится разработка интеллектуальных систем, позволяющих анализировать производственные данные и принимать обоснованные управленческие решения в реальном времени [1, 2].

Наши предыдущие исследования [3–7] содержат богатый эмпирический материал: зависимости между структурными характеристиками инструмента, режимами обработки, физико-химическими параметрами контакта и выходными показателями (износ, качество поверхности). Именно такие многомерные, нелинейные и трудно формализуемые взаимосвязи являются идеальной средой для применения методов машинного обучения в задачах резания материалов.

Методология исследований.

Современный подход к моделированию процессов резания требует перехода от упрощенных аналитических зависимостей к моделям, способным учитывать гетерогенность структуры инструмента [3], стохастический характер разрушения зерен [4] и адгезионные явления [5, 6]. Данные, полученные в приведенных работах, могут быть использованы для создания обучающих выборок: например, параметры дефектности алмазов – как входные признаки, а интенсивность адгезионного износа – как целевая переменная. Методы машинного обучения (нейронные сети, градиентный бустинг, гауссовские процессы) позволяют по таким данным строить прогнозные модели стойкости инструмента, оптимизировать комбинированные схемы обработки (электроалмазное шлифование) и выявлять скрытые закономерности между энергией адгезии и условиями контакта [7]. Таким образом, интеграция экспериментальных данных из представленных источников с алгоритмами машинного обучения открывает возможность создания интеллектуальных систем поддержки принятия решений при назначении режимов резания, что является актуальной и востребованной задачей современного машиностроения.

Традиционные методы контроля и оптимизации технологических процессов обработки материалов, основанные на детерминированных физических моделях, не всегда способны учесть сложность и нелинейность взаимодействий при резании, обработке давлением и других видах воздействия на материал [8]. В связи с этим в последнее десятилетие активно развиваются подходы, основанные на методах машинного обучения, которые позволяют строить прогностические и управляющие модели непосредственно на основе экспериментальных данных [4, 10].

Цель настоящей работы – систематизировать и проанализировать основные направления применения методов машинного обучения в задачах обработки материалов в машиностроении, выделить наиболее распространённые подходы и определить перспективы их дальнейшего развития.

Результаты и обсуждение.

Одним из наиболее активно развивающихся направлений является использование методов машинного обучения для мониторинга и прогнозирования износа режущего инструмента в процессах механической обработки. Точное определение момента замены инструмента позволяет снизить производственные издержки, повысить качество обрабатываемых поверхностей и избежать аварийных отказов [11, 12].

В работах данного направления, как правило, в качестве входных данных используются сигналы датчиков сил резания, вибрации и акустической эмиссии, регистрируемые в процессе обработки [12]. Для построения прогностических моделей применяются различные алгоритмы: метод опорных векторов (SVM), случайные леса, рекуррентные нейронные сети (LSTM), сверточные нейронные сети (CNN) и их комбинации [12, 13]. В частности, модель на основе архитектуры ConvNeXt показала точность классификации состояния износа на уровне 99,1%, будучи обученной на данных всего четырёх инструментов, отработавших до полного износа [12]. Применение свёрточных нейронных сетей позволяет обнаруживать паттерны в сигналах датчиков, которые трудно выявить классическими аналитическими методами [11, 13].

Таблица 1

Пример структурированного промпта для генерации маршрутной карты

Метод МО	Входные данные	Задача	Точность/Результат
CNN	Силы резания, вибрация	Классификация износа	До 99,1%
LSTM	Временные ряды датчиков	Прогнозирование износа	Высокая точность на малых выборках
SVM	Признаковые векторы	Классификация состояния	Сравнимо с CNN
k-NN	Технологические данные	Кластеризация износа	Практичное базовое решение

Методы машинного обучения широко применяются для построения систем предиктивного технического обслуживания производственного оборудования [14, 15]. Такие системы позволяют прогнозировать вероятность отказов узлов и агрегатов на основе данных IoT-датчиков (вибрации, температуры, давления, тока), снижать незапланированные простои и оптимизировать графики ремонтного обслуживания [15, 16].

В системах предиктивной диагностики используются глубокие нейросетевые архитектуры для анализа временных рядов сенсорных данных, что обеспечивает раннее выявление дефектов и прогнозирование остаточного ресурса оборудования [14]. Реализованные промышленные решения демонстрируют экономический эффект в виде значительного снижения затрат на ремонт при одновременном повышении надёжности оборудования [2, 16]. Характерная архитектура таких систем включает сбор данных с IoT-датчиков, передачу по промышленным протоколам, обработку алгоритмами машинного обучения (в том числе LSTM-моделями) и визуализацию результатов через SCADA и BI-системы [15].

Ещё одним перспективным направлением является автоматический контроль качества изделий и оптимизация параметров технологических процессов с применением методов машинного обучения [1, 17]. В задачах контроля качества поверхности детали, прогнозирования шероховатости и геометрических параметров обрабатываемых поверхностей нейросетевые модели позволяют учитывать совокупность технологических факторов – скорости резания, подачи, глубины резания, характеристик инструмента и материала заготовки [17].

Применение алгоритмов машинного обучения для оптимизации режимов резания направлено на одновременное достижение нескольких целей: повышение производительности, снижение износа инструмента и обеспечение требуемого качества поверхности [1, 17]. В области аддитивного производства (3D-печать металлами) методы машинного обучения позволяют устанавливать зависимости «параметры процесс-структура-

свойства» и применять байесовскую оптимизацию для эффективного перебора многомерных пространств параметров [9, 10].

Анализ рассмотренных работ показывает, что методы машинного обучения обеспечивают более высокую точность прогнозирования по сравнению с классическими статистическими подходами в задачах с нелинейными зависимостями и большим числом входных параметров. В частности, для задачи прогнозирования износа инструмента при фрезеровании точность классификации сверточных нейронных сетей достигает 95–99%, тогда как регрессионные модели обеспечивают точность на уровне 80–85% [12, 13]. Это подтверждает целесообразность перехода к нейросетевым архитектурам в условиях роста объёмов производственных данных.

В области предиктивного обслуживания применение глубоких нейронных сетей для анализа вибродиагностических данных позволяет выявлять зарождающиеся дефекты подшипниковых узлов существенно раньше, чем при использовании традиционного частотного анализа [14, 15]. За счёт этого повышается надёжность оборудования и сокращаются незапланированные простои, что напрямую отражается на экономической эффективности эксплуатации основных фондов [2, 16]. При оптимизации параметров резания методы машинного обучения демонстрируют способность находить компромисс между производительностью, качеством поверхности и стойкостью инструмента [1, 17].

Существенным преимуществом глубоких архитектур (CNN, LSTM) является возможность автоматического извлечения информативных признаков из «сырых» сенсорных данных без ручного построения признакового пространства [10, 12]. Одновременно сохраняется проблема ограниченных и несбалансированных обучающих выборок в промышленных условиях, что требует применения методов трансферного обучения и адаптации [12, 18]. Перспективной тенденцией является интеграция алгоритмов машинного обучения с цифровыми двойниками оборудования и технологических процессов, что обеспечивает более полное использование накопленных данных и поддержку принятия решений в реальном времени [2, 14].

Выводы.

Проведённый обзор показывает, что методы машинного обучения занимают всё более значимое место в задачах обработки материалов в машиностроении. Наибольшее распространение получили нейросетевые модели для прогнозирования износа инструмента [11–13], систем предиктивного технического обслуживания [14–16] и контроля качества поверхности [17]. Существующие результаты демонстрируют высокую эффективность интеллектуальных подходов в сравнении с классическими аналитическими методами.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются разработка методов работы в условиях малых выборок [12, 18], создание интерпретируемых моделей, применимых в промышленной практике, а также глубокая интеграция алгоритмов машинного обучения с цифровыми двойниками машиностроительных процессов [2, 14].

Литература:

1. Попов В.Ю., Янюшкин А.С., Хлыстов А.Н. Дефекты в алмазах – основа адгезии при шлифовании // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2017. № 1 (74). С. 30–39.

2. Попов В.Ю., Янюшкин А.С., Хлыстов А.Н. Разрушение алмазных зерен при шлифовании // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2016. № 4 (73). С. 16–23.

3. Popov V.Yu., Arkhipov P.V., Rychkov D.A. Adhesive wear mechanism under combined electric diamond grinding / ICMTMTE 2017 MATEC Web of Conferences 129 (2017), 01002.

4. Медведева О.И., Янюшкин А.С., Попов В.Ю. Расчет энергии адгезии контактных поверхностей при шлифовании инструментальных материалов различными методами // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2014. № 5 (35). С. 14–19.

5. Попов В.Ю., Янюшкин А.С., Сурьев А.А. Качество инструмента из инструментальных сталей после обработки методом двойного травления // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2003. Т. 2. С. 206–212.

6. Danish, M. Machine learning models for prediction and classification of tool wear in sustainable milling of additively manufactured 316 stainless steel / M. Danish, R. Kurniawan, H. M. Ali [et al.] // Results in Engineering. – 2024. – Vol. 22. – Article 102015.

7. Нейросети в промышленности: сайт. – URL: https://upperator.ru/industry (дата обращения: 24.03.2026). – Текст: электронный.

8. Безъязычный, В. Ф. Основы технологии машиностроения: учебник / В. Ф. Безъязычный. – 3-е изд., испр. – Москва: Машиностроение, 2020. – 568 с.

9. Ng, W. L. Progress and opportunities for machine learning in materials and processes of additive manufacturing / W. L. Ng, G. L. Goh, G. D. Goh [et al.] // Advanced Materials. – 2024. – Vol. 36, no. 34. – e2310006.

10. Recent advances in material, manufacturing, and machine learning: proceedings of 2nd International Conference RAMMML-23 / ed. by R. Gupta, R. Mote, A. Sharma, J. P. Giri, R. B. Chadge. – Boca Raton: CRC Press, 2024. – 975 p.

11. Kamata, P. V. Tool wear prediction in milling – a comparative analysis using k-NN and deep learning / P. V. Kamata, S. Singh, P. Dixit // Preprint at Semantic Scholar. – 2023. – 8 p. – URL: https://www.semanticscholar.org (дата обращения: 24.03.2026). – Текст: электронный.

12. Data-driven tool wear prediction in milling, based on a process-integrated single-sensor approach // arXiv: preprint. – 2024. – arXiv:2412.19950. – URL: https://arxiv.org/abs/2412.19950 (дата обращения: 24.03.2026). – Текст: электронный.

13. Javanjal, V. K. Tool wear prediction system using machine learning approach / V. K. Javanjal, K. R. Kotecha // NeuroQuantology. – 2022. – Vol. 20, no. 10. – P. 12922–12928.

14. Насуров, Х. Ш. Нейросети в системах предиктивной диагностики и обслуживания промышленного оборудования / Х. Ш. Насуров, А.-М. С. Дукузов // Экономика и управление: проблемы, решения. – 2025. – Т. 17, № 12. – С. 179–188.

15. Разработка системы предиктивного технического обслуживания промышленного оборудования / А. А. Авторов [и др.] // Вестник Шакаримского университета. Серия: Технические науки. – 2025. – № 2 (18). – С. 14–22.

16. Тарасенко, В. В. Модель повышения операционной эффективности промышленного предприятия на основе предиктивного обслуживания / В. В. Тарасенко // Cifra. Экономика. – 2025. – № 2 (9).

17. Tool wear prediction in milling process using physics-informed machine learning and thermo-mechanical force model with monitoring applications // Journal of Manufacturing Systems. – 2025.

18. Rapid development of metal additive manufacturing using artificial intelligence/machine learning and high-throughput material testing // Annual Review of Materials Research. – 2025. – Vol. 55.

Application of machine learning methods to materials cutting tasks in mechatronics and robotics industries

Kazakov E.G.[1,a], Popov V.Y. [1,b]
[1]Bratsk State University, 40 Makarenko st., Bratsk, 665709, Russian Federation
[a]kazakovegor442@gmail.com, [b]slapopov@gmail.com

Keywords: artificial intelligence, materials cutting, automation of mechanical engineering, digitalization of production, quality control.

This paper provides an analytical review of modern approaches to the application of machine learning methods to materials processing tasks in mechanical engineering. The main areas of application of intelligent algorithms are discussed: predicting and monitoring cutting tool wear, predictive equipment maintenance, surface quality control, and optimization of process parameters. A comparative analysis of the methods used is provided, ranging from classical machine learning algorithms to modern deep learning architectures. The review identifies current trends and

promising areas for further research related to the integration of neural network models and digital technologies into mechanical engineering processes.

Promising areas for further research include the development of methods for working with small samples, the creation of interpretable models applicable in industrial practice, and the deep integration of machine learning algorithms with digital twins of mechanical engineering processes.

УДК 004.8

Применение технологий искусственного интеллекта в расчетах на прочность конструкций на предприятиях мехатроники и робототехники

Бацкалёв Э.В.[1,a], Попов В.Ю.[1,b], Рычков Д.А.[1,c]
[1]Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, 665709, Россия
[a]batskalev-72@mail.ru, [b]slapopov@gmail.com, [c]dielektrik84@mail.ru

Ключевые слова: искусственный интеллект, автоматизация машиностроения, расчёт на прочность, промпт-инжиниринг, цифровизация производства.

Статья рассматривает роль искусственного интеллекта в расчётах прочности конструкций. Интеграция технологий искусственного интеллекта, нейронных сетей и машинного обучения, открывает возможности быстрой обработки больших объемов данных. Проводится анализ традиционных подходов, среди которых выделяется метод конечных элементов (Finite Element Method, FEM), реализуемый в специализированных программах, таких как Siemens NX. Основное внимание уделяется преимуществам внедрения современных технологий искусственного интеллекта, включая использование нейронных сетей разных типов (Multilayer Perceptron, Convolutional Neural Network, Long Short-Term Memory).

Исследования показывают высокую точность вычислений, достигающую уровня около 98%, а также существенное ускорение процесса анализа прочности конструкции, вплоть до увеличения скорости расчетов в диапазоне от 200 до 500 раз. Это позволяет существенно сократить временные затраты на прототипирование и повысить эффективность инженерных расчётов.

Введение.

Искусственный интеллект радикально преобразует процессы расчета на прочность конструкций, существенно сокращая сроки анализа, увеличивая точность вычислений и улучшая качество проектирования. Интеграция технологий искусственного интеллекта, таких как FEM-методы, нейронные сети и машинное обучение, открывает возможности быстрой обработки больших объемов данных.

В наших ранних статьях [1–5] детально исследованы структурные дефекты алмазных зерен [1], механизмы их разрушения при шлифовании [2], а также адгезионное взаимодействие контактных поверхностей [3]. Особую ценность для прочностного моделирования представляют работы, в которых применяются современные вычислительные подходы: моделирование комбинированной электроалмазной обработки в среде Blender 3D [4] и молекулярно-динамическое моделирование ювенильных поверхностей [5]. Эти исследования дают возможность количественно описывать напряженно-деформированное состояние на микро- и наноуровне, учитывая реальную дефектную структуру материалов, однако традиционные методы расчета часто ограничены вычислительной сложностью и необходимостью упрощений.

Именно здесь открываются перспективы применения технологий искусственного интеллекта. Как отмечают [6], методы машинного обучения активно проникают в промышленные приложения, подчеркивается роль ИИ в цифровизации промышленности [7–9] и образовании [10]. В контексте расчетов на прочность данные из представленных работ могут быть использованы для формирования обучающих выборок: параметры дефектности алмазов, энергия адгезии, условия контакта и результаты молекулярно-динамического моделирования выступают в качестве входных признаков, а характеристики разрушения и предельные напряжения – в качестве целевых переменных. Нейросетевые модели и методы символической регрессии позволяют по таким данным строить быстрые суррогатные модели прочности, заменяющие трудоемкие конечно-элементные и атомистические расчеты. Дополнительно, подходы к 3D-моделированию могут быть интегрированы с генеративными нейросетями для автоматизированного создания геометрических моделей дефектных структур. Таким образом, синергия детальных экспериментальных и расчетных данных из приведенных источников с алгоритмами ИИ создает основу для создания интеллектуальных систем прогнозирования прочности и ресурса конструкций, что полностью соответствует трендам цифровой трансформации материального производства.

Методология применения больших языковых моделей в расчетах на прочность конструкций.

Нейронные сети способны оценивать прочностные характеристики металлов с высокой точностью (до 98%), основываясь лишь на двух параметрах, таких как температура стеклования. Этот подход ускоряет проверку устойчивости конструкции к нагрузкам сжатия и растяжения. Технология генеративного дизайна формирует оптимальную форму изделия исходя из критериев прочности, массы и себестоимости, обеспечивая экономию материала.

Оптимизационные алгоритмы создают виртуальных двойников объектов для точного моделирования воздействий различных типов нагрузок (ветровых, сейсмических, эксплуатационных), позволяя прогнозировать возможные деформации и потенциальные повреждения. Методы машинного обучения обрабатывают накопленные проектные данные, определяя критические узлы и рекомендуя надёжные решения соединений и геометрической конфигурации конструкции.

Алгоритмы прогнозирования повреждений, использующие методы регрессии и нейронные сети, определяют динамику развития дефектов (например, трещин) с точностью порядка 85–90%. Эти прогнозы помогают своевременно планировать профилактическое обслуживание и ремонт конструкций, оперативно реагируя на изменения внешних факторов эксплуатации объекта.

Особое значение приобретает проблема оценки прочности деталей в машиностроении. Ошибочные расчёты или недостаточность экспериментов приводят к сложностям на этапах разработки, производства и последующей эксплуатации продукции. Чтобы осмыслить роль искусственного интеллекта в расчете прочности конструкций, важно рассмотреть историю эволюции методик расчёта – от простых алгебраических формул и законов сопротивления материалов до современных подходов с использованием мощных программных комплексов и искусственных нейронных сетей. Следует учитывать, что самые передовые методики настоящего момента завтра могут устареть и потерять свою актуальность.

Традиционные методы расчета.

Расчет на прочность осуществляется традиционными способами, такими как метод конечных элементов (FEM). Конструкция представляется совокупностью мелких фрагментов («элементов»), каждый из которых подвергается отдельным расчетам напряжений и деформаций. Эта процедура включает следующие шаги: дискретизацию модели, формирование системы уравнений и последующий анализ полученных решений. Такие расчеты требуют значительного объема вычислительных мощностей и времени.

Современная практика инженерных расчётов активно применяет специализированные программы, подобные Siemens NX, включающие модули вроде NX Nastran, позволяющие

моделировать воздействие статических и динамических нагрузок согласно стандартам, таким как ГОСТ 14249-89.

На рисунках 1 и 2 показаны примеры процесса расчета конструкции методом конечных элементов, с использованием программы Siemens NX.

На рисунках 3 и 4 показаны примеры результата расчета конструкции методом конечных элементов, с использованием программы Siemens NX.

Искусственный интеллект ускоряет FEM, предсказывая результаты симуляций через нейронные сети, снижая время расчетов с часов до минут. Например, в RFEM 6 ИИ вроде GPT интегрируется для автоматизации проектирования и проверки конструкций. Нейросети обучаются на данных FEM, прогнозируя напряженно-деформированное состояние без их полного пересчета.

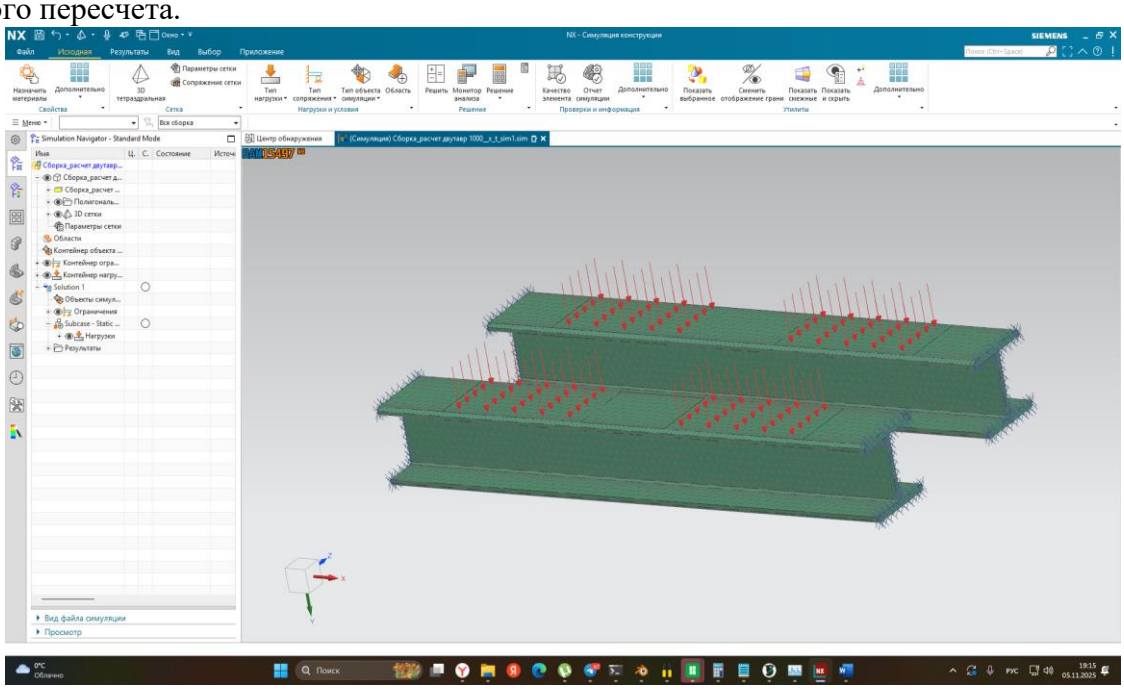


Рис. 1. Нанесение тетрагональной сетки и места приложения нагрузки на двутавровые балки в программе Siemens NX

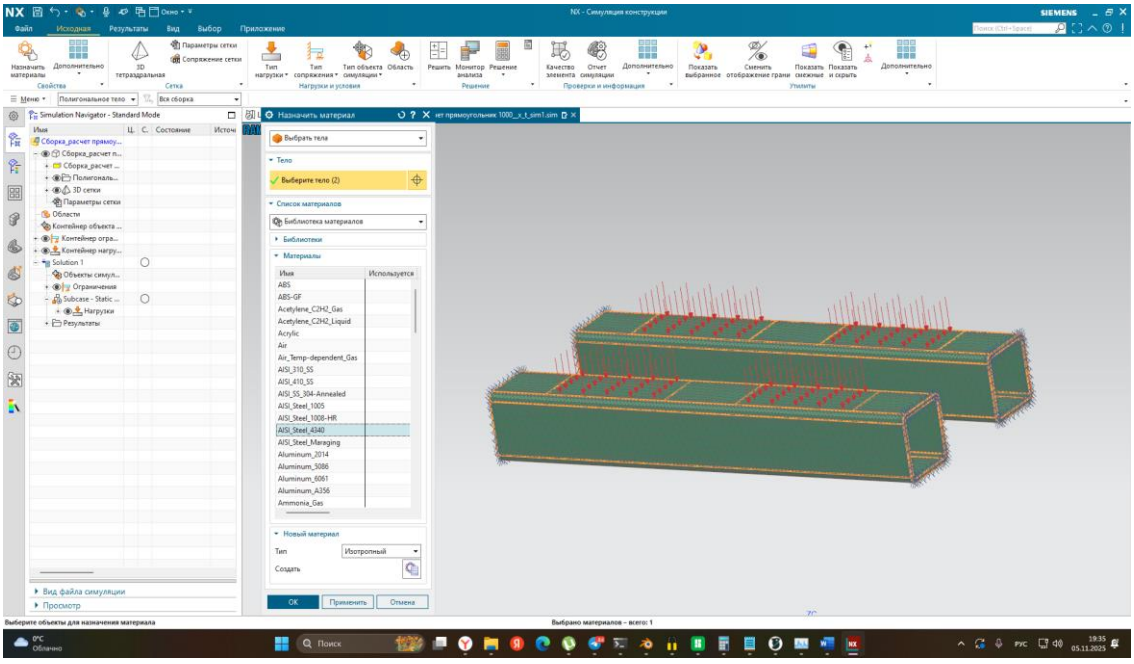


Рис. 2. Нанесение тетрагональной сетки и места приложения нагрузки на балки из профильной трубы в программе Siemens NX

Нейронные сети для прогнозирования прочности: нейронные сети, такие как многослойный персептрон (MLP), CNN или LSTM, предсказывают несущую способность конструкций с точностью до 98%. В анализе железобетонных элементов искусственный интеллект обрабатывает данные о бетоне, арматуре и нагрузках, выявляя деформации и повреждения. Для металлических сплавов модели на TensorFlow оценивают прочность по температуре стеклования и составу. Сравнение некоторых сетей приведены в таблице 1.

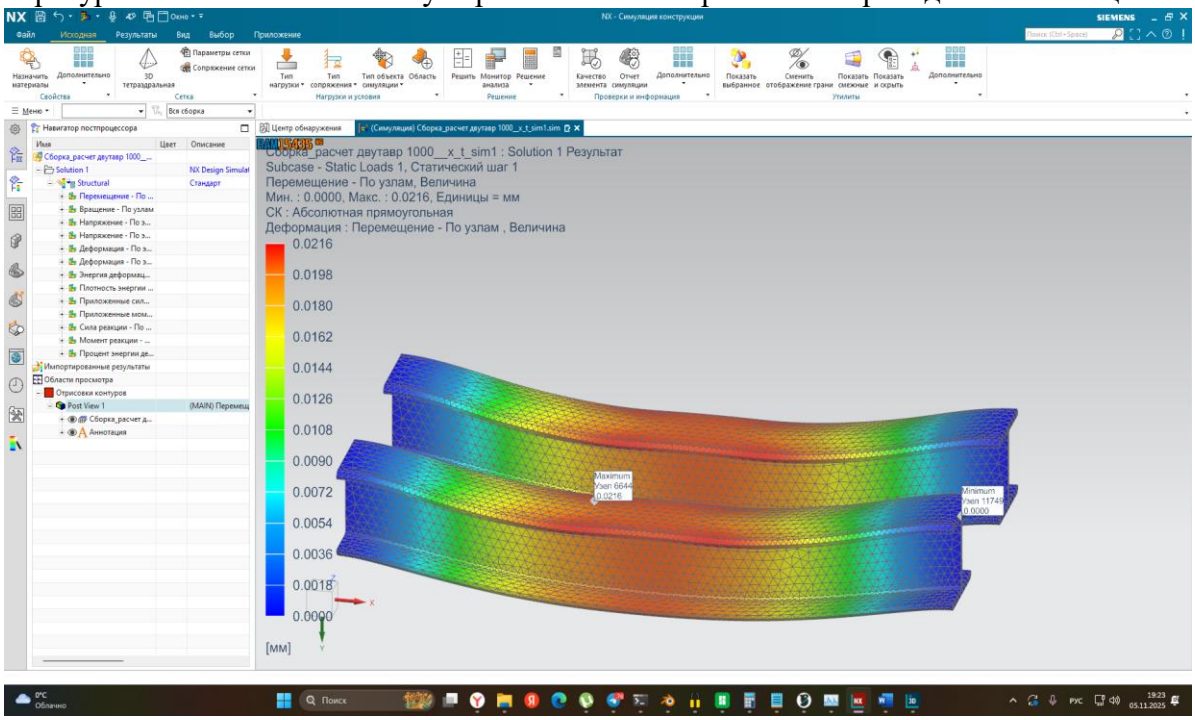


Рис. 3. Результат проверки на прочность (деформацию) двутавровой балки в программе Siemens NX

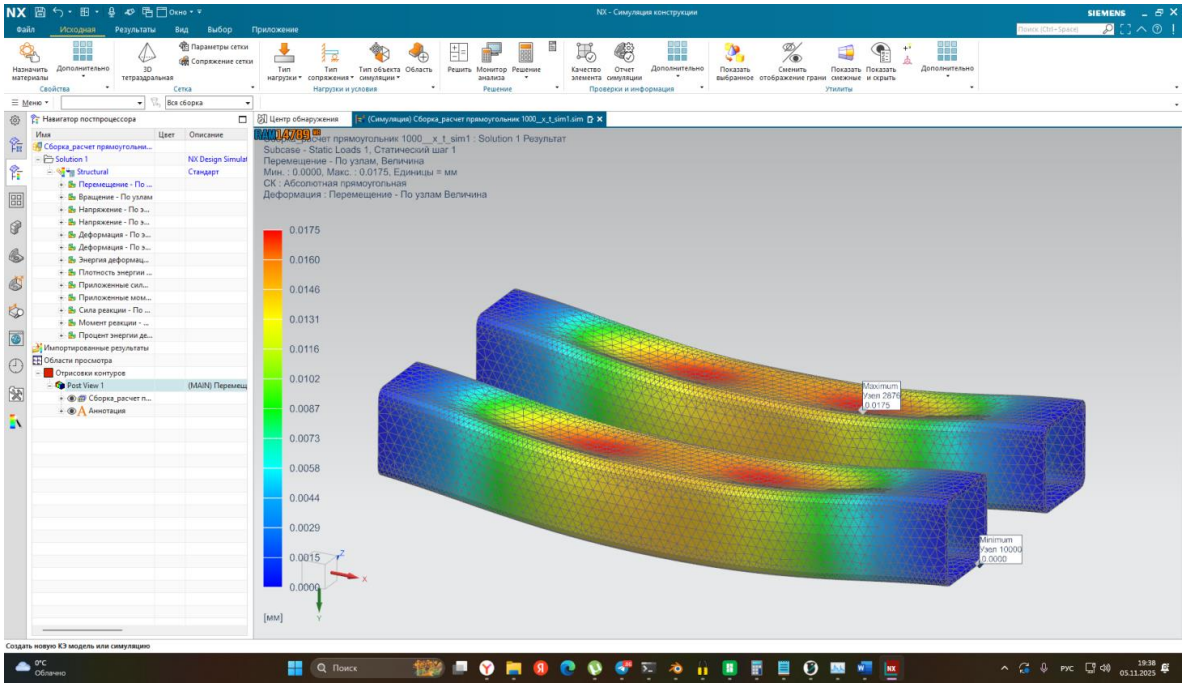


Рис. 4. Результат проверки на прочность (деформацию) балки из профильной трубы в программе Siemens NX

Диагностика и мониторинг повреждений: искусственный интеллект анализирует изображения и датчики для выявления трещин в конструкциях, используя компьютерное зрение. В монолитных каркасах нейросети прогнозируют прочность по реальным данным,

минимизируя человеческий фактор. Это особенно ценно для трубобетонных колонн и композитных усилений.

Таблица 1

Сравнение некоторых нейронных сетей

Тип сети	Применение	Точность/Преимущества
MLP (однослойный персептрон)	Несущая способность усиленных конструкций	До 98%, рационально для прогнозирования
CNN 3D	Анализ 3D-моделей оболочек	Обработка геометрии, ускорение в 1000 раз
RNN/LSTM	Динамические нагрузки, долговечность	Учет временных зависимостей

Оптимизация дизайна и материалов: искусственный интеллект оптимизирует топологию конструкций, предлагая формы с минимальным весом при заданной прочности. В Siemens NX и Autodesk Creo нейросети вроде OptiShellNeuro интегрируются для 3D-моделей, используя PyTorch или Keras. Для аморфных сплавов искусственный интеллект конструирует новые составы с повышенной прочностью.

Преимущества и вызовы внедрения: искусственный интеллект сокращает затраты на прототипы, ускоряет разработку и повышает безопасность за счет предиктивного анализа. Однако требуется большая база данных для обучения и интеграция с инженерным опытом – искусственный интеллект дополняет, но не заменяет специалистов. В России разработки КФУ и РНФ показывают точность 98% для конструкций.

Сравнение искусственного интеллекта и традиционных методов FEM: искусственный интеллект дополняет традиционные FEM-расчеты, обеспечивая ускорение в сотни раз при сопоставимой точности, но требует данных для обучения.

Преимущества искусственного интеллекта над FEM: искусственный интеллект предсказывает результаты без полной сетки элементов, сглаживая сингулярности и выявляя сложные закономерности (полином 3-го порядка vs 2-го в FEM). В проектах вроде FEMnet точность достигает 97% на больших данных, с обучением в 3 раза быстрее. Это идеально для реального времени, оптимизации и больших моделей. Разница основных параметров приведена в табл. 2.

Таблица 2

Сравнение основных параметров FEM с ИИ

Параметр	Традиционный FEM	ИИ-усиленный FEM
Время расчета	Минуты-часы (12–25 с на балку)	Секунды (0,04–0,06 с, ускорение 200–500х)
Точность	Высокая (3–5% ошибка от теории)	1–3% ошибка, до 98% на сплавах
Вычислительные ресурсы	Высокие (CPU/GPU для сетки)	Низкие после обучения
Гибкость	Полный перерасчет при изменениях	Мгновенный прогноз

Недостатки искусственного интеллекта по сравнению с FEM: традиционный FEM гарантирует физическую интерпретируемость и работает без данных обучения, точно моделируя любые сценарии. Искусственный интеллект зависит от качества датасета FEM, может «галлюцинировать» вне обученных случаев и требует начальных вычислений для тренинга. В APM FEM акцент на автоматической сетке и модификациях, без искусственного интеллекта – надежно для CAD.

Гибридные (комбинированные) подходы: гибрид ИИ+FEM сочетает точность FEM с скоростью ИИ: обучают на FEM-данных для быстрого прогнозирования деформаций (ошибка 1.67% на балке). В каркасах зданий ИИ обобщает опыт, снижая ошибки человека. Это будущее для цифровых двойников конструкций.

Обучение искусственного интеллекта для расчета прочности сплавов включает сбор данных о составе, обработке и механических свойствах, с последующей тренировкой нейронных сетей на предсказание характеристик вроде предела прочности и пластичности. Контекст предыдущих обсуждений (проекты КФУ, FEMnet) показывает, что такие модели достигают точности до 98% при правильной настройке.

Генеративное проектирование для конструкций использует алгоритмы искусственного интеллекта и оптимизацию для автоматической генерации множества вариантов форм и структур на основе заданных параметров, таких как нагрузки, материалы и ограничения. Этот подход минимизирует вес конструкций, сохраняя прочность, и часто имитирует природные структуры, как кристаллические решетки.

Основной процесс начинается с ввода начальной геометрии, нагрузок и ограничений в специализированное ПО, например, Autodesk или Creo. Программа проводит конечно-элементный анализ, удаляя «лишний» материал из зон низких напряжений и предлагая оптимизированные варианты топологии или структуры. Затем генерируются десятки альтернатив, из которых инженер выбирает подходящую для дальнейшей доработки, учитывая производство, такие как 3D-печать.

Выводы.

1. Искусственный интеллект значительно облегчает процесс проектирования благодаря автоматизации рутинных операций и оптимальному распределению ресурсов.

2. Использование технологий искусственного интеллекта позволяет снизить расходы на разработку проектов путем оптимизации процессов и повышения эффективности труда специалистов.

3. Применение искусственного интеллекта способствует повышению уровня безопасности за счёт своевременного выявления потенциальных рисков и предотвращения аварийных ситуаций.

4. Эффективность работы системы искусственного интеллекта зависит от качества предоставляемых ей данных – недостаточно точные или неполные данные снижают точность результатов.

5. Несмотря на очевидные преимущества, искусственный интеллект остаётся вспомогательным инструментом.

Литература:

1. Попов В.Ю., Янюшкин А.С., Хлыстов А.Н. Дефекты в алмазах – основа адгезии при шлифовании // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2017. № 1 (74). С. 30–39.

2. Попов В.Ю., Янюшкин А.С., Хлыстов А.Н. Разрушение алмазных зерен при шлифовании // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2016. № 4 (73). С. 16–23.

3. Popov V.Yu., Arkhipov P.V., Rychkov D.A. Adhesive wear mechanism under combined electric diamond grinding / ICMTMTE 2017 MATEC Web of Conferences 129 (2017), 01002.

4. Попов В.Ю., Ларева А.П., Хлыстов А.Н., Бондин А.В. Моделирование процесса комбинированной электроалмазной обработки в среде Blender 3D // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2015. Т. 1. С. 187–191.

5. Попов В.Ю., Хлыстов А.Н., Бондин А.В. Молекулярно-динамическое моделирование ювенильных поверхностей // Механики XXI веку. 2015. № 14. С. 103–107.

6. Разумников С.В., Мишин И.В. Искусственный интеллект и машинное обучение: тенденции развития и применение в различных областях // В сборнике: Инновационные технологии в машиностроении. Сборник трудов XV Международной научно-практической конференции. Томск, 2024. С. 74–76.

7. Галачиева С.В., Хетагурова И.Ю., Хетагурова Т.Г. Процессы цифровой трансформации в транспортном комплексе // В сборнике: Современные тенденции развития информационных технологий в научных исследованиях и прикладных областях. Сборник докладов III Международной научно-практической конференции. Владикавказ, 2022. С. 158–163.

8. Протасеня С.И., Аллаева Г.Ж. Перспективы цифрового развития сектора материального производства // В сборнике: Проблемы современной экономики: глобальный, национальный и региональный контекст. Сборник научных статей. Гродно, 2025. С. 130–140.

9. Ратькова А.Б., Матвеев М.В., Мхаили Э.В. Искусственный интеллект в экономике и промышленности // В книге: Инновации и информационные технологии в условиях цифровизации экономики. Сборник тезисов III международной научно-практической конференции. Алчевск, 2025. С. 325–327.

10. Потехина А.С. Искусственный интеллект в образовании // Технологии образования. 2026. № 1 (35). С. 46–48.

Application of artificial intelligence technologies in structural strength calculations at mechatronics and robotics enterprises

Batskalev E.V.[1,a], Popov V.Y. [1,b], Rychkov D.A.[1,c]
[1]Bratsk State University, Makarenko, 40, Bratsk, Russia
[a]batskalev-72@mail.ru, [b]slapopov@gmail.com, [c]dielektrik84@mail.ru

Keywords: artificial intelligence, automation of mechanical engineering, strength analysis, industrial engineering, digitalization of production.

This article examines the role of artificial intelligence in structural strength analysis. The integration of artificial intelligence, neural networks, and machine learning opens up opportunities for the rapid processing of large volumes of data. Traditional approaches are analyzed, including the finite element method (FEM), implemented in specialized programs such as Siemens NX. The focus is on the advantages of implementing modern artificial intelligence technologies, including the use of various types of neural networks (Multilayer Perceptron, Convolutional Neural Network, and Long Short-Term Memory).

Research demonstrates high calculation accuracy, reaching approximately 98%, as well as significant acceleration of the structural strength analysis process, with calculation speeds increasing by a factor of 200 to 500. This significantly reduces prototyping time and improves the efficiency of engineering calculations.

УДК 621.791.052

Увеличение межремонтного периода воздухоподогревателей котлов и новые методы ремонта

Степаняк М.Д.[1,a], Рычков Д.А.[1,b]
[1]Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, 665709, Россия
[a]matvey.stepa@yandex.ru, [b]dielektrik84@mail.ru

Ключевые слова: воздухоподогреватель, межремонтный период, ремонт, золовой износ, низкотемпературная коррозия, вставная труба, модернизация.

В статье рассмотрены основные причины повреждений трубчатых воздухоподогревателей (ВЗП) энергетических котлов, проанализированы результаты балансовых испытаний котла БКЗ-500-140 после ремонта, а также предложены современные методы ремонта и защиты поверхностей нагрева. Особое внимание уделено инновационной технологии восстановления труб с помощью вставок меньшего диаметра, позволяющей существенно увеличить межремонтный период и повысить надежность оборудования.

Введение.

Актуальность темы обусловлена тем, что воздухоподогреватели (ВЗП) являются одним из наиболее уязвимых элементов котельных агрегатов, работающих на твёрдом топливе. В условиях отечественной энергетики, характеризующейся использованием углей с высокой зольностью и сернистостью, поверхности нагрева ВЗП подвергаются интенсивному золовому износу и низкотемпературной сернистой коррозии. Преждевременный выход из строя трубных систем приводит к снижению КПД котла [1], росту затрат на ремонт и увеличивает риск аварийных остановов. В связи с этим вопросы увеличения межремонтного периода (МРП) и внедрения современных методов ремонта приобретают особую экономическую и техническую значимость.

Целью исследования является анализ причин повреждений ВЗП на примере котла БКЗ-500-140 и оценка эффективности традиционных и новых методов ремонта для увеличения их ресурса. Для достижения цели проводится анализ результатов балансовых испытаний до и после ремонта [2], рассматриваются факторы износа (коррозия, зола), а также изучается инновационная технология восстановления труб с помощью ремонтных вставок из коррозионностойких материалов. В заключительной части работы формулируются практические рекомендации по защите оборудования и оптимизации межремонтных интервалов.

Основные причины повреждений воздухоподогревателей.

Анализ эксплуатационных данных и опыта Ново-Иркутской ТЭЦ позволяет выделить следующие ключевые факторы:

1. Золовой износ: Летучая зола обладает абразивными свойствами. При движении дымовых газов частицы золы истирают входные участки труб (до 250 мм от трубной доски), что приводит к утонению стенок и сквозным повреждениям.
2. Низкотемпературная сернистая коррозия: При сжигании высокосернистых углей оксиды серы конденсируются на относительно холодных поверхностях труб (температура металла ниже 175 °С), образуя серную кислоту, разрушающую металл.
3. Засорение отложениями: Накопление сажи, золы и продуктов конденсации снижает эффективность теплообмена и способствует коррозии [4].
4. Механические повреждения: Возникают при дробеочистке (наклеп трубных досок, застревание дроби) и при обдувке топочных экранов (попадание фракций шлака в газоход).

Традиционные методы ремонта и их ограничения.

Классический ремонт ВЗП включает:

1. Заварку сквозных повреждений.
2. Глухую заглушку поврежденных труб (с выводом их из работы).
3. Частичную замену кубов или секций.

Недостатки:

1. Снижение общей площади теплообмена при заглушке труб.
2. Высокая трудоемкость и стоимость полной замены кубов.
3. Кратковременный эффект: новые повреждения возникают в тех же зонах из-за сохранения агрессивных факторов.

Новые методы ремонта и защиты ВЗП

Технология вставных ремонтных трубок

Одним из наиболее перспективных методов является технология компании Nordweg (Россия). Суть метода заключается в следующем:

1. В поврежденную трубу теплообменного аппарата вставляется тонкостенная труба меньшего диаметра.
2. Длина вставки соответствует глубине повреждения.

3. С одной стороны вставка развальцовывается в трубной доске, с другой — герметично заглушается.

4. Внутреннее пространство между стенками заполняется давлением воздуха, что обеспечивает плотное прилегание и восстановление целостности трубы.

Преимущества:

1. Восстановление без вывода из работы: Метод позволяет ремонтировать трубы «на месте».

2. Увеличение срока службы: Использование коррозионностойких материалов (титан, цирконий, нержавеющая сталь) защищает от дальнейшей коррозии.

3. Экономия: Стоимость ремонта значительно ниже замены всего куба.

Защитные мероприятия при монтаже.

Для предотвращения износа рекомендуется:

1. Установка разрезных труб с раструбом в зонах максимального износа (входные участки).

2. Применение тепловой и противоизносной изоляции трубных досок.

3. Использование предохранительных разрезных вставок в трубы для защиты от золового износа.

Оптимизация режимов эксплуатации.

1. Строгое соблюдение графиков обдувки поверхностей нагрева для уменьшения фракции уносимого шлака.

2. Контроль температуры уходящих газов для предотвращения низкотемпературной коррозии.

3. Минимизация времени совместного сжигания мазута и угольной пыли на этапе растопки.

Анализ технического состояния ВЗП после ремонта (котла БКЗ-500-140).

В качестве примера рассмотрены результаты балансовых испытаний котла ст. №6 Ново-Иркутской ТЭЦ [5] после проведения среднего ремонта в августе 2024 года. В результатах учтены температурные параметры, которые являются ключевыми показателями эффективности, расходные параметры, аэродинамические параметры (герметичность и сопротивление), газовый анализ, электрические параметры тягодутьевых устройств. Параметры были изменены термопарами, вторичными поверенными приборами, дифференциальными манометрами, тягонапорометрами, газоанализаторами амперметрами и вольтметрами. Из полученных результатов на производстве была составлена балансовая таблица по испытанию ВЗП после ремонта.

Анализ ведомости параметров показал следующие изменения:

1. Снижение содержания горючих в уносе и шлаке: Это свидетельствует о более полном сгорании топлива.

2. Снижение коэффициента избытка воздуха: После ВЗП (α_вп) и за дымососом (α_дс), что говорит об улучшении аэродинамики и уплотнении газоходов.

3. Рост КПД котла: На 0,66% (с 91,52% до 92,18%), что подтверждает эффективность проведенных работ.

4. Снижение присосов воздуха: В конвективной шахте и золоуловителе, что уменьшает потери тепла.

В процессе ремонта были заварены или заглушены поврежденные трубы, однако часть теплообменной поверхности была выведена из работы. Это подчеркивает необходимость применения технологий, позволяющих восстанавливать трубы без их полного отключения

Выводы.

Проведенный анализ показывает, что основными причинами сокращения межремонтного периода ВЗП являются золовой износ и низкотемпературная коррозия. Традиционные методы ремонта не всегда эффективны в долгосрочной перспективе.

Внедрение новых технологий, таких как ремонт с использованием вставных коррозионностойких трубок, а также применение защитных конструктивных элементов при монтаже новых кубов, позволяет:

1. Существенно увеличить межремонтный период воздухоподогревателей.
2. Повысить надежность и экономичность работы котельного агрегата.
3. Снизить эксплуатационные затраты на техническое обслуживание и ремонт.

Комплексный подход, сочетающий современные методы ремонта с оптимизацией режимов эксплуатации, является залогом повышения эффективности отечественной теплоэнергетики.

Литература:

1. Тепловой расчет котлов (Нормативный метод). Издание 3-е, переработанное и дополненное. Издательство НПО ЦКТИ, СПб, 1998. – 256 с.

2. Правила технической эксплуатации тепловых энергоустановок (ПТЭ ТЭ). Утверждены приказом Минэнерго РФ. — М.: НЦ ЭНАС, 2023.

3. Балахничев Н.А., Дунаев А.П. Эксплуатация паровых котлов: Практическое пособие по эксплуатации паровых котлов. — М.: Энергоатомиздат, 1987.

4. Методы уменьшения износа воздухоподогревателей [Электронный ресурс] https://cyberpedia.su/5xaef9.html (дата обращения: 30.03.2026).

5. Отчет о балансовых испытаниях КА ст.№6 после текущего ремонта 2024г. НИ ТЭЦ. — ООО Байкальская энергетическая компания, 2024.

An increase in the inter-repair period of boiler air heaters and new repair methods

Stepanyak M.D.[1,a], Rychkov D. A.[1,b]
[1]Bratsk State University, 40 Makarenko st., Bratsk, 665709, Russian Federation
[a]matvey.stepa@yandex.ru, [b]dielektrik84@mail.ru

Keywords: air heater, inter-repair period, repair, ash wear, low-temperature corrosion, plug-in pipe, modernization.

The article considers the main causes of damage to tubular air heaters (VZPS) of power boilers, analyzes the results of balance tests of the BKZ-500-140 boiler after repair, and also suggests modern methods of repair and protection of heating surfaces. Special attention is paid to the innovative technology of pipe restoration using inserts of a smaller diameter, which significantly increases the repair period and increases the reliability of the equipment.

КОНСТРУКЦИИ, ТЕХНИЧЕСКИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

УДК 656.13

Зимние шины: виды, характеристики и их влияние на безопасность

Семыкина А.С.[1,a], Цой Е.А.[1,b], Орлов Л.В.[1,c], Лежнева В.А.[1,d], Артыков М.[1,e]
[1]Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, ул. Костюкова 46, Белгород, Россия
[a]allasemykina1@gmail.com, [b]alexandrrovich@gmail.com,
[c]89087820480@mail.ru,[d]legnevavitalina@gmail.com, [e]sdfmklsdvdsklajljgre@mail.ru

Ключевые слова: шины, виды автомобильных шин, классификация шин, эксплуатация шин.

В статье дана классификация зимним видам автомобильных шин. Выделены преимущества и недостатки зимних шин. Отмечены требования, предъявляемые к эксплуатации зимних шин. На основе экспериментальных исследований определены марки шин, обладающие наилучшими характеристиками.

Благодарности: Работа выполнена в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет 2030» с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

Введение.

Обсуждения, посвящённые преобладанию тех или иных типов зимних шин, не прекращаются годами, при этом окончательный вердикт определяет совокупность климатических условий, характер транспортной инфраструктуры и индивидуальные требования водителя [1-6].

Целью данной статьи является проведение анализа существующих видов зимних автомобильных шин, на основе которого необходимо провести экспериментальные исследования выбора наиболее эффективной марки зимней шины, эксплуатирующийся при различных условиях.

Теория или методика.

Разницей между шипованными и фрикционными шинами является принцип, обеспечивающий контакт с дорожной поверхностью. У первых к элементам сцепления относятся впрессованные штифты, обычно выполненные из сплавов металлов (сталь, алюминий) с износостойким сердечником, для которого используется карбид вольфрама. Таким шинам характерна малая глубина протектора, ограниченное число ламелей и высокая жёсткость материала, что делает их идеальными для движения по дорогам, покрытым слоем льда или плотного снега. К недостаткам можно отнести повышенную шумность, негативное воздействие на дорожное полотно и снижение сцепления на очищенной сухой дороге [7].

У фрикционных шин, именуемых в разговорной речи «липучками», протектор изобилует глубокими каналами и большим количеством ламелей, которые контактируя с влажной или обледеневшей поверхностью, немного раскрываются, частично поглощая влагу, а их края, образуя дополнительные зацепы, улучшают удержание автомобиля на скользком покрытии.

Фрикционные шины подразделяются на европейские и скандинавские.

Европейский тип предназначен для эксплуатации в мягких зимних условиях, где температура воздуха редко опускается ниже -5 °C. Такие модели оснащаются малым числом ламелей, а состав их резиновой смеси остаётся чувствительным к холоду. Наиболее эффективны на асфальте, свободном от снега или слегка припорошенном, а также при незначительном увлажнении покрытия.

Скандинавские вариации приспособлены к более суровым климатическим условиям, свойственным регионам с затяжными морозами, когда столбик термометра стабильно держится ниже -20 °С. Особенность их конструкции – множество ламелей, что способствует повышенному сцеплению на ледяной поверхности, отполированном снежном насте и скользких проезжих частях. В периоды оттепелей, когда дороги покрываются рыхлой смесью, эффективность подобных шин снижается [8].

Преобладающее мнение специалистов, работающих в условиях Крайнего Севера, на Урале и в Сибири, сводится к выбору шипованных шин, которые способны обеспечить безопасность при экстремальных перепадах температур и возникающей наледи [9].

В европейском сегменте России, где зимы носят умеренный характер, а городские дороги регулярно очищаются специализированной техникой и обрабатываются реагентами, фрикционные варианты более востребованы [10].

Результаты и обсуждение.

Сформированная на базе анализа пользовательских отзывов, подборка востребованных зимних покрышек демонстрирует разнообразие актуальных моделей с учётом эксплуатационных характеристик. На основе проведённого анализа, ниже представлены типы востребованных шипованных и фрикционных шин.

1. Шипованные шины Nokian Hakkapelliita 9. Эта модель занимает лидирующие позиции в многочисленных зимних тестах вне зависимости от типа покрытия – будь то укатанный снег, лёд или мокрый асфальт. Опция RunFlat обеспечивает движение даже при потере давления, что особенно ценно при экстремальных условиях эксплуатации [5].

2. Michelin X-Ice North 4, представляющая французскую школу шинопроизводства, проявила себя исключительной управляемостью на сопках, заснеженных дорогах и льду, сохраняя при этом высокий уровень комфорта. Конструкция задумана специально для суровых климатических испытаний, что подтверждает минимальный шум, отличную проходимость и предсказуемую динамику на зимних магистралях [4].

3. Continental Ice Contact 3. Эта модель выделяется среди конкурентов высокой степенью устойчивости, как на обледеневшем полотне, так и в глубоком снегу. За фиксацию шипов отвечает карбидный сердечник, обеспечивающий долговечность и уверенное сцепление с дорогой при минимальном уровне шума [6].

4. Michelin Pilot Alpin 5 SUV, сочетающая в себе инновационный состав резиновой смеси, рациональное расположение элементов протектора и направленную структуру ламелей. Эти особенности гарантируют максимальный контроль над транспортным средством на зимних трассах любой сложности – от сухого до заледеневшего покрытия [4].

5. Bridgestone Blizzak LM005, ориентированные на мягкие и влажные зимы, обеспечивают впечатляющее сцепление с дорогой вне зависимости от погодных условий. Протектор и эффективная система ламелей способствуют быстрому удалению влаги, снижая риск возникновения аквапланирования на мокрых поверхностях [6].

6. Шина Yokohama iceGUARD Studless iG50 PLUS отличаются увеличенным числом ламелированных элементов и сложной геометрией протектора. Центральные трёхмерные ламели придают дополнительную устойчивость и динамичность, что принципиально важно для предсказуемости поведения автомобиля на заснеженной и обледенелой дороге [6].

Выводы. На основе финансовых затрат на приобретение шины выбор наиболее эффективной шины только по этому параметру не ограничивается. К выбору шин предъявляется множество требований, которые должны отвечать требованиям, в первую очередь, безопасности. Приоритеты пользователей должны определяться особенностями климата конкретного региона, стажем и характером управления автомобилем.

Литература:

1. Петрова, Д. В. Повышение безопасной эксплуатации автомобилей / Д. В. Петрова, О. В. Головин, С. О. Андреева // Сборник докладов Международной научно-технической конференции молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова : Сборник докладов конференции, Белгород, 29–30 мая 2025 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2025. – С. 185-190.
2. Семыкина, А.С. Повышение безопасности дорожного движения / А.С. Семыкина, Д.А. Сердюк, М. Артыков, Е.А. Цой, М.В. Петрук // Механики XXI веку. 2025. № 24. С. 188-192.
3. Андреева, С.О. Система технического обслуживания и ремонта подвижного состава автомобильного транспорта / С.О. Андреева, Д.В. Петрова, А.С. Семыкина // В книге: Сборник трудов международной молодёжной школы "Инженерия-XXI". Сборник тезисов молодёжной школы при IV международной научно-практической конференции "Инженерно-техническое образование и наука" (ИТОН-2024). Новороссийск, 2024. С. 51-52.
4. Сапоженков, Н. О. Повышение эффективности эксплуатации зимних шипованных шин / Н. О. Сапоженков, В. С. Петров, Д. В. Жданов // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2021. – № 6. – С. 96-105. – DOI 10.25198/2077-7175-2021-6-96.
5. Маливанов, И. А. Повышение надежности шин в зимних условиях эксплуатации / И. А. Маливанов, С. А. Александров // Синтез науки и образования как инструмент решения глобальных проблем современности : Сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции, Челябинск, 12 ноября 2023 года. – Стерлитамак: Общество с ограниченной ответственностью "Агентство международных исследований", 2023. – С. 128-130.
6. Корнеева, А. С. Оценка эффективности эксплуатации зимних шин / А. С. Корнеева // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. – 2015. – № 1(3). – С. 2.
7. Захаров, Н. С. Метод оценки работоспособности зимних шипованных шин / Н. С. Захаров, Н. О. Сапоженков, В. С. Петров // Транспортное дело России. – 2024. – № 3. – С. 231-233.
8. Войку, И. П. Разработка двусторонней летне-зимней пневматической шины / И. П. Войку, И. А. Комиссаров // Пром-Инжиниринг : труды V Всероссийской научно-технической конференции, Москва-Челябинск-Новочеркасск-Волгоград-Сочи, 25–29 марта 2019 года. – Москва-Челябинск-Новочеркасск-Волгоград-Сочи: Издательский центр ЮУрГУ, 2019. – С. 142-145.
9. Балабин, И. В. Зимние шины колесных машин, адаптированные к безопасному движению на дорогах с ледяным покрытием и чистым сухим дорогам / И. В. Балабин, О. И. Балабин // Междисциплинарные исследования и открытия: неопределенность и новые вызовы : Сборник статей VIII Международной научно-практической конференции, Москва, 14 мая 2024 года. – Москва: Издательство ЦДПО "Цифровая академия", 2024. – С. 21-26.
10. Балабин И.В., Чабунин И.С. Механика колеса мобильной машины: Учебное пособие. Под общей редакцией проф., д.т.н. И.В. Балабина. - М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022. - 475 с.

Winter tires: types, characteristics, and their impact on safety

Semykina A.S.[1,a], Tsoi E.A.[1,b], Orlov L.V.[1,c], Lezhneva V.A.[1,d], Artykov M.[1,e]
[1]Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 46 Kostyukova Street, Belgorod, Russia
[a]aallasemykina1@gmail.com, [b]balexandrrovich@gmail.com, [c]89087820480@mail.ru, [d]legnevavitalina@gmail.com, [e]sdfmklsdvdsklajljgre@mail.ru

Keywords: tires, types of car tires, classification of tires, operation of tires.

The article provides a classification of winter types of car tires. The advantages and disadvantages of winter tires are highlighted. The requirements for the operation of winter tires are noted. Based on experimental studies, the tire brands with the best characteristics are identified.

УДК 629.3.07

Исследование радиуса качения колеса в ведомом режиме при его движении по двум роликам диагностического стенда

Камнев А. В.[1,a] , Толстошеев Э. В.[1,a] , Рябинин И. А.[1,b], Усов Д. А.[1,c]
[1]Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия
[a]dadestone@yandex.ru, [b]ilarabinin94@gmail.com, [c]usovdbulat21@yandex.ru

Ключевые слова: радиус качения колеса в ведомом режиме, роликовый стенд, эластичная шина, давление воздуха в шине

В статье исследуется влияние давления воздуха в шине на величину радиуса качения колеса в ведомом режиме при его работе на роликовом стенде. Актуальность работы обусловлена противоречием между необходимостью точного контроля тягово-мощностных параметров колесных транспортных средств (КТС) на роликовых стендах и недостаточностью знаний о закономерностях формирования потерь в шинах при этих условиях. Целью исследования является оценка указанного влияния и выявление соответствующей закономерности для повышения точности диагностирования КТС.

Введение.

Точность измерения тягово-мощностных параметров колесных транспортных средств на роликовых стендах является важной задачей для диагностики, сертификации и доводки автомобилей в условиях, приближенных к эксплуатационным. Одним из ключевых факторов, определяющих достоверность этих измерений, является силовые и скоростные потери, возникающих в пятне контакта эластичной шины с цилиндрической поверхностью роликов стенда. Кинематическим параметром, непосредственно связанным с этими потерями, является радиус качения колеса.

В современной практике диагностики и испытаний зачастую используется динамический радиус колеса. Однако, как показывают исследования [1, 2], его применение, особенно при построении зависимостей *φ(S)*-диаграмм, может приводить к систематическим ошибкам, превышающим 13%. Более адекватной характеристикой для оценки скоростных потерь считается радиус r□□ качения колеса в ведомом режиме, значение которого близко к силовому радиусу [2]. Несмотря на большой существующий объем исследований, посвященных качению колеса как по плоской поверхности, так и по роликам стендов [3-6 и др.], влияние эксплуатационных параметров шины, остается недостаточно изученным. В частности, влияние давления P_w в шинах автомобильных колес на величину радиуса качения на цилиндрических поверхностях роликов диагностического стенда.

Актуальность углубленного изучения данной зависимости подтверждается практическими случаями. Например, испытания 2022 года, проведенные компанией *Ekanoo Racing* на новом автомобиле *Toyota Land Cruiser 300*, выявили значительные (около 9,6%) потери мощности, при измерении на роликовом стенде [7]. Таким образом, возникает противоречие между требованиями к эффективному контролю параметров КТС и дефицитом знаний о закономерностях формирования потерь в шине на указанном стенде.

Процесс качения эластичного колеса описывается набором условных параметров, имеющих размерность длины, которые принято называть его радиусами [8]. К ним относятся: свободный радиус $r_с$, статический $r_{ст}$, динамический $r_д$ и кинематический $r_к$ радиусы (рис. 1).

Под свободным радиусом понимается половина наружного диаметра ненагруженного колеса. Статический радиус определяется как расстояние от центра колеса до опорной поверхности под нагрузкой. Данные параметры, в силу своей природы, могут быть относительно просто измерены на неподвижном колесе.

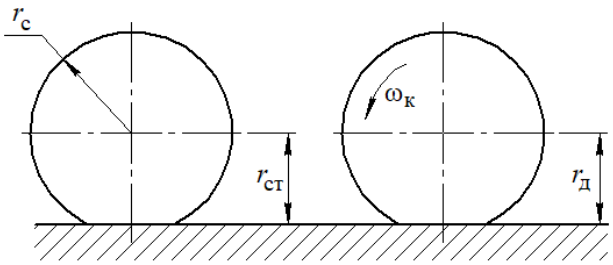


Рис. 1. Радиусы колеса

В отличие от них, определение динамического и кинематического радиусов сопряжено с методическими сложностями, поскольку требует проведения измерений в условиях качения колеса с угловой скоростью $\omega_к$ под действием вертикальной нагрузки $G_к$. Кроме того, на их величину оказывают существенное влияние эксплуатационно-конструктивные параметры шины: давление воздуха P_w и высота h протектора шины.

Методика экспериментальных исследований.

Для проведения экспериментальных исследований был использован стенд модели *Hofmann Dynatest Pro 260 kw-4WD,* установленный в лабораториях кафедры «Машиностроения и транспорта» ФГБУО ВО «Братский государственный университет». Стенд предназначен для измерения линейной скорости, тягового усилия и мощности двигателя КТС категории М1 с приводом (4х2) и (4х4). Внешний вид стенда представлен на рис. 2.

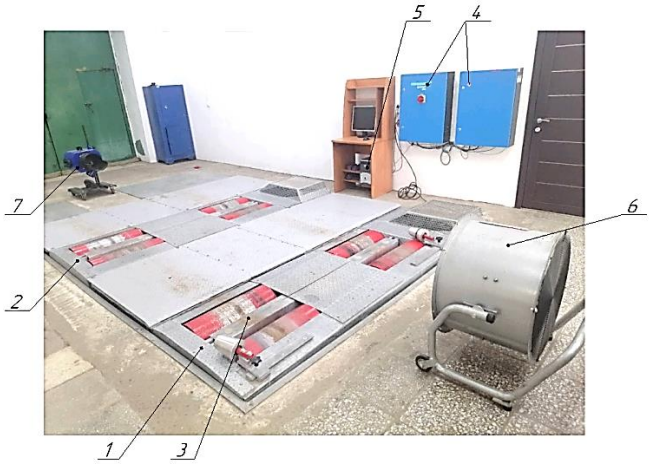


Рис. 2. Стенд *Hofmann Dynatest Pro 260 kw-4WD*:
1 – передний блок опорных роликов; 2 – задний блок опорных роликов; 3 - механизм фиксации опорных роликов; 4 – электронная система с АЦП; 5 – персональный компьютер; 6 – автоматический вентилятор для принудительного охлаждения ДВС; 7 - система вытяжки отработавших газов

Методика определения радиуса качения колеса в ведомом режиме состоит из: подготовительного и измерительно-расчетного этапов.

Подготовительный этап включает в себя:

1. Осмотр шин КТС на наличие внешних дефектов, таких как: порезы, следы неравномерного износа и т.п.;
2. Измерение высоты h протектора шины КТС;
3. Включить пульт управления стендом
4. Определение нагрузки $G_к$ на каждое колесо КТС;
5. Проверка исправности компрессора и механизма фиксации роликов стенда;
6. Установка автомобиля на роликовый стенд;
7. На трубу глушителя установить и закрепить патрубок системы вытяжки отработавших газов и включить эту систему;
8. Позиционирование колес КТС по центру, между двумя опорными роликами, под каждым колесом;

9. Осуществить движение автомобиля по роликам стенда со скоростью не более 10 км/ч. При движении должно отсутствовать боковое смещение КТС по роликам. Отсутствие воздействия на рулевое колесо будет свидетельствовать о правильном положении КТС на роликах стенда. При боковом смещении автомобиля вернуться к пункту 7.

10. Заглушить двигатель автомобиля и выключить систему вытяжки отработавших газов.

Измерительно-расчетный этап включает в себя:

1. Измерить давление P_w в шине автомобильного колеса (начальное давление рабочего тела в шине установить *0,05 МПа*)

2. Нанести мелом риски на колесе и роликах стенда согласно примеру, представленному на рис. 3.

Рис. 3/ Нанесение рисок на шину и ролики стенда: давление рабочего тела в шине *0,05 МПа;* нагрузка на колесо *3250 Н*

3. Вращать колесо до совершения полных 10 оборотов вокруг своей оси, при этом считать количество оборотов роликов стенда. Путь, пройденный колесом за неполный оборот бегового барабана, необходимо измерить рулеткой;

4. Рассчитать по формуле путь $L_к$, пройденный колесом по поверхности каждого ролика:

$$L_к = 2 \cdot \pi \cdot N_р \cdot r_р + L_{нп} \ , [м] \quad (1)$$

где $N_р$ - количество полных оборотов, сделанных роликом; $r_р$ - радиус ролика стенда *[м]*; $L_{нп}$ - путь, пройденный колесом за неполный оборот ролика стенда *[м]*.

5. Определить величину радиуса $r_{ко}$ качения в ведомом режиме по формуле:

$$r_{ко} = \frac{L_к}{2 \cdot \pi \cdot 10} \ , [м] \quad (2)$$

6. Повторить операции с пункта 1 до пункта 5 при варьировании давления P_w рабочего тела в шине и нагрузки $G_к$ на колесо.

Результаты экспериментальных исследований.

Для проведения экспериментальных исследований радиуса качения колеса в ведомом режиме были использованы серийные шины *Bridgestone 185/70R14* с высотой протектора *3* и *8 мм*.

Нагрузка $G_к$ на колесо составляла *3250 Н* и была неизменна на всех этапах исследования. Измерение нагрузки на колесо производилось при помощи измерительной системы стенда.

Давление P_w рабочего тела в шине изменяли дискретно из ряда: *0,05 МПа*; *0,10 МПа*; *0,15 МПа*; *0,20 МПа*; *0,25 МПа*; *0,30 МПа*; *0,35 МПа*. Контроль давления проводили в начале каждого эксперимента с помощью образцового манометра.

По результатам экспериментальных исследований были получены следующие результаты исследования – см. табл. 1.

Результат, в виде таблиц (табл. 1) и графиков (рис. 4) наглядно показывают исследуемый процесс, а для их использования, необходимы формулы, характеризующие рассматривающие зависимости.

Таблица 1

Экспериментальные данные по исследованию качения колеса в ведомом режиме на роликах диагностического стенда

Высота протектора *3 мм*		Высота протектора *8 мм*	
Давление воздуха в шине	Радиус качения колеса в ведомом режиме	Давление воздуха в шине	Радиус качения колеса в ведомом режиме
P_w , МПа	$r_{ко}$, м	P_w , МПа	$r_{ко}$, м
0,05	0,272	0,05	0,273
0,1	0,281	0,1	0,283
0,15	0,285	0,15	0,288
0,2	0,291	0,2	0,293
0,25	0,293	0,25	0,296
0,3	0,296	0,3	0,299
0,35	0,299	0,35	0,3

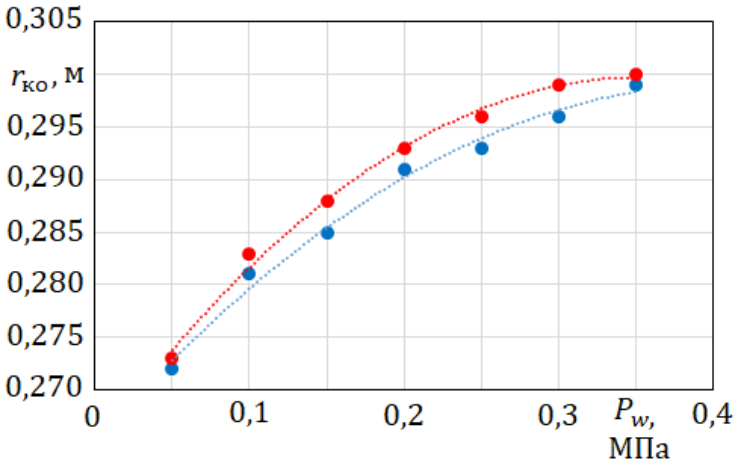


Рис. 4. Графики зависимости радиуса качения в ведомом режиме с шиной модели *Bridgestone 185/65 R14* от давления воздуха в ней, при нормальной нагрузке $G_к$ = *3250 Н*:
1) для шины с высотой протектора *3 мм* ● - эксперимент; ····· - аппроксимация; 2) для шины с высотой протектора *8 мм* ● - эксперимент; ····· - аппроксимация

Аппроксимация полученных результатов производится в программе *«Microsoft Excel»*, которая позволяет получить – линейную, логарифмическую, экспоненциальную, степенную и полиномиальную функцию. По результатам аппроксимации было предложено использовать уравнение полиномиальной зависимости второй степени, а само уравнение стало иметь вид:

$$r_{ко} = A \cdot P_w^2 + B \cdot P_w + C, \quad (3)$$

где A, B и C – коэффициенты полиномиальной зависимости при измерении радиуса качения в ведомом режиме на роликовом стенде, значения которых приведены ниже.

Для шины с высотой протектора *3 мм* было получено уравнение вида:

$$r_{ко} = -0{,}2048 \cdot P_w^2 + 0{,}1669 \cdot P_w + 0{,}265, \quad (4)$$

а для шины с выстой протектора *8 мм*:

$$r_{ко} = -0{,}281 \cdot P_w^2 + 0{,}1988 \cdot P_w + 0{,}2646. \quad (5)$$

Оценка адекватности математических моделей (4) и (5), производилась по нескольким показателям, а ее результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2

Оценочные показатели однофакторной степенной математической модели, определяющей радиус качения в ведомом режиме.

Показатель	Значение для модели (4)	Значение для модели (5)
Множественный коэффициент корреляции, *R*	0,9952	0,9972
Коэффициент детерминации, R^2	0,9904	0,9945
Средняя ошибка аппроксимации, %	0,282	0,171

Выводы.

Однофакторные степенные математические модели, определяющие радиус качения в ведомом режиме, в зависимости от давления рабочего тела в шине, при ее качении на роликах стенда, имеют достаточную адекватность и практически точно описывают реальный процесс. Средняя ошибка аппроксимации – *0,282%* для модели (4) и *0,171%* для модели (5), что значительно меньше допустимого значения в *15 %*. В процессе работы над исследованием радиуса качения в ведомом режиме для шины *R14* было получено уравнение, описывающее его изменение от давления рабочего тела в шине. Радиус качения в ведомом режиме позволяет оценить скоростные потери в шинах автомобильного колеса при диагностировании КТС на роликовых стендах.

Литература:

1. Методика измерения тяговых параметров КТС на стендах с беговыми барабанами с учетом потерь в шинах. Технический журнал «Грузовик: транспортный комплекс, спецтехника» №12, С. 31-35, 2024 г., г. Москва.

2. Федотов, А. И. О силовом радиусе колеса с эластичной шиной / А. И. Федотов, О. С. Яньков, А. В. Камнев // Труды НАМИ. – 2022. – № 1(288). – С. 52-60. – DOI 10.51187/0135-3152-2022-1-52-60

3. Дик А.Б. О радиусе эластичного колеса // Автомобильная промышленность. – 2010. – № 10. – С. 21–30.

4. Работа автомобильной шины / В.И Кнороз, Е.В. Кленников, И.П. Петров, А.С. Шелухин, Ю.М. Юрьев, Под ред. В.И. Кнороза. М., Транспорт, 1976. 238 с

5. Тарасик В.И. Теория движения автомобиля: Учебник для вузов. 2-е издание – СПб БХВ-Петербург, 2022. – 576 с.: ил.

6. Дик, А. Б. Математические модели пневматической шины : монография / А. Б. Дик ; под общ. ред. А. И. Федотова. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2025. - 232 с.

7. https://news.drom.ru/Land-Cruiser-300-84560.html?ysclid=ml7rfvi2hl112533061 (дата обращения 04.02.2026).

8. Литвинов А.С., Фаробин Я.Е. Автомобиль: Теория эксплуатационных свойств: Учебник для вузов по специальности «Автомобили и автомобильное хозяйство». – М.: Машиностроение, 1989. – 240 с.: ил.

Study of the rolling radius of a wheel in driven mode when it moves along two rollers of a diagnostic stand

Kamnev A.V.[1,a] , Tolstosheev E.V[1,a] , Ryabinin I.A.[1,b], Usov D.A.[1,c]

[1] Bratsk State University, 40 Makarenko st., Bratsk, 665709, Russian Federation

[a]dadestone@yandex.ru, [b]ilarabinin94@gmail.com, [c]usovdbulat21@yandex.ru

Keywords: wheel rolling radius in driven mode, roller stand, elastic tire, tire air pressure

The article studies the effect of tire air pressure on the rolling radius of a wheel in the driven mode when it is operating on a roller stand. The relevance of the work is due to the contradiction between the need for accurate control of the traction and power parameters of

wheeled vehicles on roller stands and the lack of knowledge about the patterns of tire losses under these conditions. The purpose of the study is to evaluate this effect and identify the corresponding pattern to improve the accuracy of diagnosing wheeled vehicles.

УДК 631.3

История развития сельскохозяйственных машин и техники в Индии

Иванов В.С.[1,a]
[1]Хакасский государственный университет им. Н.Ф. Катанова, ул. Хакасская 6, Абакан, Россия
[a]Ivanov_vs2020@mail.ru

Ключевые слова: сельскохозяйственная техника, Индия, история, механизация, ирригация, зеленая революция, тракторостроение, современные технологии.

Данная статья представляет собой комплексное исследование эволюции сельскохозяйственной техники и машин в Индии. Анализ данной техники в Индии позволяет сделать выводы об промышленной индустриализации и развитии данной отрасли в стране. Учитывая экономический потенциал развития данной отрасли, были выявлены темпы роста и производства сельскохозяйственной техники. А так же увеличение доли экспорта техники в разные страны всего мира.

Введение.

Сельское хозяйство является цивилизационным фундаментом Индии. Этот сектор не только обеспечивает продовольственную безопасность крупнейшей по населению страны мира, но и остается крупнейшим работодателем, давая занятость более чем половине трудоспособного населения [1-2]. Развитие сельскохозяйственной техники стало решающим фактором в трансформации аграрного сектора - от борьбы с голодом в середине XX века до амбиций по достижению статуса высокотехнологичной аграрной державы [3-4].

Прослеживая историческую траекторию развития сельскохозяйственных машин и техники в Индии, выявляются ключевые факторы, влиявшие на этот процесс на разных этапах, а также определяется оценка современному состоянию и перспективам отрасли. Индии, будучи крупнейшим в мире производителем тракторов и ряда сельскохозяйственных культур, одновременно сталкивается с вызовами фрагментации землевладения, нехватки ресурсов и технологического неравенства между регионами. Опыт Индии в адаптации зарубежных технологий к местным условиям и развитии собственного машиностроения представляет значительный интерес для многих развивающихся стран.

Теория.

Зарождение сельского хозяйства на территории Индийского субконтинента относится к неолиту, о чем свидетельствуют находки в Пакистане, где выращивали ячмень, пшеницу и разводили скот [5]. В Индии сложилась высокоразвитая цивилизация, достижения которой в области агротехники и гидроинженерии стали основой для последующего развития.Были созданы сложные системы каналов и водохранилищ для орошения и защиты от наводнений.

В период империи «Маурьев» происходила систематизация знаний о почвах, метеорологии, использовались железные орудия. В Южной Индии были созданы разветвленные ирригационные системы на основе резервуаров и каналов. Британское правление нанесло тяжелый удар по традиционным технологическим укладам. Экономика была переориентирована на производство сырья (хлопок, джут, чай, опиум) для метрополии.

Результаты.

Обретение независимости и последующий продовольственный кризис заставили индийское правительство кардинально изменить аграрную политику. Основой стал комплекс мер «зеленой революции», запущенный в середине 1960-х годов.Ключевым элементом стало массовое распространение тракторов и мотоблоков. Если в 1951 году в Индии было около 9 тысяч тракторов, то к концу 1980-х - уже более 1.5 миллионов.

Государственная политика импортозамещения стимулировала создание совместных предприятий и развитие собственного сельхозмашиностроения. Такие компании, как Mahindra & Mahindra, Escorts и Tractorsand Farm Equipment Limited (TAFE), наладили производство тракторов, адаптированных к местным условиям и размерам хозяйств.

После экономических реформ 1991 года отрасль перешла от модели импортозамещения к экспортно-ориентированному росту и жесткой конкуренции. Индия является крупнейшим в мире производителем тракторов, выпуская более 900 тысяч единиц в год. Активно представлены и международные бренды, такие как John Deere и CNH Industrial (New Holland), имеющие собственные заводы в Индии (табл. 1).

Таблица 1

Основные типы сельскохозяйственной техники, производимой в Индии

Категория	Подкатегория и назначение	Ключевые характеристики и особенности	Примеры моделей/брендов
1	2	3	4
Тракторы	Маломощные (<30 л.с.)	Компактность, маневренность, низкая стоимость владения.	MahindraYuvraj 215, Sonalika GT 26
	Средней мощности (30-75 л.с.)	Универсальность, баланс мощности и цены, широкий выбор навесного оборудования.	Swaraj 735 FE, Mahindra 575 DI, TAFE 45 DI
	Высокой мощности (>75 л.с.)	Высокая производительность, полный привод, комфортабельная кабина.	John Deere 5050D, New Holland 3630 TX, Mahindra 8560
Техника для предпосевной подготовки и обработки почвы	Плуги	Дисковые, лемешные; регулируемая глубина	Greaves, Fieldking, Shaktiman
	Культиваторы/бороны	Ротационные, зубовые, дисковые; различная ширина захвата.	Dasmesh, Landforce, VST Shakti
	Ротаваторы/фрезы	Высокая скорость обработки, совмещение операций.	Shaktiman, Shrachi
Посевная и посадочная техника	Сеялки разбросного и рядового высева	Точность высева, регулировка нормы, прикатывающие катки.	Nanjng, Mahindra, Farmer'sFriend
	Рисовые сажалки	Значительно снижают трудоемкость, повышают равномерность.	Kubota, Yanmar
Техника для ухода за посевами и полива	Опрыскиватели	Объем бака, длина штанги, системы фильтрации.	MB Crusher, JohnDeere

продолжение таблицы 1

1	2	3	3
	Дождевальные и капельные системы	Локализация производства комплектующих.	Netafim, JainIrrigation
Уборочная техника	Зерноуборочные комбайны	Ширина жатки, мощность, система сепарации.	John Deere, Class, Preet, Kartar
	Специализированные комбайны	Адаптация к специфике культуры	Case IH, NewHolland
Техника для послеуборочной обработки и транспортировки	Молотилки	Производительность, тип привода	VST Shakti, Vishavkarma
	Тракторные прицепы и грузовики	Грузоподъемность, тип кузова	Mahindra, TAFE

Помимо тракторов, индийские компании производят полный спектр техники: плуги, культиваторы, сеялки, опрыскиватели. А также и специализированную технику: комбайны для зерновых, хлопка, сахарного тростника, рисальные сажалки, картофелеуборочные комбайны, техника для садоводства.

Выводы.

История развития сельскохозяйственной техники в Индии отражает сложный и нелинейный путь от одного из древнейших очагов агрокультуры через колониальную деградацию к статусу глобального центра сельхозмашиностроения. Страна прошла этапы:древних инноваций в ирригации и орудиях труда; колониальной стагнации и технологической зависимости; целенаправленной механизации в рамках «зеленой революции», заложившей основы национальной промышленности; рыночной экспансии и глобализации, в результате которой Индия стала «тракторной кузницей» мира.

Современный этап характеризуется переходом от количественного роста к качественной трансформации, движимой цифровыми технологиями и необходимостью решения острых социально-экологических проблем. Успех Индии в создании доступной, надежной и адаптированной к местным условиям техники является уникальным достижением. Опыт Индии в балансировании между традициями и инновациями, масштабом и доступностью будет иметь большое значение для всего развивающегося мира.

Литература:

1. Gupta, R. How do skilled workers find jobs in India: anasses sment study of employment exchanges in India / R. Gupta, N. Bagga // Journal of Economic and Administrative Sciences. – 2022. – DOI 10.1108/jeas-10-2022-0234.

2. Импортозамещение в Российской Федерации: тенденции и направления / А. Н. Столярова, Е. И. Степук, А. Л. Золкин [и др.] // Экономика и управление: проблемы, решения. – 2025. – Т. 3, № 2(155). – С. 111-118.

3. Философия экономики достаточности: путь Таиланда к выполнению Целей устойчивого развития // Экономика природопользования. – 2020. – № 6. – С. 27-121.

4. Кузьмин, В. Н. Механизация сельского хозяйства в Азиатско- Тихоокеанском регионе / В. Н. Кузьмин, А. Н. Алтыбаев // Техника и оборудование для села. – 2016. – № 12. – С. 36-41.

5. Нечаев, В. Н. Анализ и развитие рынка сельскохозяйственной техники как направление обеспечения продовольственной безопасности / В. Н. Нечаев, М. Л. Нечаева, Е. В. Ганебных // Международный технико-экономический журнал. – 2017. – № 4. – С. 21-30.

History of development of agricultural machines and equipment in India

Ivanov V.S.[1,a]
[1]Khakassky State University named after N.F. Katanov, Khakasskaya str. 6, Abakan, Russia
[a]Ivanov_vs2020@mail.ru,

Keywords: agricultural machinery, India, history, mechanization, irrigation, green revolution, tractor-building, modern technologies.

This article is a comprehensive study of the evolution of agricultural machinery and vehicles in India. The analysis of this machinery in India allows us to draw conclusions about the industrialization and development of this sector in the country. Given the economic potential of this sector, the growth and production rates of agricultural machinery have been identified. Additionally, the increase in the export of agricultural machinery to various countries around the world has been observed.

УДК 631.374

Эволюция и современное состояние тракторостроения на Минском тракторном заводе

Иванов В.С.[1,a]
[1]Хакасский государственный университет им. Н.Ф. Катанова, ул. Хакасская 6, Абакан, Россия
[a]Ivanov_vs2020@mail.ru

Ключевые слова: МТЗ, Беларус, трактор, сельскохозяйственная техника, история тракторостроения, модели тракторов.

В данной статье проводится комплексный анализ исторического пути и современного состояния одного из крупнейших производителей сельскохозяйственной техники на постсоветском пространстве — Минского тракторного завода. Исследование охватывает ключевые этапы становления предприятия от послевоенного восстановления до статуса международного бренда «Беларус». На основе систематизации данных представлен обзор современного модельного ряда, классифицированного по мощности и назначению. Статья включает аналитические таблицы, отражающие эволюцию моделей, текущую линейку продукции и экономические показатели.

Введение.

Минский тракторный завод занимает уникальное место в истории промышленности СССР и современной Беларуси. Созданный как символ послевоенного восстановления, он превратился в градообразующее предприятие и одного из мировых лидеров в сегменте колесных тракторов среднего класса. Продукция под брендом «Беларус» стала не просто техникой, а культурным феноменом, синонимом надежности и универсальности для нескольких поколений аграриев. Прослеживая эволюцию Минского тракторного завода от основания до наших дней, можно оценить современный модельный ряд и технологический потенциал [1-2].

Теория.

История завода является отражением экономической истории всей страны. Её можно разделить на несколько этапов: этап становления (1946-1950); этап массового производства и легендарных моделей (1960-1980); этап выживания (1990); этап инноваций (2000- наши дни).

Результаты.

Решение о строительстве завода в Минске было принято 29 мая 1946 года. Первой серийной продукцией (1948г.) стали не тракторы, а болотный плуг и пусковой двигатель. В 1950 году завод освоил выпуск гусеничного трактора КД-35 (37 л.с.), что стало важной вехой в истории становления завода. Однако поворотным моментом, определившим будущее предприятия, стал 1953 год — начало массового производства первого колесного универсально-пропашного трактора «Беларусь» МТЗ-2. Данная модель стала основой конструкторской школы и производственной специализации МТЗ на колесных тракторах [3-4].

Второй этап стал периодом массового производства легендарных моделей. Освоение моделей МТЗ-50/МТЗ-52 (1962г.) сделало трактор «Беларус» народным. Но лучшее решение инженерной мысли стала модель МТЗ-80/МТЗ-82 (1974г.). Её полноприводная модификация МТЗ-82 с двигателем мощностью 80 л.с. установила новые стандарты универсальности, надежности и ремонтопригодности. Простота конструкции, развитая гидросистема и вал отбора мощности позволяли агрегатировать трактор с различными видами навесного оборудования. Экспорт более чем в 100 стран мира сделал бренд «Беларус» узнаваемым во всем мире. К концу 1980-х годов МТЗ стал флагманом советского тракторостроения, выпуская сотни тысяч сельскохозяйственных машин.

Распад СССР и разрыв хозяйственных связей поставили МТЗ на грань «выживания». Резкое падение спроса, инфляция, проблемы со снабжением комплектующими приводили большинство предприятий к глубокому кризису. Визит руководства Беларуси в 1995 году и последующее решение о предоставлении государственной поддержки позволили стабилизировать ситуацию. Стратегия этого периода свелась к: сохранению костяка коллектива, модернизации старых проверенных моделей (в первую очередь, МТЗ-82) и поиску новых рынков сбыта. Каждая модель трактора имела свою уникальную особенность, а также историческое значение (табл. 1).

Таблица 1

Эволюция ключевых моделей тракторов МТЗ в XX веке

Модель	Годы выпуска	Мощность, л.с.	Ключевые особенности и историческое значение
КД-35	1950-1951	37	Первый серийный трактор завода.
МТЗ-2 «Беларусь»	1953-1958	37	Первый серийный колесный трактор. Определил будущую специализацию завода.
МТЗ-50 / МТЗ-52	1962-1985	50	Массовая модель 1960х годов. Символ механизации сельского хозяйства СССР.
МТЗ-80 / МТЗ-82	1974 – н.в. (в модерн.)	80	Легендарная, самая массовая модель. Эталон надежности и универсальности. Основа современной модификации «Беларус-82.1».

Преодолев кризис, МТЗ активно занялся обновлением линейки. Современная продукция — это синтез проверенной временем конструкции, новых двигателей, соответствующих экологическим стандартам, и улучшенной эргономики кабины. Современные тракторы «Беларус» можно разделить на несколько четких классов, исходя из мощности и целевого назначения (табл. 2).

Таблица 2

Классификация современного модельного ряда тракторов «Беларус»

Класс мощности	Целевое назначение	Модели	Диапазон мощностей, л.с.	Ключевые потребительские свойства
Компактные	ЛПХ, коммунальные работы, озеленение, работы в стесненных условиях	«Беларус-320/321», «Беларус-422/622»	36 — 65	Маневренность, экономичность, многофункциональность за счет навесного оборудования
Универсально-пропашные	Основные сельскохозяйственные работы (вспашка, культивация, посев, транспортировка)	«Беларус-82.1», «Беларус-892/892.2», «Беларус-922»	81 — 100	Баланс мощности, универсальности и стоимости. Прямое развитие концепции МТЗ-80
Энергонасыщенные	Интенсивное земледелие, работа с широкозахватными и тяжелыми орудиями	«Беларус-1221», «Беларус-1523», «Беларус-2022»	130 — 212	Высокая производительность, комфортная кабина, мощная гидросистема
Тяжелые	Крупные агрохолдинги, наиболее энергоемкие операции	«Беларус-3522», «Беларус-3525», «Беларус-4522»	359 — 450+	Максимальная мощность и тяговый класс, современные трансмиссии, производительные двигатели

По данным завода, производство тракторов мощностью свыше 100 л.с. в 2025 году увеличилось более чем на 30%. Это отвечает глобальному тренду на рост единичной мощности агрегатов в профессиональном сельском хозяйстве. Особого внимания заслуживает серия «Беларус-3500/4500». Эти сельскохозяйственные машины конкурируют в одном сегменте с продукцией мировых брендов. Завод ставит амбициозную цель - выпускать более 90 таких тракторов ежемесячно уже в 2026 году.

Главной анонсированной новинкой является планируемый к серийному выпуску в 2027 году трактор мощностью около 500 л.с., который станет самым мощным в истории предприятия. Это указывает на стратегию движения вверх, для укрепления позиций на международном рынке.

Таблица 3

Сравнительный анализ актуальных моделей разных классов тракторов «Беларус»

Параметр	Модель			
	422	82.1	1221	3522
Мощность двигателя, л.с.	50	81	130	359
Тяговый класс	0,6	1,4	3	5
Трансмиссия	Механическая, синхронизированная	Механическая, с гидроусилителем	Механическая, с возможностью оснащения коробкой передач с переключением под нагрузкой	Полуавтоматическая (роботизированная) или механическая с планетарными механизмами поворота
Типичная сфера применения	Коммунальное хозяйство, ЛПХ, работа в садах и виноградниках	Основные сельскохозяйственные работы, транспортные работы	Комплексная обработка почвы, работа с кормоуборочными комбайнами	Глубокая обработка почвы, работа с широкозахватными посевными и опрыскивающими комплексами

МТЗ остается системообразующим предприятием, обеспечивая десятки тысяч рабочих мест и значительные валютные поступления от экспорта. Его продукция сохраняет конкурентные преимущества: ремонтопригодность и доступность запчастей; Оптимальное соотношение цены и производительности для многих рынков; Адаптивность к различным климатическим условиям и качеству топлива.

Выводы.

Исторический путь МТЗ от создания первого колесного трактора МТЗ-2 до разработки современных сельскохозяйственных машин мощностью под 500 л.с. демонстрирует устойчивость и адаптивность промышленного предприятия. Завод прошел через этапы бурного роста, глубокого кризиса и сложной реструктуризации, сумев сохранить ядро бренда и инженерной школы.

Успех данной марки в будущем зависит от выбранной стратегии и интеграции в технику цифровых технологий, что на данный момент является частью развития АПК. Тракторы «Беларус» остаются значимым явлением на мировом рынке сельхозтехники, а их история служит ценным объектом для изучения эволюции промышленных гигантов.

Литература:

1. Komissarov, S. A. Improving the performance of the Belarus-920 tractor by upgrading the cooling system / S. A. Komissarov // Актуальные проблемы аграрной науки, производства и образования : МАТЕРИАЛЫ IX НАЦИОНАЛЬНОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ (НА ИНОСТРАННЫХ ЯЗЫКАХ), Воронеж, 01–30 апреля 2023 года. – Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2023. – P. 165-170.

2. Хохлов, А. А. Анализ и сравнение эксплуатационных свойств тракторов "Беларус" и тракторов ведущих зарубежных фирм / А. А. Хохлов, А. Б. Лыкова, М. В. Астафьева // Инженерное обеспечение инновационных технологий в АПК : материалы Международной научно-практической конференции, Мичуринск-наукоград РФ, 25–27 октября 2023 года. – Мичуринск: Общество с ограниченной ответственностью "БИС", 2023. – С. 260-265.

3. Голдина, И. И. Анализ и сравнение эксплуатационные свойства тракторов Беларус и тракторов ведущих зарубежных фирм / И. И. Голдина, А. Г. Несговоров // Научно-технический вестник: Технические системы в АПК. – 2019. – № 3(3). – С. 113-123.

4. Иовлев, Г. А. Эксплуатационные свойства тракторов беларуского и китайского производства на примере: БЕЛАРУС 923.3 И ZOOMLION RN904 / Г. А. Иовлев, И. И. Голдина // Научно-технический вестник: Технические системы в АПК. – 2022. – № 1(13). – С. 25-35.

Evolution and current state of tractor-building at the Minsk Tractor Plant

Ivanov V.S.[1,a]

[1]Khakassky State University named after N.F. Katanov, Khakasskaya str. 6, Abakan, Russia

[a]Ivanov_vs2020@mail.ru

Keywords: MTZ, Belarus, tractor, agricultural machinery, history of tractor-building, models of tractors.

This article provides a comprehensive analysis of the historical development and current state of Minsk Tractor Plant, one of the largest manufacturers of agricultural machinery in the post-Soviet space. The study covers key stages of the company's growth, from post-war reconstruction to its status as an international brand under the name "Belarus." Based on the data analysis, the article provides an overview of the current model range, categorized by power and purpose. The article includes analytical tables that reflect the evolution of models, the current product line, and economic indicators.

УДК 629.463

Влияние адаптивных систем буксового узла на динамические характеристики грузовых вагонов

Петракова А. Г.[1,a], Минжасаров М. Х.[2,b]
[1]Омский государственный университет путей сообщения, пр. К. Маркса д.35, Омск, Россия
[2]Омский государственный технический университет, пр. Мира д.11, Омск, Россия
[a]petra-anna@yandex.ru, [b]mmx90@yandex.ru

Ключевые слова: грузовые вагоны, цельнокатаные колеса, модернизация буксового узла, адаптерные системы, кассетные подшипники, динамика системы «вагон – путь», виброускорения кузова, напряженно-деформированное состояние, математическая модель колебаний, сравнительная оценка конструкций.

В статье рассматриваются результаты статистического анализа отказов колесных пар грузовых вагонов по итогам 2024 года. Доминирующей причиной браковки признаны дефекты и повреждения цельнокатаных колес по кругу катания, среди которых лидирующие позиции занимает эксплуатационный износ. В качестве одного из эффективных инструментов повышения ресурса ходовых частей рассматривается совершенствование буксового узла путем внедрения адаптивных конструкций, призванных нивелировать негативное воздействие на путь и оптимизировать динамику движения. На сегодняшний день парк вагонов оснащен как стандартными узлами, так и адаптерами различных модификаций. Сложность и многовариантность конструкции последних обусловливают необходимость оценки их влияния на параметры колебаний. С этой целью была построена система дифференциальных уравнений динамики, основанная на принципе Даламбера, описывающая поведение подсистемы «вагон – путь». Численное решение данной системы, выполненное с введением обоснованных допущений, демонстрирует более высокую эффективность адаптивных буксовых узлов по сравнению с типовыми аналогами, что выражается в снижении износа и улучшении ходовых качеств состава.

Введение.

Увеличение объемов перевозок и наращивание длины грузовых составов неизбежно влекут за собой изменение характера продольно-динамических нагрузок. Внедрение ряда технических решений, направленных на сохранение безопасности движения (в частности, адаптация тележек и колесных пар под осевую нагрузку 23,5 т), привело к побочному эффекту: повышению уровня динамических сил, воздействующих на ходовые части. Это, в свою очередь, стало катализатором неравномерной передачи усилий на буксовый узел и активного развития дефектов по кругу катания колес.

Статистика отказов грузовых вагонов при техническом обслуживании демонстрирует устойчивое лидерство неисправностей колесных пар, где основную массу составляют именно повреждения поверхности катания (рис. 1). Ключевым видом повреждений здесь выступает износ — неизбежный результат длительной эксплуатации (рис. 2).

Исторически сложилось так, что борьба с указанными дефектами велась по нескольким направлениям: варьирование зазоров в ходовых частях, поиск оптимальной геометрии профиля колеса, улучшение свойств колесной стали. Однако кардинально переломить тренд роста отцепок по этим причинам не удавалось. В сложившихся условиях наиболее рациональным решением видится переход на адаптерные буксовые узлы с кассетными подшипниками. Их применение позволяет минимизировать динамическое влияние боковой рамы на колесную пару, сократить долю неподрессоренных масс и ослабить силовое воздействие в трибосопряжении «колесо — рельс» [1].

Теория.

Конструктивное исполнение адаптерного буксового узла отличается применением кассетных подшипников (рис. 3). Их преимущество заключается в более эффективном восприятии и трансляции динамических усилий, возникающих при движении состава (особенно в кривых) от колесной пары на рельсы. Схема передачи нагрузки выглядит следующим образом: усилие от боковой рамы воспринимается адаптером, который установлен на наружном кольце подшипника. В данном случае наружное кольцо берет на себя функцию несущего элемента, заменяя собой традиционный корпус буксы [2].

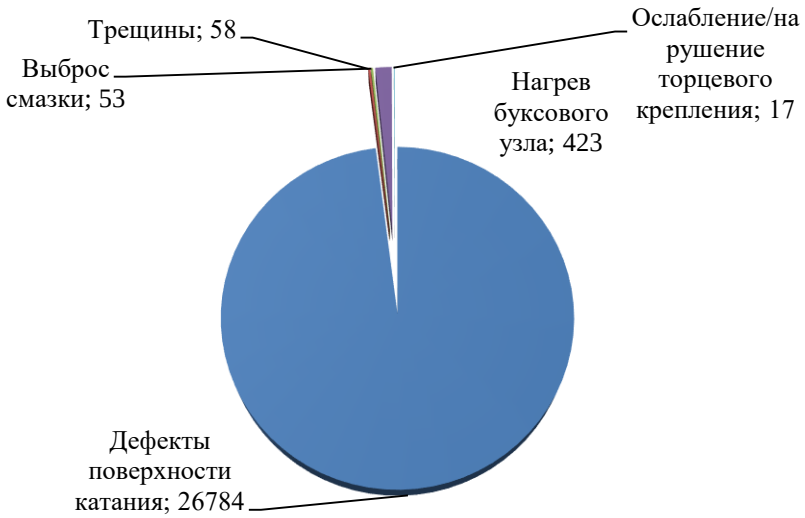


Рис. 1. Причины отцепок колесных пар по Беловскому региону за 2024 г.

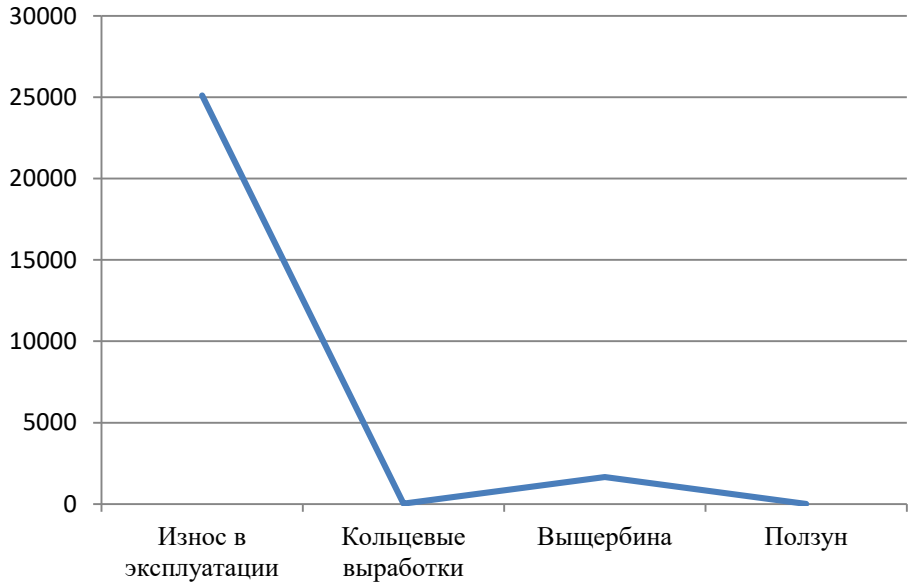


Рис. 2. Анализ повреждений поверхности катания колес грузовых вагонов в Беловском регионе за 2024 г.

Согласно данным, представленным в таблице, адаптерные буксовые узлы демонстрируют значительное превосходство над аналогами: их грузоподъемность выше, а межремонтный пробег превышает показатели типовых конструкций в четыре раза. Такая эффективность во многом обусловлена особенностями производства и геометрией самого

адаптера. Он изготавливается литьем, что позволяет выполнить на его корпусе специальные приливы. Последние играют роль ограничителей, предотвращающих избыточные продольные, поперечные и угловые перемещения колесной пары относительно тележки. В зависимости от технологического регламента завода-изготовителя исполнение этих элементов может различаться (рис. 4).

Таблица 1

Основные эксплуатационные показатели буксовых узлов в зависимости от конструктивного исполнения

№	Технические характеристики	Цилиндрические подшипники	Кассетные подшипники
1	Межремонтный пробег, тыс. км	300	1 200
2	Грузоподъемность, кН: динамическая статическая	 584 774	 990 1720
3	Осевой зазор в свободном состоянии, мм	0,07 – 0,15	0,57 – 0,7
4	Тип смазки	ЛЗ ЦНИИ/Буксол	Буксол
5	Габариты, мм	130 × 250 × 80	130 × 230 × 150
6	Масса, кг	18,7	38,5

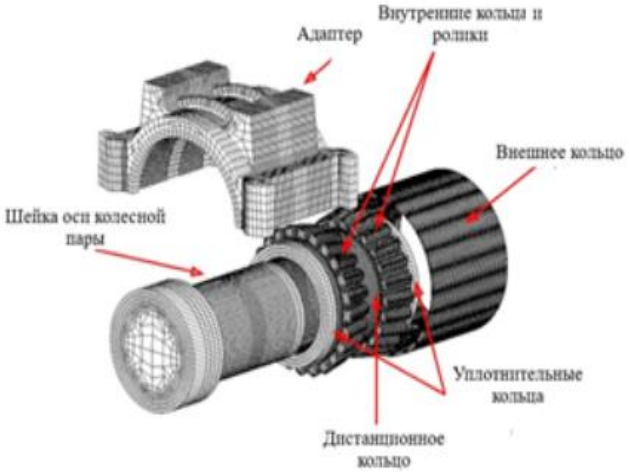


Рис. 3. Конструктивное исполнение адаптерного буксового узла

Рис. 4. Конструктивное исполнение адаптеров разными производителями

Ключевым достоинством рассмотренной адаптерной схемы буксового узла является возможность установки упругого элемента без доработки боковой рамы (см. рис. 5, 6). Согласно данным [5–8], такая модернизация способствует: созданию упругой связи в системе «боковая рама – колесная пара»; уменьшению износа сопряженных поверхностей; снижению динамических нагрузок, действующих на боковые рамы в процессе эксплуатации.

Наличие упругого элемента между колесными парами и боковыми рамами дает возможность повышения скорости вагона и уменьшает воздействие на путь, что было доказано в работах [3, 4], но на данный момент еще есть вопросы по конструктивной реализации этого.

В работах [3 – 8] проводились исследования конструктивного исполнения такого подвешивания тележек, а также уделялось особое внимание динамическим характеристикам грузового вагона, но недостаточно изучены силы взаимодействия колеса и рельса, что является определяющим в трибосистеме «колесо – рельс», а для определения сил их взаимодействия необходимо рассмотреть колебания.

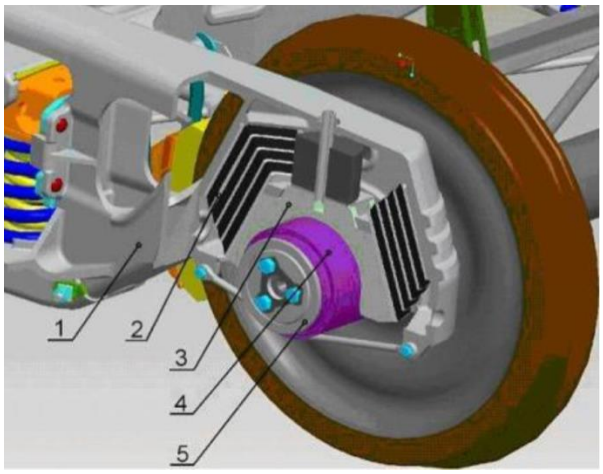


Рис. 5. Адаптерный буксовый узел:
1 – боковая рама; *2* – резинометаллические элементы; *3* – адаптер; *4* – подшипник; *5* – колесная пара

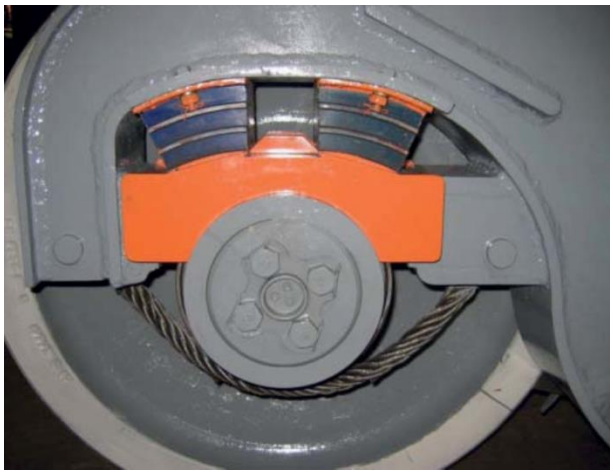


Рис. 6. Первая ступень подвешивания тележки модели 18-9750 в виде полиуретано-металлических амортизаторов

Результаты и обсуждения.

Движение подвижного состава по рельсовому пути сопровождается колебаниями, которые по своей природе являются случайными процессами. Детерминированное описание таких возмущений невозможно, поэтому для их анализа применяется математический аппарат случайных функций, а именно – их статистические характеристики, представляющие собой неслучайные величины и функции. В случае стационарности процесса ключевую роль играют корреляционная функция и спектральная плотность, позволяющие оценить частотный состав колебаний [9].

Несмотря на значительный объем теоретических и экспериментальных исследований, выполненных российскими и зарубежными учеными, в данной предметной области сохраняется проблема отсутствия единой математической модели. Попытки представить экспериментальные данные в виде аналитических выражений до сих пор не привели к созданию универсального решения. Основная сложность заключается в существенном различии условий проведения экспериментов и методов регистрации данных, что вносит неоднородность в исходный материал для моделирования.

В связи с вышесказанным, при вычислении спектральной плотности внешнего возмущения (рис. 7) целесообразно применение апробированной математической модели, разработанной профессором А. Н. Савоськиным и получившей подтверждение в работах [10, 11]:

$$S_{\ddot{z}}(\omega,V)=\frac{S_\eta^2}{2\sqrt{\pi}}\sum_{i=1}^{n}\frac{a_i}{c_iV}\left\{\exp\left[-\frac{(\omega-b_iV)^2}{4c_i^2V^2}\right]+\exp\left[-\frac{(\omega+b_iV)^2}{4c_i^2V^2}\right]\right\}, \quad (1)$$

где S_η^2 – дисперсия эквивалентной геометрической неровности; a_i – доля дисперсии случайного процесса, приходящаяся на *i*-й максимум спектральной плотности; c_i – половина ширины *i*-го максимума на половине его высоты; b_i – частота *i*-го максимума функции спектральной плотности; V – скорость движения, м/с; i = 1, 2,…n – количество одновершинных составляющих функции спектральной плотности (n = 4); ω – частота.

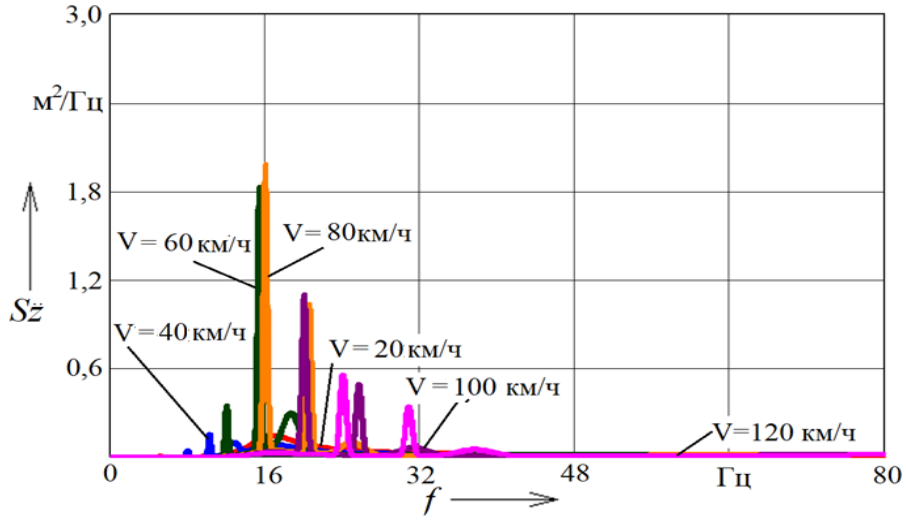


Рис. 7. Вид функции спектральной плотности для эквивалентной геометрической неровности

На основании формулы А. Н. Савоськина (1) средствами MathCAD получены графические зависимости, отражающие изменение спектральной плотности эквивалентной геометрической неровности. Исходными данными для расчета послужили: летний период эксплуатации, нормативное состояние рельсовой колеи и варьирование скорости в интервале 20–120 км/ч. Результаты моделирования приведены на рисунке 7.

Для изучения вертикальных колебаний грузовых вагонов в расчетной модели (рис. 8) необходимо принять ряд допущений:

1. Дискретизация элементов. Кузов, боковые рамы тележек и колесные пары рассматриваются как абсолютно твердые тела. Данное допущение обосновано тем, что жесткость указанных элементов на порядок превышает жесткость упругих связей, входящих в систему подвешивания.

2. **Характеристики рессорного подвешивания.** В качестве упругих элементов центральной ступени применяются цилиндрические пружины, отличающиеся по высоте. Такое конструктивное решение обеспечивает билинейную силовую характеристику, адаптирующую работу подвешивания к груженому и порожнему режимам движения.

3. **Упругие элементы буксовой ступени.** Функцию упругодиссипативных связей в буксовой ступени выполняют полиуретано-металлические либо резинометаллические амортизаторы, которые моделируются с учетом как упругих, так и демпфирующих свойств.

4. **Демпфирование в системе.** В рессорном подвешивании используются демпферы сухого трения, обладающие нелинейными характеристиками. Для линеаризации последних применяется метод энергетического баланса, согласно которому вводится эквивалентное вязкое трение. Его величина определяется из условия равенства работ, совершаемых реальным демпфером и эквивалентным вязким элементом за период колебаний.

5. **Кинематические условия.** Движение колесных пар принимается безотрывным. Для составления дифференциальных уравнений движения используется формализм Лагранжа второго рода либо принцип Даламбера.

6. **Моделирование пути.** Рельсовое основание представлено в виде приведенной массы, связанной с основанием упругими и диссипативными элементами. Погрешность такого подхода, согласно [12], не превышает 12 %.

7. **Гипотеза малых колебаний.** Рассматриваются малые отклонения системы от положения равновесия, что позволяет линеаризовать уравнения движения.

8. **Характер внешнего воздействия.** Возмущения, действующие на экипаж со стороны пути, приняты случайными, что соответствует реальным условиям эксплуатации.

В рамках настоящего исследования вертикальная динамика и усилия в контакте колеса с рельсом изучались с использованием расчетной схемы одноосного экипажа [13].

Данная модель позволяет свести сложную пространственную систему к упрощенному аналогу без ущерба для точности сравнительных оценок.

Основная идея метода состоит в изменении характеристик упругодиссипативного соединения между боковой рамой и колесной парой. Благодаря этому обеспечивается возможность моделирования:

– вагона с типовым буксовым узлом, реализующего одноступенчатую схему подвешивания;

– вагона с адаптерным узлом, где наличие упругого элемента над адаптером создает дополнительную (вторую) ступень подвешивания.

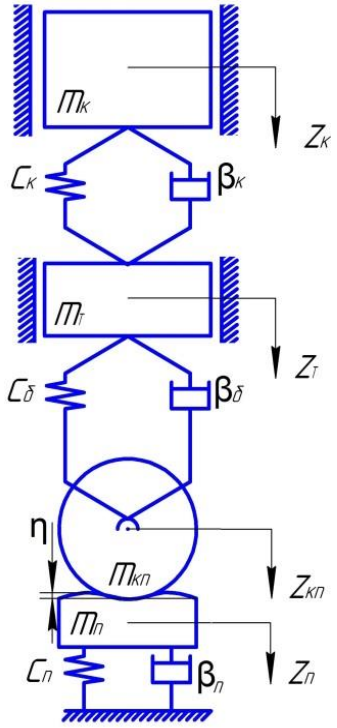


Рис. 8. Расчетная схема условного одноосного экипажа

Моделирование груженого и порожнего режимов движения осуществляется путем варьирования массы кузова и жесткости упругого элемента центральной ступени, которые выступают в качестве ключевых регулируемых параметров системы. Отличительной особенностью предлагаемого подхода является редуцирование всех характеристик экипажной части и рельсового пути к одной колесной паре в соответствии с принятой расчетной схемой, что позволяет рассматривать модель как частный случай плоской задачи динамики. При этом воздействие со стороны пути может задаваться либо как локальное (сосредоточенное в точке контакта), либо как синхронное, то есть одинаковое для всех колесных пар экипажа.

Исходные данные для расчета, включая обозначения параметров и обобщенные координаты, представлены на рис. 9.: $z_к$ – вертикальное перемещение кузова; $z_т$ – вертикальное перемещение боковой рамы; $z_{к.п}$ – вертикальные колебания колесной пары; $z_п$ – вертикальные колебания участка пути, приведенного к колесной паре; η – случайная функция неровности рельса под колесной парой; $m_к$ – масса кузова; $m_т$ – масса боковой рамы; $m_{к.п}$ – масса колесной пары; $m_п$ – приведенная масса пути; $c_к$ – жесткость центральной ступени подвешивания; $c_б$ – жесткость буксовой ступени подвешивания; $c_п$ – приведенная жесткость пути; $\beta_к$ – коэффициент вязкого трения центральной ступени подвешивания; $\beta_б$ – коэффициент вязкого трения буксовой ступени подвешивания; $\beta_п$ – приведенный коэффициент вязкого трения пути.

Применение принципа Даламбера позволило составить систему дифференциальных уравнений, определяющих динамику кузова, боковой рамы и колесной пары:

$$\begin{cases} m_{\text{к}}\ddot{z}_{\text{к}} + \beta_{\text{к}}(\dot{z}_{\text{к}} - \dot{\tilde{z}}_{\text{т}}) + c_{\text{к}}(z_{\text{к}} - \tilde{z}_{\text{т}}) = 0; \\ m_{\text{т}}\ddot{\tilde{z}}_{\text{т}} + \beta_{\text{к}}(\dot{\tilde{z}}_{\text{т}} - \dot{z}_{\text{к}}) + \beta_{\text{б}}(\dot{\tilde{z}}_{\text{т}} - \dot{\tilde{z}}_{\text{к.п}}) + c_{\text{к}}(\tilde{z}_{\text{т}} - z_{\text{к}}) + c_{\text{б}}(\tilde{z}_{\text{т}} - \tilde{z}_{\text{к.п}}) = 0; \\ (m_{\text{кп}} + m_{\text{п}})\ddot{\tilde{z}}_{\text{к.п}} + \beta_{\text{б}}(\dot{\tilde{z}}_{\text{к.п}} - \dot{z}_{\text{т}}) + \beta_{\text{п}}\dot{\tilde{z}}_{\text{к.п}} + c_{\text{б}}(\tilde{z}_{\text{к.п}} - z_{\text{т}}) + c_{\text{п}}\tilde{z}_{\text{к.п}} = m_{\text{п}}\sum_{j=1}^{4}\ddot{\eta}_j + \beta_{\text{п}}\sum_{j=1}^{4}\dot{\eta}_j + c_{\text{п}}\sum_{j=1}^{4}\eta_j. \end{cases} \quad (2)$$

Ввиду стохастической природы возмущений, действующих на подвижной состав, решение системы уравнений (2) переносится в частотную область посредством перехода к передаточным функциям. Указанный переход реализуется через преобразование Лапласа исходных дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} (m_{\text{к}}s^2 + \beta_{\text{к}}s + c_{\text{к}})Z_{\text{к}}(s) - (\beta_{\text{к}}s + c_{\text{к}})Z_{\text{т}}(s) = 0; \\ (m_{\text{т}}s^2 + (\beta_{\text{к}} + \beta_{\text{б}})s + (c_{\text{к}} + c_{\text{б}}))Z_{\text{т}}(s) - (\beta_{\text{к}}s + c_{\text{к}})Z_{\text{к}}(s) - (\beta_{\text{б}}s + c_{\text{б}})Z_{\text{к.п}}(s) = 0; \\ ((m_{\text{к.п}} + m_{\text{п}})s^2 + (\beta_{\text{п}} + \beta_{\text{б}})s + c_{\text{б}} + c_{\text{п}})Z_{\text{к.п}}(s) - (\beta_{\text{б}}s + c_{\text{б}})Z_{\text{т}}(s) = (m_{\text{п}}s^2 + \beta_{\text{п}}s + c_{\text{п}})H(s), \end{cases} \quad (3)$$

где s – оператор передаточной функции в преобразовании Лапласа.

Решение системы уравнений (3) осуществляется методом Крамера, для чего формируется вектор неизвестных обобщенных координат рассматриваемой системы (3):

$$\vec{Z}(s) = \begin{pmatrix} Z_{\text{к}}(s) \\ Z_{\text{т}}(s) \\ Z_{\text{к.п}}(s) \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Таким образом, становятся доступными для оценки спектральные плотности и среднеквадратические отклонения обобщенных координат системы «экипаж — путь» при известной спектральной характеристике входного воздействия:

$$\begin{cases} S_{Z_{\text{к}}}(\omega) = \left|W_{Z_{\text{к}}}(j\omega)\right|^2 S_{\eta}(\omega); \\ S_{Z_{\text{т}}}(\omega) = \left|W_{Z_{\text{т}}}(j\omega)\right|^2 S_{\eta}(\omega); \\ S_{Z_{\text{к.п}}}(\omega) = \left|W_{Z_{\text{к.п}}}(j\omega)\right|^2 S_{\eta}(\omega). \end{cases} \quad (5)$$

Особого внимания при исследовании заслуживают ускорения подпрыгивания кузова, боковой рамы и колесных пар, выступающие индикаторами интенсивности динамических сил, воспринимаемых узлами вагона:

$$\begin{cases} S_{\ddot{Z}_{\text{к}}}(\omega) = \left|W_{Z_{\text{к}}}(j\omega)\right|^2 S_{\eta}(\omega)\cdot\omega^4; \\ S_{\ddot{Z}_{\text{т}}}(\omega) = \left|W_{Z_{\text{т}}}(j\omega)\right|^2 S_{\eta}(\omega)\cdot\omega^4; \\ S_{\ddot{Z}_{\text{к.п}}}(\omega) = \left|W_{Z_{\text{к.п}}}(j\omega)\right|^2 S_{\eta}(\omega)\cdot\omega^4. \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \sigma_{\ddot{Z}_{\text{к}}} = \sqrt{2\int_0^{\infty} S_{\ddot{Z}_{\text{к}}}(\omega)d\omega}; \\ \sigma_{\ddot{Z}_{\text{т}}} = \sqrt{2\int_0^{\infty} S_{\ddot{Z}_{\text{т}}}(\omega)d\omega}; \\ \sigma_{\ddot{Z}_{\text{к.п}}} = \sqrt{2\int_0^{\infty} S_{\ddot{Z}_{\text{к.п}}}(\omega)d\omega}. \end{cases} \quad (7)$$

Вычисления по полученным аналитическим зависимостям проведены для условий летнего периода эксплуатации, нормативного состояния рельсовой колеи и двух вариантов исполнения ходовых частей грузового вагона – с типовым и адаптерным буксовыми узлами.

Результаты расчетов, представленные в графическом виде на рис. 9–14, иллюстрируют основные динамические зависимости.

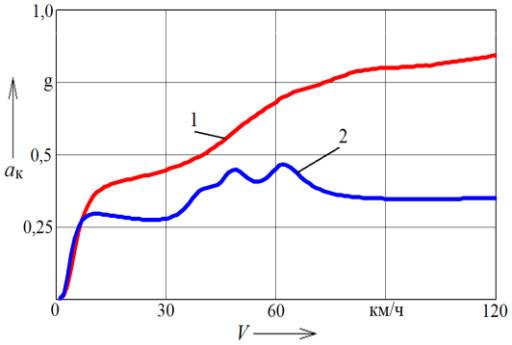


Рис. 9. Виброускорения кузова грузового вагона (груженый режим):
1 – с типовым буксовым узлом;
2 – с адаптерным буксовым узлом

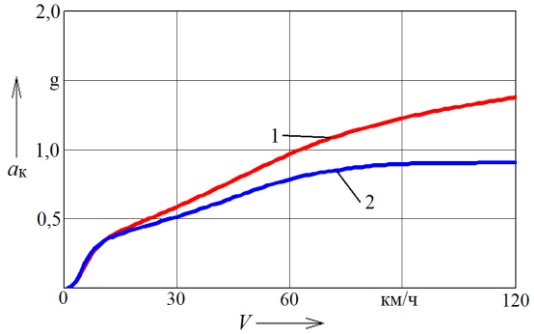


Рис. 10. Виброускорения кузова грузового вагона (порожний режим):
1 – с типовым буксовым узлом;
2 – с адаптерным буксовым узлом

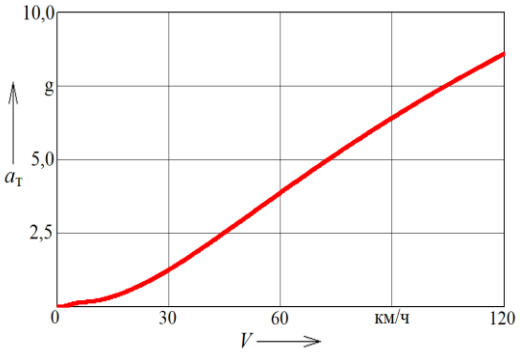


Рис. 11. Виброускорения боковой рамы грузового вагона (груженый режим)

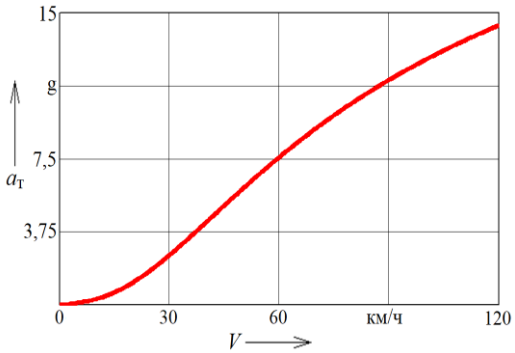


Рис. 12. Виброускорения боковой рамы грузового вагона (порожний режим)

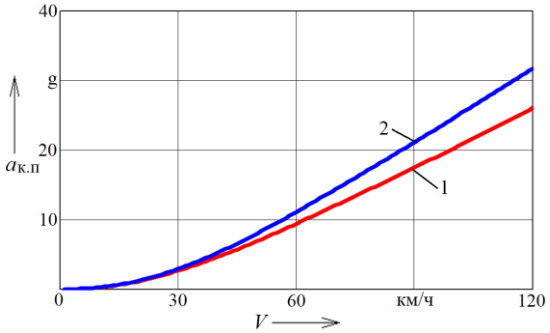


Рис. 13. Виброускорения колесной пары грузового вагона (груженый режим):
1 – с типовым буксовым узлом;
2 – с адаптерным буксовым узлом

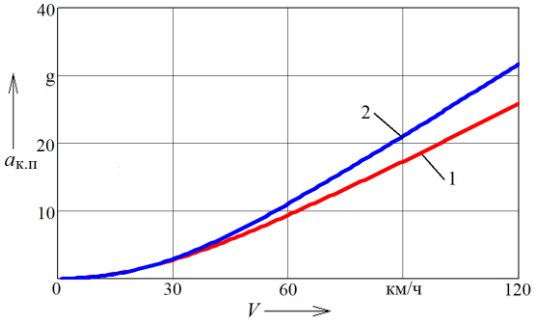


Рис. 14. Виброускорения колесной пары грузового вагона (порожний режим):
1 – с типовым буксовым узлом;
2 – с адаптерным буксовым узлом

Графическая интерпретация расчетных данных представлена на рис. 16 и 17.

Для оценки достоверности разработанной модели проведено сравнение теоретических результатов с экспериментальными данными, полученными в ходе ходовых динамико-прочностных испытаний. Испытания охватывали четыре опытных грузовых вагона, вагон-цистерну на тележках с кассетными подшипниками и вагон-эталон на тележках по ГОСТ 9246–2013 (тип 2) в составе поезда на маршруте Татарск – Хабаровск – Татарск (ОАО «НИКТИ», [16]). Сопоставление подтвердило адекватность предложенной модели реальным колебательным процессам.

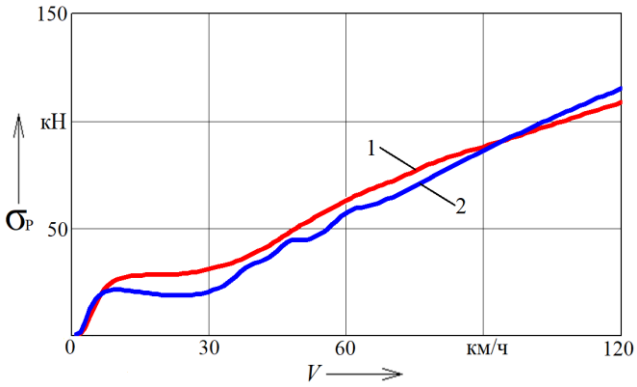


Рисунок 15 – Среднеквадратическое отклонение динамической добавки давления колеса на рельс (груженый режим):
1 – с типовым буксовым узлом;
2 – с адаптерным буксовым узлом

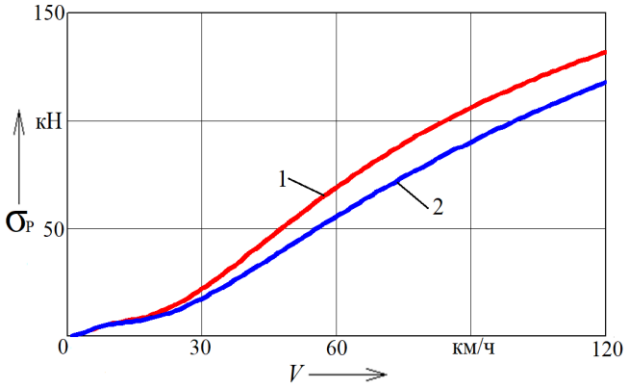


Рисунок 16 – Среднеквадратическое отклонение динамической добавки давления колеса на рельс (порожний режим):
1 – с типовым буксовым узлом;
2 – с адаптерным буксовым узлом

Выводы.

Результаты численного моделирования и последующего анализа позволяют констатировать ряд значимых преимуществ адаптерного буксового узла перед типовым:

1. Повышение плавности хода груженого вагона. На скоростях выше 60 км/ч адаптерная конструкция демонстрирует снижение виброускорений кузова, что не только открывает перспективу увеличения эксплуатационных скоростей, но и положительно сказывается на сохранности грузов.

2. Разгрузка несущих элементов тележки. Уменьшение вертикальных колебаний в груженом режиме приводит к снижению нагрузок, воспринимаемых боковыми рамами, что повышает их долговечность и надежность подвижного состава в целом.

3. Профилактика дефектов колес. В порожнем режиме адаптерный узел способствует снижению динамической компоненты контактных сил в паре «колесо – рельс». Это уменьшает локальные напряжения в зоне контакта и снижает вероятность возникновения выщербин – одного из наиболее распространенных дефектов поверхности катания.

Литература:

1. Быков, Б. В. Конструкция механической части вагонов / Б. В. Быков, В. Ф. Куликов. – Москва : Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2016. – 247 с. – Текст : непосредственный.

2. Морчеладзе, И. Г. Совершенствование и модернизация буксовых узлов грузовых вагонов / И. Г. Морчеладзе, А. М. Соколов. – Текст : непосредственный // Железные дороги мира. – 2006. – № 10 – С. 59–64.

3. Выбор конструкции первой ступени подвешивания трехэлементных тележек инновационных грузовых вагонов / М. А. Орлова, Е. А. Рудакова, И. В. Турутин, А. В. Саидова. – Текст : непосредственный // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2011. – № 3. – С. 88–99.

4. Создание тележки с самоцентрирующимися колесными парами на базе трехэлементной рамы / Ю. П. Бороненко, В. М. Бубнов, А. М. Орлова, Е. А. Рудакова. – Текст : непосредственный // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты : сб. науч. статей. – Санкт-Петербург : Петербургский государственный университет путей сообщения, 2005. – С. 27–32.

5. Тележка для грузовых вагонов нового поколения с повышенными осевыми нагрузками / В. П. Ефимов, А. А. Пранов, А. Н. Баранов, К. А. Белоусов. – Текст : непосредственный // Железнодорожный транспорт. – 2009. – № 6. – С. 58–61.

6. Бороненко, Ю. П. Тележки с повышенной осевой нагрузкой / Ю. П. Бороненко, А. М. Орлова. – Текст : непосредственный // Железнодорожный транспорт. – 2008. – № 10. – С. 50–53.

7. Коссов, В. С. Тележка с осевой нагрузкой 25 тс для грузового вагона нового поколения / В. С. Коссов, В. А. Чаркин, Л. К. Добрынин. – Текст : непосредственный // Железнодорожный транспорт. – 2008. – № 7. – С. 55–58.

8. Ефимов, В. П. Исследование влияния упругой вставки адаптера на усталостную прочность боковой рамы тележки модели 18-194-1 / В. П. Ефимов, А. Н. Баранов, С. М. Буторин. – Текст : непосредственный // Транспорт Российской Федерации. – 2015. – № 3 (58). – С. 75–77.

9. Галиев, И. И. Научные направления школы М. П. Пахомова за 50 лет (1961 – 2011) / И. И. Галиев, В. А. Нехаев, В. А. Николаев. – Омск : Омский государственный университет путей сообщения, 2012. – 175 с. – Текст : непосредственный.

10. Бирюкова, И. В. Механическая часть тягового подвижного состава / И. В. Бирюкова. – Москва : Транспорт, 1992. – 440 с. – Текст : непосредственный.

11. Трофимович, В. В. Основы механики подвижного состава / В. В. Трофимович. – Хабаровск : Дальневосточный государственный университет путей сообщения, 2018. – 116 с. – Текст : непосредственный.

12. Камаев, В. А. Оптимизация параметров ходовых частей железнодорожного подвижного состава / В. А. Камаев. – Москва : Машиностроение, 1980. – 215 с. – Текст : непосредственный.

13. Вершинский, С. В. Динамика вагона / С. В. Вершинский, В. Н. Данилов, И. И. Челно-ков. – Москва : Транспорт, 1978. – 360 с. – Текст : непосредственный.

14. Ахмадеева, А. А. Рациональное задание числа степеней свободы динамической модели грузового вагона / А. А. Ахмадеева, В. Е. Гозбенко. – Текст : непосредственный // Системы. Методы. Технологии. – 2012. – № 4. – С. 25–28.

15. Хохлов, А. А. Динамика сложных механических систем / А. А. Хохлов. – Москва : Российский университет транспорта, 2002. – 172 с. – Текст : непосредственный.

16. ИЦПОДП 892. Испытания вагонов на тележках по ГОСТ 9246–2013, тип 2, оборудованных подшипниками кассетного типа с адаптерами. Программа испытаний. – Москва : АО «ВНИКТИ», 2019. – 36 с. – Текст : непосредственный.

The influence of adaptive axle box systems on the dynamic characteristics of freight wagons

Petrakova A. G. [1, a],. Minzhasarov M. Kh. [2,b]

[1]Omsk State Transport University (OSTU), 35, Marx av., Omsk, 644046, the Russian Federation

[2]Omsk State Technical University (OmSTU), 11, Mira av., Omsk, 644050, the Russian Federation

[a]petra-anna@yandex.ru, [b] mmx90@yandex.ru

Keywords: freight cars, solid-rolled wheels, axle box modernization, adapter systems, cassette bearings, dynamics of the "car-track" system, body vibration acceleration, stress-strain state, mathematical model of vibrations, and comparative assessment of structures.

The article examines the reasons for the uncoupling of freight wagon wheelsets in 2024. Among the main causes of failures are defects on the rolling surface of the solid–rolled wheel. One of the most common defects is wear and tear, as a natural result of use. They are trying to change the current situation by modernizing the axle box of the wheelset, using two types: adaptive and standard. The use of an adaptive design in the axle box allows you to reduce wear, reduce the impact on the track and increase the speed of the train. At the moment, the road network uses both a standard axle box and several types of axle box adapters, the effect of which on fluctuations in the wagon-track system requires study, for which a system of differential equations based on the Calamber principle was formed. The solution of this system, taking into account the omissions made it possible to prove the advantages of adaptive

УДК 624.132.3

Виброраскатчик для бестраншейной прокладки инженерных коммуникаций в несвязных и малосвязных грунтах

Доценко А.И.[1,a], Большаков И.Д.[1,b,c]
[1]Московский автомобильно-дорожный государственный технический, университет Ленинградский пр-т., 64, Москва, Россия
[a]dotsenko_ant@mail.ru, [b]200171@student.madi.ru, [c]indrig2997@gmail.com

Ключевые слова: метод раскатки, виброраскатчик, бестраншейные технологии, глубинные вибраторы, модель виброраскатчика, компьютерное моделирование

В МАДИ (ГТУ) на кафедре Дорожно-строительных машин выполнена работа, связанная с разработкой нового рабочего органа для бестраншейной прокладки инженерных коммуникаций в несвязных и малосвязных грунтах под названием виброраскатчик. Исследование эксплуатационных свойств опытных образцов обычных раскатчиков грунтов показало, что область их рационального применение ограничена связными и средней связности грунтами. Использование виброраскатчика позволяет осуществить формирование скважины в результате сложного динамического воздействия, включающего в себя раскатывание с наложением виброколебаний, что является положительным фактором при уплотнении несвязных и малосвязных грунтов. Для изучения динамики процесса бестраншейной прокладки инженерных коммуникаций с помощью виброраскатчика была разработана и проанализирована с помощью компьютера соответствующая модель. В статье представлены результаты этих исследований.

Введение.

Во многих странах мира прокладка инженерных коммуникаций в городах открытым способом, то есть рытьем траншей, запрещена, дабы не разрушать покрытия автомобильных дорог, не мешать движению транспорта и не создавать неудобства пассажирам.

Для бестраншейной прокладки скважин в грунтах в настоящее время в нашей стране используются установки горизонтального бурения (УГБ), оборудование для вибропрокола и пневматические пробойники. Указанное оборудование, наряду с положительными качествами, имеют и ряд недостатков. В частности, в установках УГБ процесс разработки скважин связан с одновременным извлечением грунта из последней, что в значительной степени повышает энергоемкость процесса. Что касается оборудования для вибропрокола и пневмопробойников, то область их рационального применения ограничена: из-за вибродинамических и ударных воздействий их не рекомендуется применять в городских условиях вблизи исторических зданий, памятников и подземных сооружений.

В 70-х годах прошлого столетия в Институте горного дела СО АН СССР был предложен новый тип машин для бестраншейной прокладки инженерных коммуникаций [1,6], которую назвали раскатчик (Рис.1). Усовершенствованный рабочий орган под названием виброраскатчик разработан в МАДИ(ГТУ) на кафедре дорожно-строительных машин и расширяет область рационального применения этого класса машин.

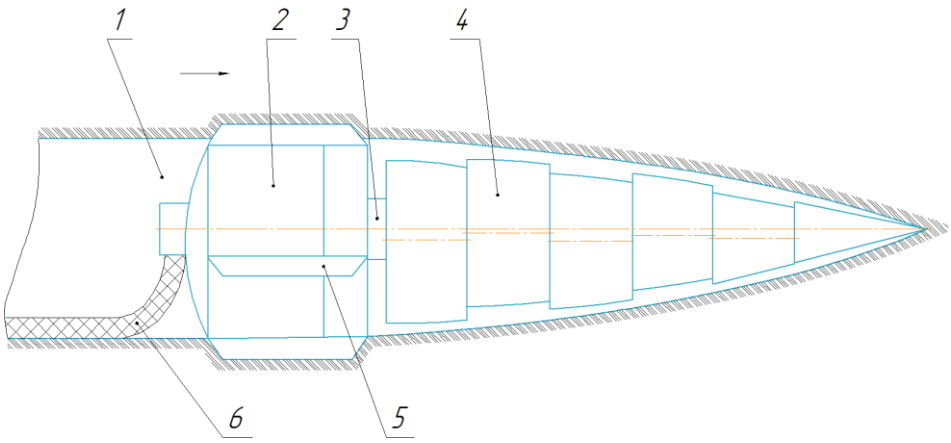


Рис. 1. Раскатчик скважин

1 – скважина; 2 – привод (электрический или гидравлический); 3 – эксцентриковый вал; 4 – вращающиеся конические катки; 5 – ребра для восприятия реактивного крутящего момента от вращения рабочего органа; 6 – электрокабель или гидрошланг

Анализ результатов предшествующих исследований.

Раскатка скважин – это процесс образования цилиндрической полости в грунте путем его уплотнения раскатывающим рабочим органом, представляющим собой ряд установленных друг за другом на валу конических металлических катков, оси которых смещены и развернуты относительно центральной геометрической оси вала таким образом, что при его вращении катки катятся по винтовой линии и рабочий орган ввинчивается в грунт, образуя скважину.

С одной стороны, раскатка в отличие от ударного или вибрационного способа воздействия на грунт, является процессом непрерывным; с другой – поскольку каток, кроме вращательного движения совершает поступательное, а также из-за значительной ширины катка, несоизмеримо большей, чем величина подачи рабочего органа, режим приложения нагрузки со стороны катка на стенку забоя скважины является цикличным со следующими друг за другом процессами нагрузки и разгрузки участков грунта. Здесь деформация грунта происходит не по всему периметру скважины одновременно, как при проколе или пробивании, на что затрачивается относительно много энергии, а на сравнительно ограниченной полосе по образующей конуса.

Ранее выполненными научными работами по раскатчикам [3,4,5] была установлена для них взаимосвязь между основными параметрами. В частности, для шестикаткового раскатчика массой 290 кг, работающего при постоянной скорости подачи 100 мм/мин и постоянной частоте вращения 190 об/мин. В таблице 1 представлены значения осевого усилия подачи рабочего органа и крутящего момента в зависимости от эксцентриситета наибольшего рабочего катка диаметром 300 мм.

Недостатком представленного раскатчика является то, что областью его рационального применения являются связные и средней связности грунты. Что касается несвязных и малосвязных грунтов, то после проходки раскатчика имеет место обрушение стенки скважины.

Таблица 1

Результаты экспериментальных исследований шестикаткового раскатчика

Значение эксцентриситета, $r_{р;}$ мм	Осевое усилие подачи(Q), кН	Крутящий момент, М; Нм	Качество стенки скважины
20	При Q=50 кН подача отсутствовала	120	-
40	34,7	230	Хорошее
50	27,3	280	Хорошее
70	24	Двигатель остановился	-

Теория.

С целью дальнейшего совершенствования конструкции раскатчиков и расширения области их рационального применения д.тн. Доценко А.И. и инженером Бобылевым А.Л. была предложена конструкция раскатчика, у которого центральный несущий вал делается полым [3,6] и внутри его может быть установлен инерционный вибратор кругового действия (Рис 2). В этом случае формирования скважины по своей сути будет являться результатом сложного динамического воздействия, включающего в себя раскатывание с наложением виброколебаний. Последнее, как известно, является положительным фактором при уплотнении несвязных и малосвязанных грунтов [1]. В этом случае рабочий процесс виброраскатчика можно рассматривать с учётом результатов исследований по глубинным виброуплотнителям [5]. В частности, к параметрам нашего виброраскатчика близок глубинный виброуплотнитель В-53, массой 335кг, с частотой колебаний 24 гц и статическим моментом сменных дебалансов 150 ÷ 300 Нсм.

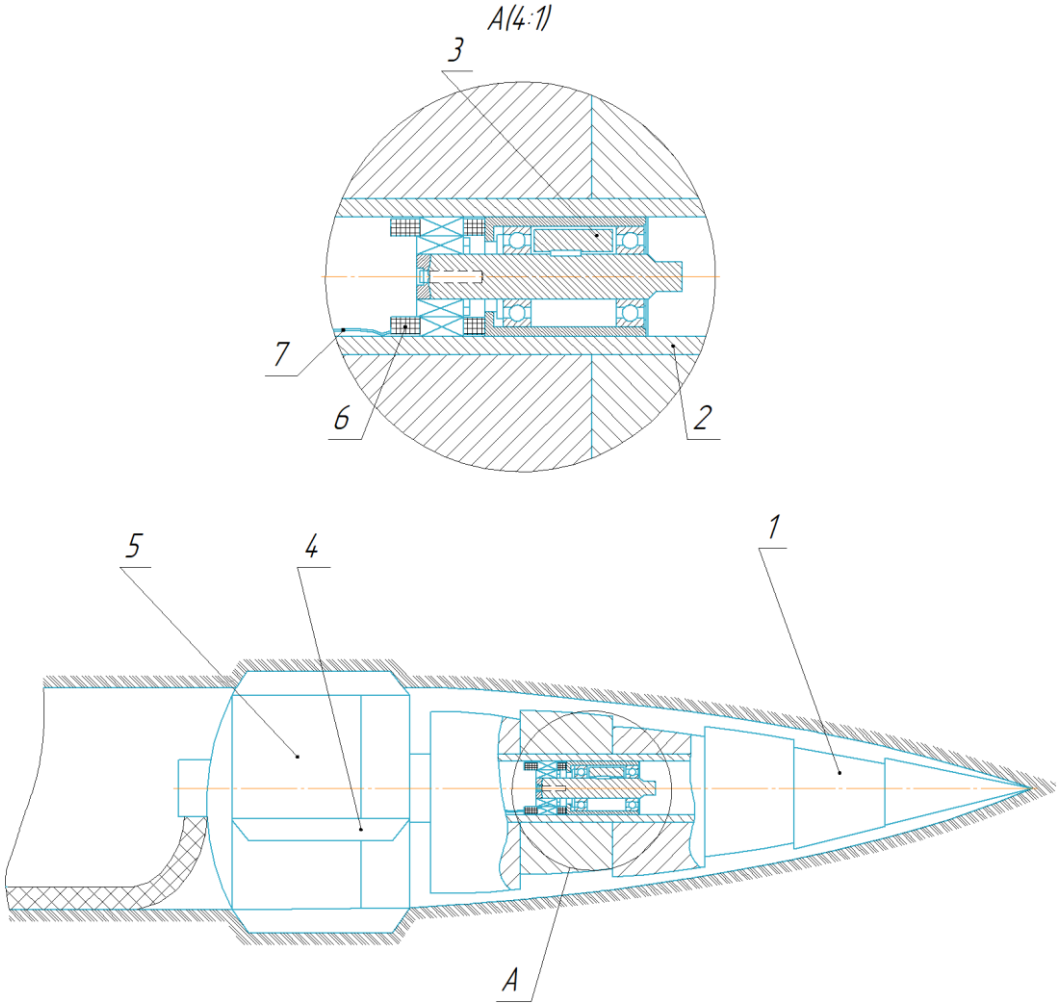


Рис.2. Виброраскатчик скважин:
1 – вращающиеся конические катки; 2 – полый вал; 3 – дебаланс; 4 – ребра стабилизации положения двигателя; 5 – привод раскатчика; 6 – электропривод вибратора; 7 – кабель подключения электропривода

Эффективность работы глубинных вибраторов в уплотняемом грунте зависит от свойств грунта и основных параметров вибратора, в частности, от величины вынуждающей силы, а также от частоты и амплитуды колебаний. При построении модели в виде мгновенных состояний колеблющейся системы, все связи заменяются действующими силами, а геометрия их взаимодействия указана на схеме. Это необходимо для отражения физической сути силовых взаимодействий и для определения параметров, влияющих на

динамический процесс уплотнения. На рис. 3 представлена расчетная модель виброраскатчика с уплотняемым грунтом.

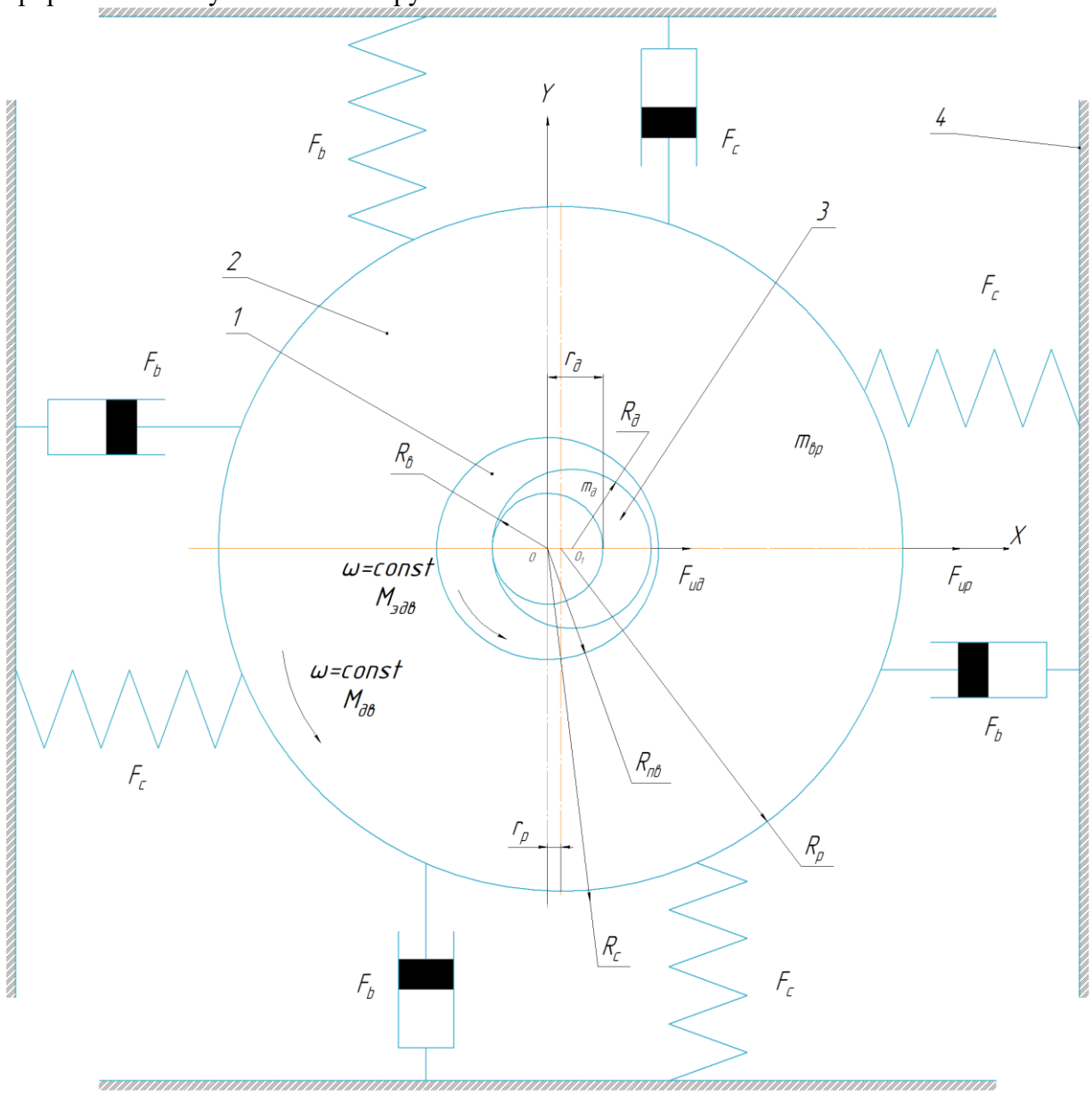


Рис.3. Расчетная модель виброраскатчика
1 – центральный полый несущий вал; 2 – наибольший вращающийся каток раскатчика;
3 – инерционный вибратор кругового действия со встроенным электродвигателем;
4 – уплотняемый грунт скважины

Модель включает в себя два основных силовых элемента: рабочий орган (раскатчик) и встроенный дебалансный вибровозбудитель. Раскатчик представляет собой полую трубу с внешним радиусом $R_р$ и массой $m_{вр}$, приводимую во вращение гидравлическим двигателем с моментом $M_{дв}$. На раскатчике установлены катки с эксцентриситетом $r_р$, что обеспечивает формирование скважины с расчетным радиусом $R_с$. Внутри полости раскатчика размещен дебалансный вибровозбудитель с массой $m_д$, эксцентриситетом r_d и радиусом $R_д$, который приводится в работу специальным электродвигателем с моментом $M_{эдв}$. Динамическое воздействие системы на грунт описывается суммарной силой ΣF, представляющей собой векторную сумму раскатывающих сил от раскатчика $F_{ир}$ и дебалансного возбудителя $F_{ид}$. Данная модель позволяет анализировать процесс образования скважины под действием комбинированного силового воздействия.

При вращении дебаланса с постоянной угловой скоростью он будет двигаться вокруг полюса равновесного динамического состояния (точка О). Силы инерции дебаланса и технологических частей рабочего органа действует против сил сопротивления грунта. Для описания установившегося режима движения механической системы использован метод Даламбера, который гласит: при движении механической системы активная сила и реакции связей вместе с силой инерции составляют равновесную систему сил для каждой точки системы. Этот метод выбран потому, что при непосредственном его применении к задачам динамики, уравнения движения системы составляются по форме хорошо известных уравнений равновесия; это делает единообразным подход к решению задач и часто упрощает соответствующие решения. Согласно принципу Даламбера, уравнение, описывающее динамическое равновесное состояние системы, в момент нахождения наибольшего катка раскатчика и дебаланса вибратора в направлении координаты X, будет иметь вид:

$$\sum F_x = F_{\text{ир}} + F_{\text{ид}} - F_{\text{с}} - F_{\text{в}} \quad (1)$$

где $F_{\text{ир}} = m_{\text{вр}} r_{\text{р}} \omega_{\text{р}}^2$ – значение раскатывающей силы, создаваемой вращающимся наибольшим катком раскатчика, Н; $F_{\text{ид}} = m_{\text{д}} r_{\text{д}} \omega_{\text{д}}^2$ – значение центробежной силы создаваемой дебалансом вибратора, Н; F_c – упругая сила сопротивления грунта, Н; F_b – вязкая сила сопротивления грунта, Н; $m_{вр}$ – масса всего раскатчика, кг; $r_р$,$r_д$ – эксцентриситет наибольшего катка раскатчика и дебаланса вибратора, мм; $\omega_р$ – угловая скорость наибольшего катка расскатчика, рас/с; $\omega_д$ – угловая скорость наибольшего катка расскатчика, рас/с.

Для достижения требуемого эффекта уплотнения стенок скважины необходимо выполнение следующего условия:

$$m_{\text{р}} r_{\text{р}} \omega_{\text{р}}^2 + m_{\text{д}} r_{\text{д}} \omega_{\text{д}}^2 > F_{\text{с}} + F_b \quad (2)$$

Известно [1], что при уплотнении несвязных и малосвязных грунтов удельное давление рабочего органа q на грунт оптимальной влажности должно составлять для несвязных и малосвязных грунтов 6…20 кН/м^2, а для грунтов средней связности 25…30 кН/м^2. Тогда выше представленную зависимость можно записать в следующем виде:

$$(m_{\text{р}} r_{\text{р}} \omega_{\text{р}}^2 + m_{\text{д}} r_{\text{д}} \omega_{\text{д}}^2) / \sum_{i=1}^{6} S_i \geq q \quad (3)$$

где $\sum_{i=1}^{6} S_i$ – суммарная площадь взаимодействия с грунтом рабочих катков виброраскатчика (для одного катка она составляет ориентировочно 25% от общей торцевой поверхности катка, [4]).

Результаты компьютерного моделирования.

Для проверки теоретических положений, и оценки влияния основных конструктивных и режимных параметров на эффективность процесса уплотнения стенок скважины было выполнено компьютерное моделирование рабочего процесса виброраскатчика одного рабочего катка с вибратором входящих в конструкцию шестикаткового виброраскатчика массой 310кг прокладывающего скважину в несвязном или малосвязном грунтах. При этом в качестве постоянных параметров были установлены:

1. Для раскатчика:

- Масса наибольшего рабочего катка, $m_р$ = 38 кг.
- Угловая скорость вращения наибольшего катка, $\omega_р$ = 20 рад/с
- Суммарная площадь взаимодействия с грунтом рабочих катков, $\sum_{i=1}^{6} S_i$ = 0,83 м^2

2. Для вибратора:

- Угловая скорость вращения дебаланса, $\omega_д$ = 150 рад/с

Переменными параметрами являются:

1. Для раскатчика:

- Эксцентриситет наибольшего катка, $r_р$ = 20; 40; 50 (мм);

2. Для вибратора

- Статический момент дебалансов, $m_д r_д$ = 50; 100; 150; (Нсм).

Подлежит определению:

1. Раскатывающее усилие, оказываемое на грунт наибольшим вращающимся катком, $F_{ир}$(Н)

2. Центробежная сила, создаваемая вибратором, $F_{ид}$ (Н).

3. Суммарное силовое воздействие на грунт виброраскатчика, $\sum F$

Результаты расчётов представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты компьютерного моделирования

Статический момент дебаланса, $m_д r_д$; Нсм	Эксцентриситет катка, $r_р$; мм	Раскатывающее воздействие на грунт от раскатчика, $F_{ир}$; кН	Инерционное воздействие на грунт от вибратора, $F_{ид}$; кН	Суммарное воздействие на грунт, $F_{ир}+F_{ид}$; кН	Расчетное удельное давление на грунт виброраскатчика q; кН/м2
50	20	2,32	11,25	13,57	16,35
50	40	4,64	11,25	15,89	19,14
50	50	5,8	11,25	17,05	20,54
100	20	2,32	22,5	24,82	29,90
100	40	4,64	22,5	27,14	32,70
100	50	5,8	22,5	28,3	34,10
150	20	2,32	33,75	36,07	43,46
150	40	4,64	33,75	38,39	46,25
150	50	5,8	33,75	39,55	47,65

Выводы.

Разработана и исследована с помощью компьютера модель шестикаткового виброраскатчика для прокладки инженерных коммуникаций в несвязных и малосвязных грунтах. Из приведённой выше таблицы 2 видно, что эффективное уплотнение несвязных и малосвязных грунтов возможно при эксцентриситете наибольшего катка виброраскатчика 20, 40 или 50 мм и при статическом моменте дебаланса вибратора 50 Нсм. Уплотнение грунта средней связности виброраскатчиком также может осуществляться при эксцентрисетете катка 20 или 40 мм, но при этом статический момент дебаланса должен быть увеличен до 100Нсм. Таким образом, виброраскатывающий рабочий орган позволяет не только расширить область рационального применения рассмотренного в статье класса машин, но и повысит качество разрабатываемых скважин за счёт синергетического эффекта от совместного действия раскатки грунта с вибрацией.

Литература:

1. Доценко, А. И. Строительные машины: учебник / А.И. Доценко. — 2- е изд., перераб. и доп. — Москва: ИНФРА-М, 2022. — 400 с. — (Высшее образование: Бакалавриат).

2. Nazarenko I. Research of Energy-Saving Vibration Machines with Account of the Stress-Strain State of Technological Environment. Conference materials Proceeding of the IX International Conference HM 2017. Serbia. 2017.pp.21-25.

3. Патент № 2447235 C2 Российская Федерация, МПК E02F 5/18. Раскатчик для устройства набивных свай: № 2010126722/03: заявл. 30.06.2008: опубл. 10.04.2012 / А. Л. Бобылев, А. И. Доценко. – EDN QXFAKB.

4. Бобылев Л.М., Баринов Н.В., Герасименко Н.П. и др. Новое оборудование для уплотнения грунтов в промышленном и гражданском строительстве // Основания, фундаменты и механика грунтов. -1985. -№6. -С.7-9.

5. Елисеев, В. В. Вибрационная установка для уплотнения песчаных грунтов / В. В. Елисеев // Основания, фундаменты и механика грунтов. — М., 1962. — С. 53-116.

6. Доценко, А. И. Пути повышения эффективности оборудования для изготовления буронабивных свай в дорожном строительстве / А. И. Доценко, А. А. Краснов // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2022. – № 1(68). – С. 56-61. – EDN LMGQVF.

Vibrating roller for trenchless laying of engineering communications in incoherent and poorly connected soils

Dotsenko A.I.[1, a], Bolshakov I.D.[2,b,c]
[1]Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Leningradsky Prospekt, 64, Moscow, Russia
[2]Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Leningradsky Prospekt, 64, Moscow, Russia
[a]dotsenko_ant@mail.ru, [b]200171@student.madi.ru, [c]indrig2997@gmail.com

Keywords: rolling method, vibratory roller, trenchless technologies, deep vibrators, vibratory roller model, computer modeling

The Department of Road Construction Machinery at MADI (STU) has developed a new working tool called a vibratory roller for trenchless installation of utility lines in cohesive and slightly cohesive soils. A study of the performance properties of prototype conventional soil rollers showed that their practical application is limited to cohesive and moderately cohesive soils. Using a vibratory roller allows for borehole formation through a complex dynamic action, including rolling with superimposed vibration, which is beneficial for compacting cohesive and slightly cohesive soils. To study the dynamics of trenchless installation of utility lines using a vibratory roller, a corresponding model was developed and used for computer analysis. This article presents the results of this research.

УДК 621.039:625.233

Повышение точности прогнозирования продольной динамики пассажирских вагонов с применением гибридного моделирования и полимерных поглощающих аппаратов

Лукашов Н.А.[1,a], Антипин Д.Я.[1 ,b], Лукашова Е. В.[1 ,c]
[1]Брянский государственный технический университет, г. Брянск, Россия
[a] Lukashov32@gmail.com, [b] Antipindy@yandex.ru, [c] leno4kachepikova@gmail.com;

Ключевые слова: продольная динамика, поглощающий аппарат, полимерный демпфер, конечно-элементный анализ, универсальный механизм, пассажирский вагон, верификация модели.

В данной работе исследуется проблема снижения уровня продольных динамических усилий, передающихся на несущую систему кузова пассажирского вагона через узлы автосцепки. Проведен сравнительный анализ эксплуатационных характеристик традиционных резинометаллических поглощающих аппаратов (в частности, модификации Р-5П) и перспективных полимерных демпфирующих устройств. Выявлены ключевые недостатки классических решений, включая зависимость фрикционных свойств от температурных условий и интенсивный износ трущихся элементов. В качестве альтернативы предложены полимерные аппараты, демонстрирующие стабильность вязкоупругих параметров и повышенную энергоемкость. Основным результатом исследования стала разработка и валидация комбинированной динамической модели вагона, реализованной в программном комплексе «Универсальный механизм». Особенностью подхода является интеграция конечно-элементной модели упругости кузова с многомассовой схемой ходовых частей. Адекватность созданной модели подтверждена

путем сопоставления с данными испытаний проведенными АО НО «ТИВ». Расхождение расчетных и экспериментальных значений по нормальным напряжениям составило не более 12 %, а отклонение характеристик хода поглощающего аппарата варьировалось в диапазоне 1–11 % в зависимости от величины нагружения. Доказано, что предложенная методика позволяет эффективно оптимизировать параметры межвагонного взаимодействия на этапе проектирования, сокращая потребность в дорогостоящих натурных тестах.

Введение.

Обеспечение безаварийности перевозочного процесса и рост уровня комфорта для пассажиров остаются стратегическими приоритетами развития железнодорожной отрасли. Существенное влияние на данные показатели оказывают величины продольных динамических усилий (ПДУ), генерируемых в поездном составе во время тяговых режимов, торможения и маневровых соударений [1, 2]. Интенсивность нагрузки, транслируемой от автосцепного устройства на раму кузова, напрямую зависит от энергопоглощающей способности установленного аппарата (ПА).

Анализ международной практики эксплуатации подвижного состава указывает на распространение интегрированных модулей, сочетающих сцепные и демпфирующие функции (например, автосцепки типа Шарфенберг), где диссипация энергии обеспечивается гидравлическими системами или пластическим деформированием элементов. В отличие от этого, отечественная концепция предусматривает раздельный монтаж автосцепки СА-3 и поглощающего аппарата. Широкое применение в Российской Федерации находят резинометаллические устройства (серии Р-2П, Р-5П), однако их эксплуатация сопряжена с рядом ограничений: старение резиномикса, нестабильность коэффициента трения при изменении климатических условий и накопление остаточных деформаций в течение срока службы [3].

Модернизация энергопоглощающей системы видится во внедрении полимерных аппаратов (например, типа Т-7П). Такие устройства лишены вышеуказанных минусов благодаря сохранению вязкоупругих свойств в широком температурном интервале (от –50 °С до +70 °С) и увеличенной удельной энергоемкости [4, 5]. Однако интеграция новых типов ПА требует точного прогнозирования их динамического поведения в составе поезда, что усложняется нелинейным характером деформирования полимерных материалов под ударными воздействиями.

Целью настоящего исследования является формирование и экспериментальная апробация методики расчета оптимальных параметров силового контура полимерного поглощающего аппарата посредством компьютерного моделирования процессов продольной динамики.

Объект и методы исследования.

Несмотря на развитие новых технологий, аппарат Р-5П продолжает оставаться массовым компонентом системы энергопоглощения пассажирских вагонов парка ОАО «РЖД». Его конструкция представляет собой пакет, состоящий из стальных шайб и резиновых колец, размещенных в металлическом корпусе. Рассеивание кинетической энергии при ударном нагружении происходит благодаря внутреннему трению в резиновых элементах и деформациям сдвига-сжатия. Показатель энергоемкости устройства находится в пределах 28–32 кДж при рабочем ходе 65–70 мм, что соответствует нормативным требованиям для маневровых операций [6].

Для изучения динамических процессов применен комплексный метод, сочетающий численное моделирование и данные натурных экспериментов. Классические аналитические подходы, базирующиеся на системах дифференциальных уравнений для абсолютно твердых тел, зачастую не позволяют учесть податливость кузова и сложные нелинейные свойства демпферов [7]. В связи с этим в работе использовано численное моделирование в среде программном комплексе (ПК) «Универсальный механизм» [8].

Ключевой особенностью предложенной методики является применение гибридной модели вагона. Кузов рассматривается не как твердое тело, а как упругая подсистема, сформированная методом конечных элементов (МКЭ) в модуле UMFEM. Математическое описание опирается на метод подсистем и метод Крейга–Бэмптона, что дает возможность аппроксимировать деформации через собственные формы низкочастотных колебаний [9].

Дискретизация кузова конечно-элементной сеткой включала около 242 тыс. элементов (трех- и четырехузловых) и 139 тыс. узлов. Суммарное количество степеней свободы модели превысило 900 тыс. Для корректного учета массовых характеристик внутреннего оборудования применялись объемные элементы с жесткими связями типа RBE2. Диссипативные свойства материалов моделировались согласно гипотезе Фойгта, где коэффициент демпфирования принят равным 10 % от критического.

Стыковка упругой модели кузова с твердотельными компонентами ходовой части (колесные пары, тележки) и автосцепным оборудованием выполнена через систему кинематических шарниров и контактных пар. Данное решение обеспечивает точную трансляцию усилий в узлах сопряжения (пятники, скользуны, упоры автосцепки).

Результаты исследования и верификация.

Оценка достоверности разработанной конечно-элементной модели производилась через сравнение с результатами испытаний, организованных на базе АО НО «ТИВ». В качестве контрольных параметров использовались нормальные напряжения в наиболее нагруженных сечениях несущей конструкции (шкворневая и хребтовая балки, обвязки) при статическом сжатии усилием 2,5 МН в соответствии с ГОСТ 34681-2020.

Анализ табличных данных демонстрирует, что максимальное расхождение результатов не превышает 12 %, что свидетельствует об адекватности конечно-элементной модели для задач статического расчета прочности.

Второй этап валидации предполагал оценку динамических характеристик сцепки вагонов. Была собрана модель поезда, состоящая из нескольких гибридных вагонов, взаимодействующих через автосцепку с аппаратом Р-5П. Производился расчет зависимости хода поглощающего аппарата от силы соударения. Полученные расчетные кривые сопоставлялись с экспериментальными данными (рис. 1).

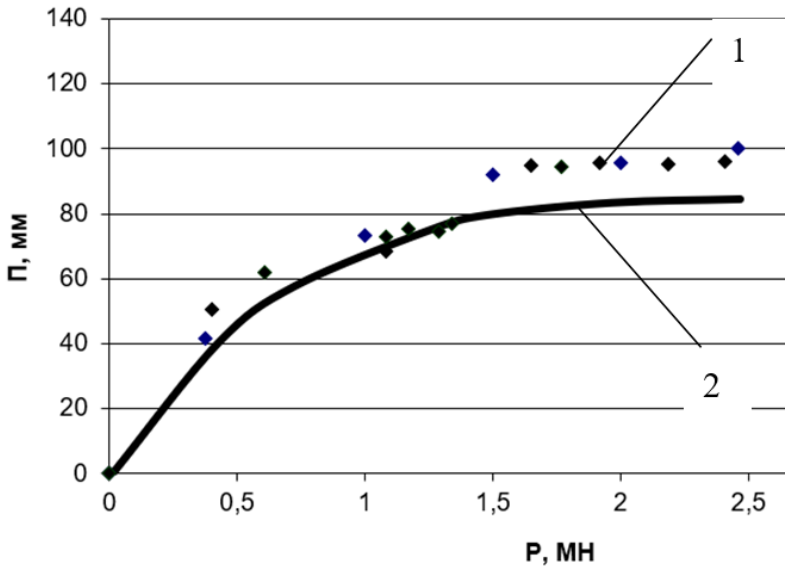


Рис. 1. Графики зависимости хода поглощающего аппарата от силы соударения вагонов:
1 – экспериментальные данные; 2 – расчетные данные

Анализ динамического взаимодействия показал высокую степень сходимости результатов: при нагрузке 1,2 МН расхождение по ходу аппарата составило менее 1 %; при максимальной нагрузке 2,5 МН отклонение достигло 11 %.

Полученные данные подтверждают, что разработанная методика позволяет с высокой точностью прогнозировать поведение поглощающего аппарата в реальных условиях эксплуатации, включая режимы соударения при маневрах.

Заключение.

Выполненное исследование подтверждает эффективность использования гибридного моделирования для решения задач оценки продольной динамики железнодорожного подвижного состава. Традиционные аналитические методы уступают численному моделированию в возможности учета нелинейных свойств материалов и упругости кузова.

Разработанная в ПК «Универсальный механизм» модель, сочетающая МКЭ-описание кузова и твердотельную динамику ходовых частей, прошла успешную верификацию. Погрешность расчетов напряжений не превысила 12 %, а характеристика хода поглощающего аппарата совпала с экспериментом с точностью до 11 % в зависимости от уровня нагрузки.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования данной методики для обоснования параметров новых полимерных поглощающих аппаратов. Это позволит оптимизировать межвагонные связи, снизить динамические нагрузки на кузов и повысить безопасность пассажирских перевозок без необходимости проведения дорогостоящих серийных натурных испытаний на ранних этапах проектирования.

Литература:

1. Гребенюк П. Т., Мугинштейн Л. А., Савельев В. В. Продольная динамика поезда. М.: ВНИИЖТ, 2003. 96 с.

2. ГОСТ 34093-2017. Вагоны пассажирские локомотивной тяги. Требования к прочности и динамическим качествам. М.: Стандартинформ, 2018. 36 с.

3. Савельев В. В., Закарюкин В. П. Анализ конструкций поглощающих аппаратов железнодорожного подвижного состава // Вестник ИрГУПС. 2018. № 1 (25). С. 45–58.

4. ТУ 32.14.11-001-2019. Аппараты поглощающие фрикционные ПМКП-110 класса Т1. Брянск: БМЗ, 2019. 44 с.

5. Мартынов В. П., Кузнецов А. А. Применение полимерных материалов в поглощающих аппаратах грузовых вагонов // Трение и износ. 2021. Т. 42, № 3. С. 389–397.

6. Чечулин Е. С. Обоснование рациональных параметров межвагонных связей пассажирских вагонов поездов постоянного формирования: дис. ... канд. техн. наук. М., 2017. 153 с.

7. Лукашова Е. В. Обоснование технических решений по повышению жёсткости несущих конструкций кузовов пассажирских вагонов: дис. ... канд. техн. наук. Брянск, 2024. 123 с.

8. Петренко В. В., Омельяненко В. П., Попов С. В. Simulation of railway vehicle dynamics in Universal Mechanism software // Procedia Engineering. 2016. Vol. 129. P. 187–194.

9. Wu Q., Spiryagin M., Cole C. A review of dynamics modelling of friction draft gear // Vehicle System Dynamics. 2014. Vol. 52, No. 6. P. 733–758.

10. ГОСТ 32885-2014. Автосцепка модели СА-3 железнодорожного подвижного состава. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2015. 28 с.

11. Курзина Н. М., Лозбинев Ф. Ю., Болдырев А. П. Исследование демпфирующих свойств эластомерных элементов поглощающих аппаратов // Трение и износ. 2022. Т. 43, № 4. С. 412–420.

12. Блохин Е. П., Суслов А. И., Гребенюк П. Т. Динамика поезда: Учебник для вузов ж.-д. трансп. М.: Маршрут, 2008. 408 с.

13. Руководство по эксплуатации Т-7П.00.00.000 РЭ. М.: ООО «Транспортная техника», 2020. 48 с.

14. Spiryagin M., Wolfs P., Szanto F., Cole C., Sun Y. Practical modelling and simulation of polymer draft gear for freight wagons // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F. 2018. Vol. 232, No. 3. P. 274–285.

15. Лазарян В. А. Динамика вагонов. М.: Транспорт, 1964. 256 с.

Increasing the accuracy of passenger cars' longitudinal dynamics prediction using hybrid modeling and polymer absorption gear

Lukashov N.A.[1,a], Antipin D.Ya.[1,b], Lukashova E.V.[1,c]
[1] Bryansk State Technical University, Bryansk, Russian Federation
[a] Lukashov32@gmail.com, [b] Antipindy@yandex.ru, [c] leno4kachepikova@gmail.com;

Keywords: longitudinal dynamics, absorber, polymer damper, finite element analysis, universal mechanism, passenger car, model verification

This paper examines the problem of reducing longitudinal dynamic forces transmitted to the supporting structure of a passenger car body through automatic coupling assemblies. A comparative analysis of the performance characteristics of traditional rubber-metal shock absorbers (in particular, the R-5P modification) and advanced polymer damping devices is conducted. Key shortcomings of traditional solutions are identified, including the dependence of frictional properties on temperature conditions and intense wear of the friction elements. Polymer dampers are proposed as an alternative, demonstrating stable viscoelastic parameters and increased energy capacity. The main result of the study was the development and validation of a combined dynamic car model implemented in the Universal Mechanism software package. A distinctive feature of this approach is the integration of a finite element model of body elasticity with a multi-mass design of the running gear. The adequacy of the developed model was confirmed by comparison with test data conducted by JSC NO TIV. The discrepancy between the calculated and experimental values for normal stresses was no more than 12%, while the deviation in the performance characteristics of the draft gear varied between 1% and 11% depending on the load. It has been proven that the proposed method allows for the effective optimization of intercar interaction parameters at the design stage, reducing the need for costly full-scale testing.

УДК 621.22

Конструкция карданного шарнира со сменными шипами крестовины

Кукушкин Е. В. [1,a]
[1]Донской государственный технический университет, пл. Гагарина 1, г. Ростов-на-Дону, Россия
[a]ironjeck@mail.ru

Ключевые слова: карданный шарнир, сменные шипы крестовины, шарнир неравных угловых скоростей, угол излома карданной передачи.

Проведен анализ конструкций карданных шарниров неравных угловых скоростей и предложена конструкция нового карданного шарнира со сменными шипами крестовины, обеспечивающего возможность настройки шипов крестовины карданного шарнира по нониусу для обеспечения равномерного секторного износа шипов в зависимости от угла излома карданной передачи.

Распределение нагрузки, действующей на игольчатый подшипник, между отдельными телами качения, всегда неравномерно [1], поэтому для обеспечения равномерного секторного износа шипов, в зависимости от угла излома карданной передачи, необходима

новая конструкция карданного шарнира со сменными шипами крестовины, обеспечивающая возможность настройки шипов крестовины карданного шарнира по нониусу.

Известен карданный шарнир [2], который содержит две вилки, крестовину с шипами, игольчатые подшипники и крышки со стопорными пластинами, причем каждый шип крестовины выполнен с двумя продольными разрезами, ширина которых значительно меньше диаметра, а длина меньше длины игольчатого ролика, размещенными в диаметральной плоскости, перпендикулярной плоскости расположения шипов крестовины, при этом в цилиндрическом отверстии каждого шипа посредством разъемного подвижного соединения установлена с возможностью перемещения вдоль продольной оси шипа втулка, выполненная в виде усеченного конуса.

Известен карданный шарнир [3], который содержит две вилки, игольчатые подшипники и крестовину, на шипы которой напрессованы втулки из материала с высокой твердостью поверхности, причем каждая втулка выполнена с разрезом в направлении образующей цилиндрической поверхности таким образом, что длина окружности по наружному диаметру втулки больше длины окружности по внутреннему диаметру игольчатого подшипника на величину зазора в разрезе, который не превышает диаметра тела качения игольчатого подшипника. Втулка выполнена в виде витой цилиндрической пружины кручения с соприкасающимися витками, устанавливаемой на шип крестовины, имеющий ответную наружную поверхность, причем упомянутая пружина выполнена из проволоки, поперечное сечение которой имеет форму круга или выпуклого многоугольника, при этом между витками витой цилиндрической пружины образуются канавки для удержания смазки.

Известен карданный шарнир [4], который содержит две вилки, игольчатые подшипники и крестовину, на шипы которой напрессованы втулки из материала с высокой твердостью поверхности, причем отверстие втулки и наружная поверхность шипа в поперечном сечении их имеют форму выпуклого правильного многоугольника.

Известен карданный шарнир [5], который содержит вилки, игольчатые подшипники, крестовину с втулками, радиальные и осевые уплотнения. Втулка шипа крестовины выполнена в виде стакана, при этом в основании корпуса игольчатого подшипника и упомянутой втулки расположены центральные соосные отверстия, каждое из которых выполнено в виде правильного выпуклого многоугольника, а между основанием корпуса игольчатого подшипника и крышкой установлен уплотнительный элемент.

К недостаткам перечисленных выше карданных шарниров можно отнести то, что в процессе работы шипы крестовины быстро изнашиваются, вследствие неравномерного износа шипов крестовины и не могут быть заменены без демонтажа карданной передачи, использование цельной крестовины не позволяет выполнять раздельную закалку шипов крестовины, что затрудняет установку крестовины карданного шарнира в вилки карданной передачи.

Известен карданный шарнир [6], состоящий из вилок, подшипников, разборной крестовины, состоящей из разборного корпуса и шипов. Шипы установлены на центрирующем элементе, выполненном в виде крестовины, а их торцы, расположенные в полости корпуса, выполнены с возможностью передачи вращения для поворота шипов, при этом в полости корпуса крестовины установлен приводной элемент с возможностью обеспечения указанного поворота.

Недостаток заключается в том, что сменные шипы крестовины установлены на центрирующем элементе и не могут быть заменены без демонтажа карданной передачи в случае повреждения одного из шипов карданного шарнира, проблема установки карданного шарнира в вилке карданной передачи не решена.

Наиболее близким техническим решением является [7-10], включающий в себя вилки, крестовину с шипами и установленные на шипах игольчатые подшипники, запрессованные в вилки и зафиксированные от осевого смещения стопорными кольцами, а шипы выполнены съемными в виде ступенчатых втулок, имеющих в сечении меньшей ступени форму

многогранника и установленных меньшей ступенью в ответные глухие отверстия крестовины до упора по торцевым поверхностям.

Недостаток прототипа заключается в том, что сменные шипы поворачиваются только на грани многогранника, а износ шипов происходит секторно, в зависимости от угла излома карданной передачи и при меньшем угле излома карданной передачи износ шипов крестовины будет меньше.

Поставленная задача решается тем, что в карданном шарнире, содержащем вилки, крестовину с шипами и установленные на шипах игольчатые подшипники, запрессованные в вилки и зафиксированные от осевого смещения стопорными кольцами, а шипы выполнены съемными, в сечении меньшей ступени форма шипа выполнена в виде конуса и установленные меньшей ступенью в ответные отверстия крестовины, которые также выполненные в виде конуса, а на каждом торце крестовины с отверстием под шип нанесены нониусы. Конструкция предложенного карданного шарнира позволяет настраивать сменные шипы крестовины карданного шарнира по нониусу для обеспечения равномерного секторного износа шипов в зависимости от угла излома карданной передачи. Между совокупностью существенных признаков и достигаемым техническим результатом существуют причинно-следственная связь, а именно увеличение долговечности карданного шарнира за счет равномерного износа шипов крестовины карданного шарнира в зависимости от угла излома карданной передачи. Предлагаемое устройство позволяет увеличить долговечность карданного шарнира за счет равномерного износа шипов крестовины карданного шарнира в зависимости от угла излома карданной передачи.

Предложенное устройство (рис. 1), состоит из двух вилок 7, крестовины 1 с четырьмя шипами 2, выполненными съемными, имеющих в сечении меньшей ступени форма шипа выполнена в виде конуса и установленные меньшей ступенью в ответные отверстия крестовины 1 до упора, которые также выполненные в виде конуса, а на каждом торце крестовины 1 с отверстием под шип нанесены нониусы, крестовина имеет внутренние осевые каналы для смазки, тавотницу 6 и установленные на шипах игольчатые подшипники 3, запрессованные в вилки 7 и зафиксированные от осевого смещения стопорными кольцами 8. Манжеты 4, 5 установлены на шипах крестовины и предназначены для защиты подшипников от попадания в область работы инородных тел и выхода смазочного материала. Через тавотницу 6 нагнетается смазочный материал [11].

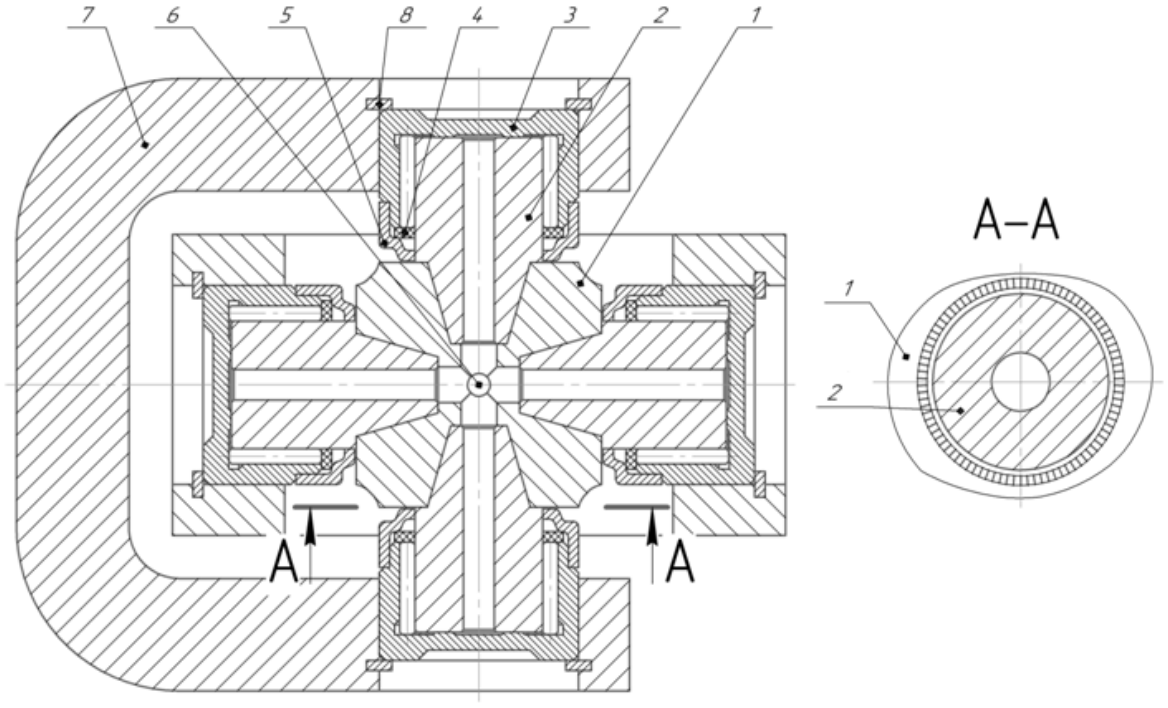


Рис. 1. Карданный шарнир со сменными шипами крестовины

Предложенное устройство работает следующим образом: при передаче крутящего момента вилке 7 воздействуют на сборную крестовину через игольчатые подшипники 3. При каждом обороте шарнира поочередно работают два игольчатых подшипника 3, расположенных в противоположных подшипниковых узлах каждой вилки, радиальная нагрузка воспринимается вилками шарнира.

В случае наработки карданного шарнира до заданного предела или повреждения одного или нескольких шипов крестовины производят переустановку сменных шипов по нониусу или заменяют их. Снимаются стопорные кольца 8 с вилок 7 карданной передачи, вынимаются игольчатые подшипники 3, вынимаются шипы 2. Шипы 2 переустанавливаются с поворотом вдоль оси по нониусу, в зависимости от износа или заменяются новыми. Устанавливаются игольчатые подшипники 3 на шипы крестовины и фиксируются в вилках 7 карданного шарнира стопорными кольцами 8. Через тавотницу 6 с помощью пресс-масленки карданный шарнир заполняется смазочным материалом.

Технический эффект заключается в обеспечение возможности настройки шипов крестовины карданного шарнира по нониусу для обеспечения равномерного секторного износа шипов в зависимости от угла излома карданной передачи.

Литература:

1. Кукушкин Е. В. Создание унифицированного параметрического ряда типоразмеров карданных шарниров неравных угловых скоростей / Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2019. №4 С. 36-42. DOI 10.15593/24111678/ 2019.04.04.

2. Пат. 2224917 Российская Федерация, МПК F16C11/06, F16D 3/28. Карданный шарнир / Сигаев А. М., Пастухов А. Г., Деревянкин В. Н. № 2002113785/11; заявл. 27.05.2002; опубл. 27.02.2004

3. Пат. 2220338 Российская Федерация, МПК F16D 3/26, F16D 3/33,F16D 3/41,F16C 33/61. Карданный шарнир / Сигаев А. М., Пастухов А. Г., Ольховский С. Н., Худошин А. С. № 2001120572/28; заявл. 23.07.2001; опубл. 27.12.2003

4. Пат. 2205304 Российская Федерация, МПК F16C 11/06, F16D 3/26,F16D 3/41. Карданный шарнир / Сигаев А. М., Пастухов А. Г., Чехунов О. А. № 2001113339/28; заявл. 14.05.2001; опубл. 27.05.2003

5. Пат. 2232309 Российская Федерация, МПК F16C 11/06. Карданный шарнир и способ его технического обслуживания / Тимашов Е. П., Пастухов А. Г., Скурятин Н. Ф. № 2003100986/11; заявл. 13.01.2003; опубл. 10.07.2004.

6. Пат. 2238446 Российская Федерация, МПК F16C 11/06, F16D 3/32, F60S 5/00. Карданный шарнир и способ его технического обслуживания / Скурятин Н. Ф., Пастухов А. Г., Тимашов Е. П. № 2003106909/11; заявл. 12.03.2003; опубл. 20.10.2004.

7. Пат. 141878 Российская Федерация, МПК F16D 3/26, F16D 3/14. Карданный шарнир / Кукушкин Е. В., Меновщиков В. А., Ереско С. П., Ереско Т. Т. № 2014102339/11; заявл. 24.01.2014; опубл. 20.06.2014.

8. Ереско Т. Т., Кукушкин Е. В., Меновщиков В. А. Конструкция карданного шарнира со сменными шипами крестовины / Решетневские чтения: материалы XVI Междунар. науч. конф.; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2014. С. 298-300.

9. Kukushkin E. V., Eresko T. T., Mednikov D. M. New construction of universal joints / Materials 14 International Scientific Conference «Youth. Society. Modern science, technologies & innovations», 2015. P. 232-234.

10. Ереско С. П., Ереско Т. Т., Кукушкин Е. В., Меновщиков В. А. Сравнительный анализ конструкций карданных шарниров неравных угловых скоростей / Вестник СибГАУ. 2015. Том 16 №3. с. 720-728.

11. Пат. 207360 Российская Федерация, МПК F16 D3/26, F16 D3/41, F16 C11/06. Карданный шарнир / Кукушкин Е. В. № 2020118249/11; заявл. 04.06.2020; опубл. 25.10.2021.

The design of a universal joint with replaceable crosspiece trunnions

Kukushkin E. V. [1,a]
[1]Don State Technical University, Gagarin Square 1, Rostov-on-Don, Russian Federation
[a]ironjeck@mail.ru

Keywords: cardan joint, interchangeable cross studs, unequal angular velocity joint, bend angle of the cardan transmission.

An analysis of the designs of cardan joints of unequal angular velocities is carried out and the design of a new cardan joint with replaceable crossheads is proposed, which provides the ability to adjust the studs of the cardan joint cross along the vernier to ensure uniform sector wear of the studs depending on the fracture angle of the universal joint.

УДК 629.01

Методология многокритериальной оценки технического состояния автотранспортных средств

Матвиенко С.А.[1,a], Стрельник Ю.Н.[2,b]
[1]Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, ул. Державина 2, Макеевка, ДНР, Российская Федерация
[2]Донецкая академия транспорта, пр. Дзержинского 7, Донецк, ДНР, Российская Федерация
[a]s.a.matvienko@donnasa.ru, [b]yura-strelnik@yandex.ru

Ключевые слова: автотранспортные средства, ресурс, техническое состояние, нечёткая логика, многокритериальная оценка, алгоритм.

Статья посвящена разработке методологии многокритериальной оценки технического состояния автотранспортных средств с использованием нечёткой логики и анализа иерархий. Предложенный подход основан на использовании четырёх групп критериев: количественных, качественных, экономических и эксплуатационных. Разработанная нечёткая модель включает лингвистические переменные, функции принадлежности и базу правил, что позволяет формализовать экспертные оценки и интегрировать разнородные данные. Интегральный показатель остаточного ресурса рассчитывается как взвешенная сумма нечётких оценок критериев, нормированных на диапазон [0; 1], где значение, близкое к 1, указывает на высокую вероятность отказа. Методика может быть применена в централизованных системах технического обслуживания, а также для определения оптимальных сроков списания техники. Результаты исследования способствуют повышению экологической и технической безопасности, экономической эффективности и надёжности автотранспортных средств.

Введение.

В современных условиях эксплуатации автотранспортных средств (АТС) оценка их остаточного ресурса является важнейшей задачей, обеспечивающей безопасность, экономическую эффективность и оптимальное планирование ТОиР. Определение ресурса АТС является важным элементом в процедуре оценки их рыночной стоимости и имеет своей целью минимизацию экономических последствий и обеспечение безотказной работы на

период прогноза. Процесс прогнозирования включает: анализ динамики состояния АТС, определение допустимых изменений параметров, прогнозирование и обобщение данных. При выборе методов прогнозирования учитываются задачи прогнозирования, объём имеющейся информации и характер изменения параметров.

Традиционные подходы, основанные на пробеге, сроке службы, техническом состоянии не учитывают комплексное влияние всех критических по надежности деталей, узлов и систем АТС, что приводит к занижению рисков возникновения отказов, завышению затрат, субъективности. Современные методики и стандарты для прогнозирования остаточного ресурса АТС требуют значительного объёма вводных и статистических данных [1–5] Это создаёт потребность в комплексных моделях, интегрирующих диагностические, экономические, экологические и критерии технической безопасности с адаптивной настройкой под реальные условия эксплуатации. При использовании централизованных систем ТО и Р перспективным решением является внедрение экспертных систем с алгоритмами нечётко-логического вывода [6–8].

Классификация факторов оценки и формирование системы критериев.

Все факторы, влияющие на остаточный ресурс, предлагается разделить на четыре основные группы: количественные, качественные (диагностические), экономические и эксплуатационные. Данная классификация позволяет всесторонне охватить аспекты, определяющие потенциал дальнейшей безотказной работы АТС. Пробег и возраст остаются базовыми объективными показателями, но в предлагаемой методике они не являются единственными решающими. Диагностические критерии являются ключевыми для оценки фактического износа. Экономические критерии напрямую отражают финансовую целесообразность дальнейшей эксплуатации. Эксплуатационные критерии носят прогностический характер.

Сформированная система критериев служит основой для разработки математического аппарата. Система критериев для оценки ресурса АТС представлена в табл. 1.

Таблица 1

Система критериев для оценки ресурса АТС

Группа факторов	Критерий	Характеристика	Единица измерения
1. Количественные	1.1Общий пробег	Основной нормативный показатель выработки ресурса.	тыс. км
	1.2 Срок службы	Фактор естественного старения материалов и устаревания технологий	лет
2. Качественные	2.1. Состояние двигателя	Компрессия, содержание вредных веществ в выхлопных газах (CO, CH), расход масла на угар	%, л/1000 км
	2.2. Состояние трансмиссии	АКПП – цвет и запах рабочей жидкости, плавность переключений; МКПП - уровень шума, легкость включения передач	баллы
	2.3. Состояние ходовой части и подвески	Наличие стуков, люфтов в шаровых опорах, сайлентблоках, подшипниках ступиц.	мм, экспертная оценка
	2.4. Состояние тормозной системы	Износ толщины тормозных дисков и колодок, эффективность торможения.	мм, %
	2.5. Состояние кузова и ЛКП	Наличие и степень коррозии, дефектов лакокрасочного покрытия.	баллы
3. Экономические	3.1. Совокупные затраты на ТО и Р за последний год	Показатель интенсивности выхода из строя агрегатов и стоимости поддержания работоспособности.	руб./год
	3.2. Стоимость автомобиля	Показатель рыночной оценки износа	руб.
4. Эксплуатационные	4.1. Качество ТО	Соблюдение регламентов ТО, качество используемых материалов и запчастей.	баллы
	4.2. Режим «город/трасса»	Соотношение пробега в городском и загородном циклах	%

Разработка нечеткой модели оценки технического состояния АТС.

Для обработки качественных (диагностических) и эксплуатационных факторов, которые носят субъективный или неточный характер, применяется аппарат теории нечетких множеств. Это позволяет формализовать экспертные знания и лингвистические оценки, преобразовав их в количественные значения для последующего интегрирования в общую модель. Лингвистические переменные и их терм-множества для оценки технического состояния АТС представлены в таблице 2. База правил представляет собой совокупность логических продукций, определяющих взаимосвязь между входными параметрами и состоянием АТС и представлена в таблице 3.

Алгоритм расчета интегрального показателя остаточного ресурса (ИПОР) на основе взвешенного суммирования результатов нечеткого вывода с учетом весов AHP.

Разработанный алгоритм расчета ИПОР представляет собой последовательную комбинацию методов нечеткой логики и анализа иерархий. Алгоритм предназначен для интегральной оценки остаточного ресурса транспортных средств на основе множества разнородных критериев.

Таблица 2

Лингвистические переменные и их терм-множества

Лингвистическая переменная (фактор)	Универсальное множество (базовые единицы)	Терм-множество (оценочные категории)
Износ двигателя (X_1)	Комплексный показатель [0; 10], агрегирующий: компрессию (%), расход масла (л/1000 км), содержание CO/CH (ppm)	Низкий, средний, высокий, критический
Износ трансмиссии (X_2)	Комплексный показатель [0; 10] по данным диагностики и экспертной оценки	Низкий, средний, высокий
Износ ходовой части (X_3)	Комплексный показатель [0; 10] по данным замера люфтов и экспертной оценки	Низкий, средний, высокий
Состояние кузова (X_4)	Экспертная оценка [0; 10], где 0 – идеальное состояние, 10 – сильная коррозия/повреждения	Хорошее, удовлетворительное, неудовлетворительное
Затраты на ТО и ремонт за год (X_5)	Относительный показатель: (Фактические затраты / Средние затраты по автопарку) 10, [0; 15+]	Низкие, средние, высокие, критические
Качество технического обслуживания (X_6)	Экспертная оценка [0; 10] на основе анализа истории ТО	Низкое, удовлетворительное, высокое
Выходная переменная (Y)	Интегральная оценка [0; 10]	Низкий, умеренный, высокий, критический

Таблица 3

База нечетких правил для оценки общего износа

№	X_1: Двигатель	X_2: Трансмиссия	X_3: Ходовая часть	X_5: Затраты	Y: Общий износ
1	Низкий	Низкий	Низкий	Низкие	Низкий
2	Средний	Средний	Средний	Средние	Умеренный
3	Высокий	Высокий	Высокий	Высокие	Высокий
4	Критический	—	Высокий	Критические	Критический
5	Высокий	Средний	Высокий	Высокие	Высокий
6	Средний	Низкий	Низкий	Низкие	Низкий
7	Любое	Любое	Любое	Критические	Высокий

Ключевые особенности алгоритма: учет неопределенности исходных данных через нечеткие функции принадлежности, учет относительной важности критериев через весовые коэффициенты AHP, возможность использования различных методов агрегирования, визуализация результатов и анализ чувствительности.

Математическая основа алгоритма: нечеткая оценка критериев, взвешенное агрегирование.

Для каждого критерия i фактическое значение x_i преобразуется в нечеткую оценку $\mu_i(x_i) \in [0,1]$ с помощью линейной функции принадлежности, нормированной на заданный диапазон $[\min_i, \max_i]$:

$$\mu_i(x_i) = \max\left(0, \min\left(1, \frac{x_i - \min_i}{\max_i - \min_i}\right)\right), \quad (1)$$

Интегральный показатель оценки риска (ИПОР) вычисляется как взвешенная сумма нечетких оценок по всем критериям:

$$ИПОР = \sum_{i=1}^{n} \omega_i \cdot \mu_i(x_i), \quad (2)$$

где n- количество критериев; $\omega_i \in [0,1]$- вес критерия i, определенный методом АНР; $\mu_i(x_i)$ - нечеткая оценка критерия i.

Свойства ИПОР:

1. ИПОР$\in$[0,1] — всегда лежит в нормированном диапазоне.
2. Чем ближе значение к 1, тем выше общий риск отказа.
3. Веса w_i позволяют учитывать относительную значимость каждого критерия.

Блок-схема алгоритма представлена на рис. 1.

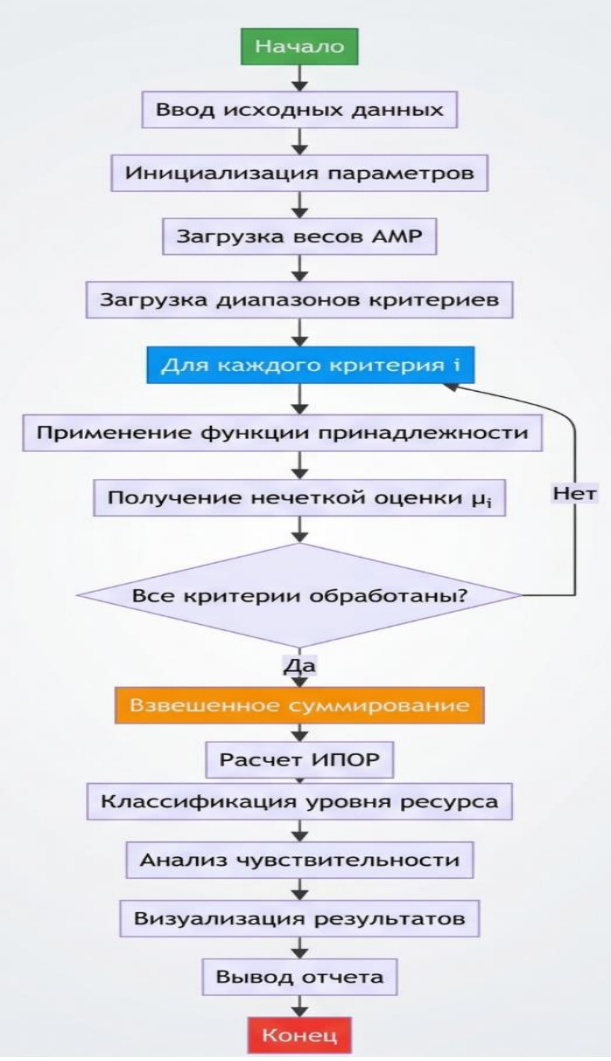


Рис. 1. Блок-схема алгоритма

Система для оценки технического состояния автомобиля включает следующие основные компоненты: инициализацию системы; функции принадлежности, базу правил, алгоритм Мамдани, визуализацию.

Ключевые особенности многокритериальной оценки технического состояния АТС: 4 входные переменные (износ двигателя, трансмиссии, шасси и стоимость обслуживания), выходная переменная (общий износ автомобиля); алгоритм Мамдани; автоматическая интерпретация результатов; подробная визуализация процесса вывода. Система позволяет оценить общее состояние автомобиля на основе частичных показателей износа различных компонентов, что особенно полезно для диагностики и принятия решений о необходимости ремонта или замены АТС.

Выводы.

Внедрение нечёткой логики позволяет повысить точность и адаптивность прогнозов технического состояния АТС, особенно в условиях неполной или неточной информации. Разработанная методика позволит: повысить точность оценки остаточного ресурса; снизить затраты на ремонт; устранить субъективность. Разработанный алгоритм может быть использован для: оценки остаточного ресурса, планирования ремонтов и технического обслуживания, определения оптимальных сроков списания, сравнительного анализа состояния, формирования стратегии обновления парка FNC.

Литература:

1. Жданко Д.А., Тарасенко В.Е., Непарко Т.А. Прогнозирование остаточного ресурса мобильных энергетических средств : Учебное пособие. Минск: БГАТУ, 2022. 280 с.

2. Солдатенко Т.Н. Модель остаточного ресурса инженерных систем с высоким уровнем износа // Инженерно-строительный журнал. 2012. №6 (32). С. 56–63.

3. Зудов Г.Ю., Ишкова А.М., Левин А.И. Методика расчета остаточного ресурса автомобиля // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2014. №10 (93). С. 138–143.

4. Слиденко А.М., Панарин М.А. Алгоритм оценки остаточного ресурса технических объектов при априорной оценке законов распределения // Актуальные исследования. 2022. №30 (109). С. 6-12.

5. Садыхов Г.С., Савченко В.П., Елисеева О.В. Основы оценок остаточного ресурса изделий // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Серия «Приборостроение». 2012. № 1. С. 84–91.

6. Сакно О.П., Колесникова Т.Н., Олло В.П. Моделирование принятия решений в системе технического обслуживания автомобилей на основе математических методов теории нечетких множеств // Вестник ПГАСА. 2019. №6 (259-260). С. 55–60.

7. Неупокоева Е.О., Малыгина С.Н., Быстров В.В. Практика применения нечеткой логики для имитационного моделирования сложных систем // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2024. Т.15, №3. С. 69–81.

8. Симонова Л.А., Демьянов Д.Н., Капитонов А.А. Оценка величины остаточного ресурса цилиндропоршневой группы дизельного двигателя на основе нечеткой логики // Научно-технический вестник Поволжья. 2022. № 11. С. 140–143.

Methodology for Multi-Criteria Assessment of the Technical Condition of Motor Vehicles

Matvienko S. A.[1,a], Strelnik Yu. N.[2,b]

[1]Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, 2 Derzhavina St., Makeyevka, DPR, Russian Federation

[2]Donetsk Transport Academy, Dzerzhinsky Avenue, 7, Donetsk, DPR, Russian Federation

[a]s.a.matvienko@donnasa.ru, [b]yura-strelnik@yandex.ru

Keywords: motor vehicles, service life, technical condition, fuzzy logic, multi-criteria assessment, algorithm.

The article is devoted the development jf methodology for multi-criteria assessment of the technical condition of motor vehicles using fuzzy logic and the analytic hierarchy process. The proposed approach is based on using four groups of criteria: quantitative, qualitative, economic, and operational.

The developed fuzzy model includes linguistic variables, membership functions, and a rule base, which allows formalizing expert assessments and integrating heterogeneous data. The integral indicator of the residual service life is calculated as a weighted sum of fuzzy criterion assessments normalized to the range [0; 1], where a value close to 1 indicates a high probability of failure.

The methodology can be applied in centralized maintenance systems, as well as for determining the optimal timing for vehicle decommissioning. The research results contribute to improving environmental and technical safety, economic efficiency, and reliability of motor vehicles.

УДК 623.437.3.093; 629.03; 629.36

Анализ влияния модульного гусеничного движителя на плодородие почв и тягово-сцепные возможности машины

Демидов Н.Н.[1,a], Добрецов Р.Ю.[1,b], Войнаш С.А.[2,c], Соколова В.А.[3,d], Ерыгин В.В.[4,e]

[1]Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, ул. Политехническая 29, Санкт-Петербург, Россия

[2]Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, ул. Миклухо-Маклая 6, Москва, Россия

[3]Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, ул. Большая Морская 18, Санкт-Петербург, Россия

[4] ФГКВОУ ВО «Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного», Тихорецкий проспект, д. 3, Санкт-Петербург, Россия

[a]ndemidov51@mail.ru, [b]dr-idpo@yandex.ru, [c]sergeyvoinash@yandex.ru, [d]sokolova_vika@inbox.ru, [e]vadim.erygin@yandex.ru

Ключевые слова: бесшарнирная гусеница, ходовая система, давление на почву, экологичность движителя.

В статье представлены результаты анализа влияния модульного гусеничного движителя (МГД) с резиноармированной гусеницей на плодородие почв и тягово-сцепные свойства машинно-тракторных агрегатов. Рассмотрены особенности взаимодействия движителя с опорной поверхностью, включая уплотнение и крошение почвы. Приведены граничные значения допустимых давлений для различных типов почв и условий эксплуатации (влажность, сезон). Установлено, что МГД обеспечивает более равномерное распределение давления на грунт и снижает пиковые нагрузки по сравнению с колёсными движителями, что особенно значимо на мягких и переувлажнённых почвах. Показано, что преимущества МГД по тяговым характеристикам (рост тяги на 10–15% и более) и производительности (до 1,8–2 раз) наиболее выражены на влажных грунтах, тогда как на твёрдых покрытиях шины остаются экономически более предпочтительными. Сделан вывод о целесообразности применения МГД для снижения деградации почв, повышения производительности и сохранения плодородия, особенно в условиях рисосеяния и весенне-осенних полевых работ. Обозначены факторы, способствующие внедрению МГД в России: господдержка локализации, ценовая и сервисная политика, информационная кампания.

Модульный гусеничный движитель (МГД) – узел, устанавливаемый на место традиционного пневматического колеса в первую очередь с целью снижения давления на грунт и улучшения тягово-сцепных свойств машины. МГД в настоящее время нашли широкое применение на сельскохозяйственной технике (тракторы, комбайны и др. самоходные машины).

Конечный потребитель в России в настоящее время не готов сделать выбор в пользу приобретения трактора с МГД, как альтернативы машине с полноприводным колесным движителем, и российские производители нуждаются в решении ряда вопросов, связанных с целесообразностью серийного выпуска шасси с МГД. С точки зрения потребителя необходимо проанализировать следующие вопросы: влияние использования МГД на плодородие почв; тягово-сцепные возможности и производительность; экономичность; ремонтопригодность и потребность в обслуживании; ресурс.

В рамках данного исследования рассмотрены вопросы, связанные с влиянием МГД на плодородие почв и тягово-сцепные возможности машинно-тракторного агрегата.

Основные результаты.

МГД позволяет существенно увеличить площадь контактной поверхности даже по сравнению с шиной низкого давления. Конструкция позволяет избежать локальных перепадов давления. Это приводит к снижению уплотнения почвы и уменьшению деградационных процессов в ней при проходах техники [1-3,4,5]. Таким образом, чем выше стоимость продукции, тем более выгодной оказывается перспектива внедрения МГД.

Модель трактора Case Steiger 580, являющегося преемником одного из первых серийных тракторов Case IH Steiger Quadtrac 9370, исследовалась в работе [4]. Целью исследования было определение величины давления на грунт, создаваемого колесной версией трактора и версией Quadtrac на треугольных гусеничных модулях в разных условиях эксплуатации. Исследование проводилось с помощью системы датчиков, регистрирующих распределение контактного давления трактора на опорную поверхность. В результате были получены минимальные, максимальные и средние значения контактного давления, а также, 3D отпечатки от движителей. Было заключено, что гусеничные модули являются лучшим выбором для минимизации уплотнения почвы благодаря их большему контакту с поверхностью и равномерному распределению давления. Однако это преимущество проявляется, в основном, на мягких и влажных почвах. Для твёрдой почвы или универсальных условий эксплуатации шины могут быть более экономичным и практичным вариантом.

Схожие выводы были сделаны в работе [3] при исследовании тяговых характеристик полноприводных тракторов с колесным и резиновым гусеничным движителями. Градация максимальных давлений с позиции нанесения ущерба почвам приводится в работе [5]. Важно отметить, что уплотнение почв развивается не только в обрабатываемом слое (0,25…0,35 м), но и в подпахотном слое (до 0,6…1,0 м). Например, при двукратном за сезон проходе техники урожайность снижается для первого года на 5%, а на четвертый год – до 18%. Уплотнение ведет к росту плотности и снижению пористости, самовосстановление почв ухудшается.

Для разных типов почв можно указать характерные граничные значения давления. Для типичного мощного чернозема при влажности 20…22% деструктивные процессы слабо выражены при давлении до 100…150 кПа; при влажности 27…35% порог сдвигается к 40…60 кПа. Крошение развивается умеренно в диапазоне 40…80 кПа, но резко прогрессирует при 80…200 кПа.

Допустимые давления с точки зрения уплотнения поверхностного слоя весной – до 50…60 кПа, осенью – до 80 кПа. Колееобразование на влажных грунтах начинает проявляться от 30 кПа, сухие грунты выдерживают до 120 кПа. Прочность почвы достигается для влажных грунтов уже при 22 кПа, а для сухих – до 130….230 кПа. Для дернисто-подзолистых почв деструктивные явления развиваются при давлении 125 кПа, на

луговине – до 100 кПа.

Уникальные машины могут развивать давление в зоне контакта около 0,05 МПа (5 кПа), что, как считается, не оказывает существенного влияния на экосистему. Но колесный трактор К-700 развивал среднее давление 112 кПа, а максимальное – 160 кПа, что ограничивает применимость машин в весеннее-осенний период. Гусеничный движитель трактора ДТ-75 в болотоходном исполнении дает среднее давление 23 кПа, что указывает на перспективность использования МГД в ходовой части трактора с целью снижения воздействия на почву. Вопрос проявления пиковых нагрузок, разрушающих поверхностный слой грунта и характерный для звенчатых гусениц [6], в отношении РАГ еще не исследован, но можно утверждать, что отсутствие звеньев нивелирует пиковые давления, снижая, в том числе, и нагрузку на грунтозацепы.

Тягово-сцепные свойства МГД выше, чем у шин. Увеличение тяги на 10-15% позволяет использовать сельхозорудия с большей шириной захвата и увеличить производительность труда. Согласно результатам различных исследователей, этот эффект заметнее проявляется на влажных, мягких грунтах, затопленных полях (что характерно, например, для рисоводства). На сухих, твердых грунтах, а также дорогах применение шин предпочтительнее [1-4]. Проведение предварительных расчетов позволяет оценить влияние условий эксплуатации на КПД трактора и выбрать эффективные режимы работы.

В работе [4] целью исследования было сравнение тяговых характеристик тракторов с пневматическими шинами и с треугольными гусеничными модулями. Для исследования использовались датчики измерения крутящего момента и частоты вращения, расположенные на полуосях исследуемых тракторов; датчики частоты вращения коленчатого вала ДВС и датчики, регистрирующие, величину силы тяги на крюке. В результате трактор с резиновой гусеничной лентой продемонстрировал небольшие преимущества в тяговых характеристиках по сравнению с полноприводным колесным трактором на твердых поверхностях и более значительные преимущества на мягких поверхностях [4]. Экспериментальные данные приведены в тексте публикации, доступном в электронном виде.

Аналогичные зависимости можно наблюдать в работе [1], где исследовались тракторы Case Puma 210 и New Holland T7060, оснащенные колесным и гусеничным движителями.

Целью исследования было сравнение производительности тракторов с пневматическими шинами и с треугольными гусеничными модулями. Для исследования использовались датчики измерения тяговой нагрузки, расположенные на трехточечной сцепке и датчик измерения объемного расхода топлива. Для расчетов производительности использовались известные аналитические зависимости. Соответственно, трактор, оборудованный треугольными гусеничными модулями, показал более высокую производительность (до 1,8…2 раз и более).

Также, интерес представляет исследование [2] т.к. в нем трактор New Holland T7060 с треугольными гусеничными модулями сравнивается не только с колесным трактором, но и с полугусеничным. Также, в данном исследовании испытания проводились не только на грунте, но и на асфальте. Целью исследования было сравнение производительности сельскохозяйственных тракторов с разными конфигурациями движителей. Измерения тягового усилия производились с применением тензодатчика; буксование оценивалось с помощью измерения частоты вращения вала отбора мощности и фактической скорости движения трактора на участке определенной длины. Испытания показывали лучшую тяговую эффективность (отношение эффективной мощности к крюковой мощности) и меньшее уплотнение почвы у трактора с четырьмя резиновыми гусеничными модулями по сравнению с другими. Кроме того, было отмечено снижение тяговой эффективности с увеличением пробуксовки у трактора с полугусеничным движителем в сравнении с полноприводным колесным трактором. Экспериментальные данные приводятся в текст публикации.

Особое внимание стоит уделить роли техники при работе в рисовых плантациях, наиболее распространенных в Азии. Несмотря на то, что климат основной части России не

является благоприятным для выращивания риса, в таких регионах, как Краснодарский край, Ростовская область, Астраханская область, Ставропольский и Приморский край, все-таки рис выращивается. Для создания благоприятных условий для выращивания риса обрабатывается и подвергается заболачиванию верхний слой почвы (10…30 см). В то же время обработка почвы на одних и тех же полях из года в год создает прочный твердый слой под глубиной обработки. Этот твердый слой снижает потери воды и обеспечивает благоприятную среду для выращивания риса. На поверхностях, на которых отсутствует твердый слой, или который недостаточно твердый, чтобы выдерживать транспортное средство, наблюдается увязание колесных тракторов. Эти условия требуют транспортных средств, которые могут работать с более низким давлением на грунт, используя гусеницы. Хотя гусеничный трактор можно использовать для подготовки болотистой земли, стоимость транспортировки трактора высока.

Производительность полугусеничного трактора была отмечена как альтернатива обычным шинным тракторам для удовлетворения требований часто встречающихся, необычно влажных и мягких условий рисовых полей [7].

Основные выводы.

1. МГД с РАГ имеет преимущества перед шинами низкого давления по тягово-сцепным характеристикам, уплотнению почв, долговечности. Однако эти преимущества проявляются в основном на мягких влажных почвах.
2. Объективно количественно оценить преимущества МГД перед шиной затруднительно – потребуется исследовать сценарий использования трактора, чтобы сделать предварительное заключение.
3. Внедрению МГД могут способствовать грамотная рекламная кампания, господдержка программы локализации их производства, ценовая политика продавца (искусственное снижение цены на трактор с гусеничными модулями и система сервиса могут помочь их внедрению в хозяйствах).
4. Ключевым аспектом использование МГД является возможность комплексного снижения деструктивного влияния на почву за счет снижения среднего давления в области контакта, уменьшения пиковых давлений, снижения сдвига слоев почвы.

Литература:

1. Turner R. J. Comparison of two and four track machines to rubber tire tractors in prairie soil conditions // Belt and tire traction in agricultural vehicles / Soc. of Automotive Engineers. – Warrendale, 1997. Pp. 31-43.

2. Zoz F. M. Belt and tire tractive performance // Belt and tire traction in agricultural vehicles / Soc. of Automotive Engineers. – Warrendale, 1997. Pp. 87-94.

3. Esch J.H., Bashford L.L., Von Bargen K., Ekstrom R.E. Tractive performance comparisons between a rubber belt track and a four-wheel-drive tractor // Transactions of the ASAE. 1990. Vol. 33. No 4. Pp. 1109-1115. DOI: 10.13031/2013.31446.

4. Shaheb R. Md., Klopfenstein A., Tietje R. et al. Evaluation of soil-tire interface pressure distributions and areas resulting from various tire and track technologies and configurations // 2021 ASABE Annual International Virtual Meeting (July 12–16, 2021). – Michigan: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2021. DOI: 10.13031/aim.202100889.

5. Куляшов А.П., Колотилин В.Е. Экологичность движителей транспортно-технологических машин. – М.: Машиностроение, 1993. 288 с.

6. Добрецов Р.Ю. Пути уменьшения экологической опасности взаимодействия гусеничных движителей с грунтами // Экология и промышленность России. 2009. № 5. С. 24-27.

7. Новинки Завода на агросезон 2016-2017 [Электронный ресурс] // Кировец. – 12.10.2016. – URL: https://kirovets-ptz.com/press/news/novinki-zavoda-na-agrosezon-2016-2017/?sphrase_id=741578 (дата обращения: 25.07.2025).

Analysis of the influence of a modular track undercarriage on soil fertility and tractive performance of a machine

Demidov N.N. [1,a], Dobretsov R.Yu. [1,b], Voinash S.A. [2,c], Sokolova V.A. [3,d], Erygin V.V. [4,e]
[1]Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Politechnicheskaya st. 29, St. Petersburg, Russia
[2]Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Miklukho-Maklaya st. 6, Moscow, Russia
[3]St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, Bolshaya Morskaya st. 18, St. Petersburg, Russia
[4]Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny Military Academy of Communications, 3 Tikhoretsky Prospekt, Saint Petersburg, Russia
[a]ndemidov51@mail.ru, [b]dr-idpo@yandex.ru, [c]sergeyvoinash@yandex.ru,
[d]sokolova_vika@inbox.ru, [e]vadim.erygin@yandex.ru

Keywords: hinge-free track, undercarriage system, soil pressure, environmental performance of the undercarriage.

The article presents the results of analyzing the influence of a modular track undercarriage (MTU) with a rubber-reinforced track on soil fertility and tractive performance of agricultural machinery. The features of interaction between the undercarriage and the supporting surface, including soil compaction and crumbling, are considered. Limit values of permissible contact pressure for different soil types and operating conditions (moisture, season) are provided. It is found that the MTU ensures a more uniform pressure distribution on the soil and reduces peak loads compared to wheeled undercarriages, which is especially important on soft and waterlogged soils. The advantages of the MTU in tractive performance (10–15% or more increase in drawbar pull) and productivity (up to 1.8–2 times) are most pronounced on wet soils, whereas on hard surfaces tires remain more economically preferable. It is concluded that the MTU is advisable for reducing soil degradation, increasing productivity, and preserving fertility, particularly in rice growing and spring–autumn field work. Factors contributing to the adoption of the MTU in Russia (government support for localization, pricing and service policies, information campaigns) are identified.

УДК 629.113

Результаты экспериментального исследования по определению возможности использования датчика детонации для диагностирования двигателей

Кривцов С.Н.[1,a], Данилов В.А. [1,b]
[1]Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова 83, Иркутск, Россия
[a]krivcov_sergei@mail.ru, [b] gargawar2015@yandex.ru

Ключевые слова: диагностика двигателя, датчик детонации, холостой ход, бензиновый двигатель, стук, шатунные вкладыши, клапанный механизм.

С увеличением пробега возрастает изношенность компонентов двигателя. Это может приводить к нарушению стабильности работы двигателя и снижению его эксплуатационных свойств и характеристик. Для контроля технического состояния

двигателя нами предложен экспресс метод диагностики, основанный на регистрациях амплитуд осциллограмм по средствам встроенного датчика детонации. Проведенные экспериментальные исследования позволили оценить влияние изношенности шатунных вкладышей и значений тепловых зазоров клапанов на показания датчика детонации.

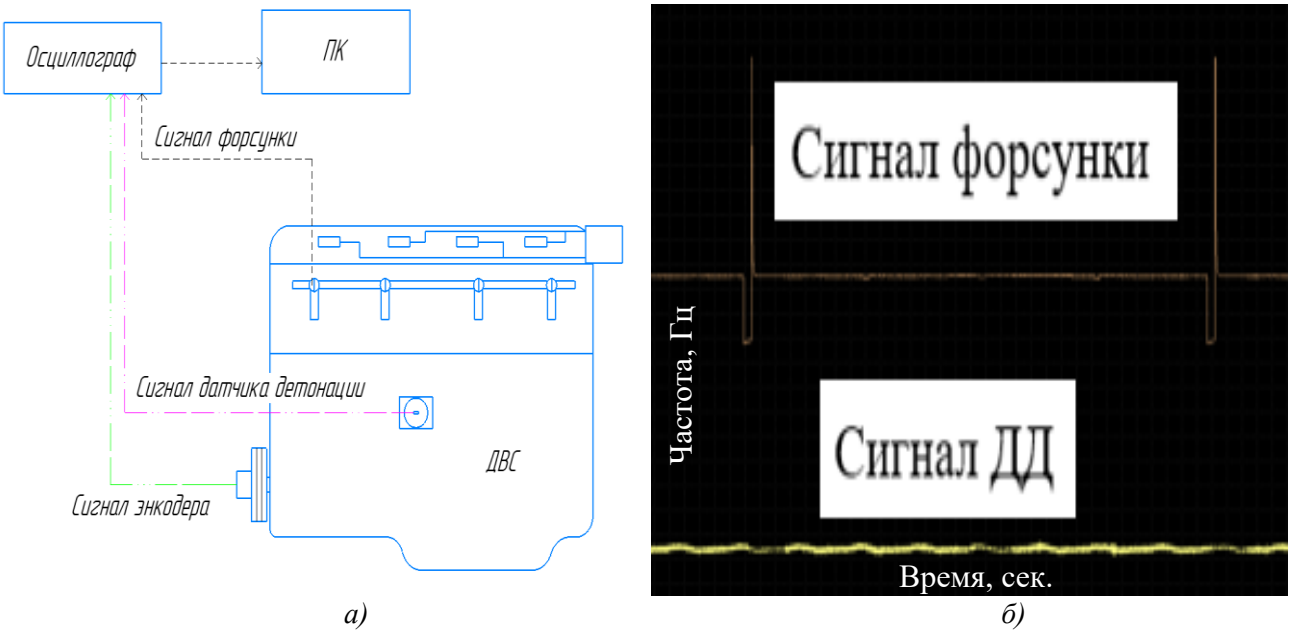
Введение

Виброакустическая диагностика позволяет определить стук, его природу и источник. Мы знаем о том, что стук имеет разную природу, а также всегда является не благополучным признаком, и зачастую многие вещи которые могут быть определены с помощью органов чувств человека, например слух, оказываются недоступны в силу ряда причин: труднодоступность, зависимость от квалификации человека, зависимость от внешних источников шума, необходимость наличия различного дополнительного оборудования, таких как стетоскоп и виброакустический датчик. С другой стороны, использование встроенного заводского датчика детонации позволяет фиксировать стук в двигателе.

Так как это встроенный прибор, который реагирует на вибрацию и стук, была поставлена гипотеза, можно ли с помощью него установить источник и причину стука.

Материалы и методы.

Для измерения стуков двигателя был разработан приборный комплекс, структурная схема которого представлена на рис. 1а. Он содержит заводской датчик детонации, встроенный в блок двигателя, аналого-цифровой преобразователь (осциллограф), который синхронизируется с углом поворота коленчатого вала при помощи соединения одного из каналов АЦП с датчиком положения коленчатого/распределительного вала или сигнального провода форсунки/свечи зажигания, а так же ноутбук на который выводится полученные данные, представленные на рис. 1б [1].



а) *б)*

Рис. 1. а) структурная схема измерительного комплекса; б) внешний вид данных, получаемых при работе приборного комплекса

В качестве оборудования для проведения экспериментов использовался стенд с двигателем внутреннего сгорания, который установлен в лаборатории диагностики кафедры «Автомобильного транспорта» ИрНИТУ. Бензиновый двигатель производства Honda модели B20 изображен на рис. 2. В табл. 1 приведены основные технические характеристики используемого двигателя.

Рис. 2. Стенд с двигателем внутреннего сгорания, применяемый при проведении экспериментальных исследований: B20b Хонда (бензиновый)

Таблица 1

Характеристика двигателя внутреннего сгорания, используемого для проведения экспериментов.

Характеристика	Honda B20b
Конструкция блока цилиндров	Рядная
Топливо	бензин
Рабочий объем, $см^3$	1972
Число цилиндров	4
Диаметр цилиндра, мм	84
Ход поршня, мм	89
Степень сжатия	9,6
Мощность, кВт	126 (при 5400об/мин)
Крутящий момент, Н·м	180 (при 4800 об/мин)

Полученные в ходе экспериментов данные обрабатывались с помощью специально разработанного нами программного обеспечения, позволяющего усреднять, фильтровать данные, а также осуществлять их экспорт во внешние приложения, например, MatLab и Excel [2].

Для проведения экспериментальных исследований с целью выявления стука шатунных подшипников была приобретена пара шатунных вкладышей с другого двигателя. На них была произведена работа по снятию напыления на посадочной поверхности с целью увеличения масляного зазора между коленчатым валом и подшипником скольжения. На рис. 3 показан процесс снятия рабочего слоя вкладышей.

Рис. 3. Процесс расточки шатунных вкладышей

Также были произведены замеры масляного зазора между шатунной шейкой коленвала и шатунными вкладышами с помощью измерительного инструмента Plastigauge. На рисунке 4 показан внешний вид данного процесса.

Рис. 4. Процесс замеров масляного зазора

После замеров были получены следующий данные:

- Толщина масляного зазора на заводских вкладышах составляет 0,05 мм (заводской допуск составляет от 0,02 мм до 0,08 мм);
- Толщина масляного зазора на неисправных вкладышах составляет 0,25 мм.

Для того, чтобы сымитировать неисправность клапанного механизма, были изменены значения тепловых зазоров клапанов на 1-ом цилиндре с помощью специальных щупов. На рис. 5 показан процесс регулировки теплового зазора клапанов.

Рис. 5. Процесс регулировки теплового зазора клапанов на двигателе Honda B20b

Заводские значения тепловых зазоров:

- Впускные клапана 0,1 мм (заводской допуск от 0,08 мм до 0,12 мм);
- Выпускные клапана 0,18 мм (заводской допуск от 0,16 мм до 0,2 мм).

Для имитации неисправности были установлены следующие значения:

- Впускные клапана 0,35 мм;
- Выпускные клапана 0,5 мм.

Также синхронизация сигнала производилась по форсунке 1-го цилиндра, впрыск подается в момент НМТ поршня.

Результаты и обсуждения.

Для оценки влияния выбранных факторов на показания датчика детонации был произведен ряд поисковых экспериментов. Так на двигателе Honda B20b произвели измерения амплитуды стука при работе на холостом ходу с заводскими вкладышами рисунок 6. Максимальная амплитуда стука при таком режиме работы не превышает 0,157 mV (от 0,097 mV до -0,06 mV).

В дальнейшем была произведена замена заводских шатунных вкладышей на неисправные. Реакцией на это послужило значительное увеличение амплитуды до 0,248 mV на фазе а) поворота коленчатого вала от 520° до 530°. Такое поведение обуславливается возросшей вибрационной составляющей.

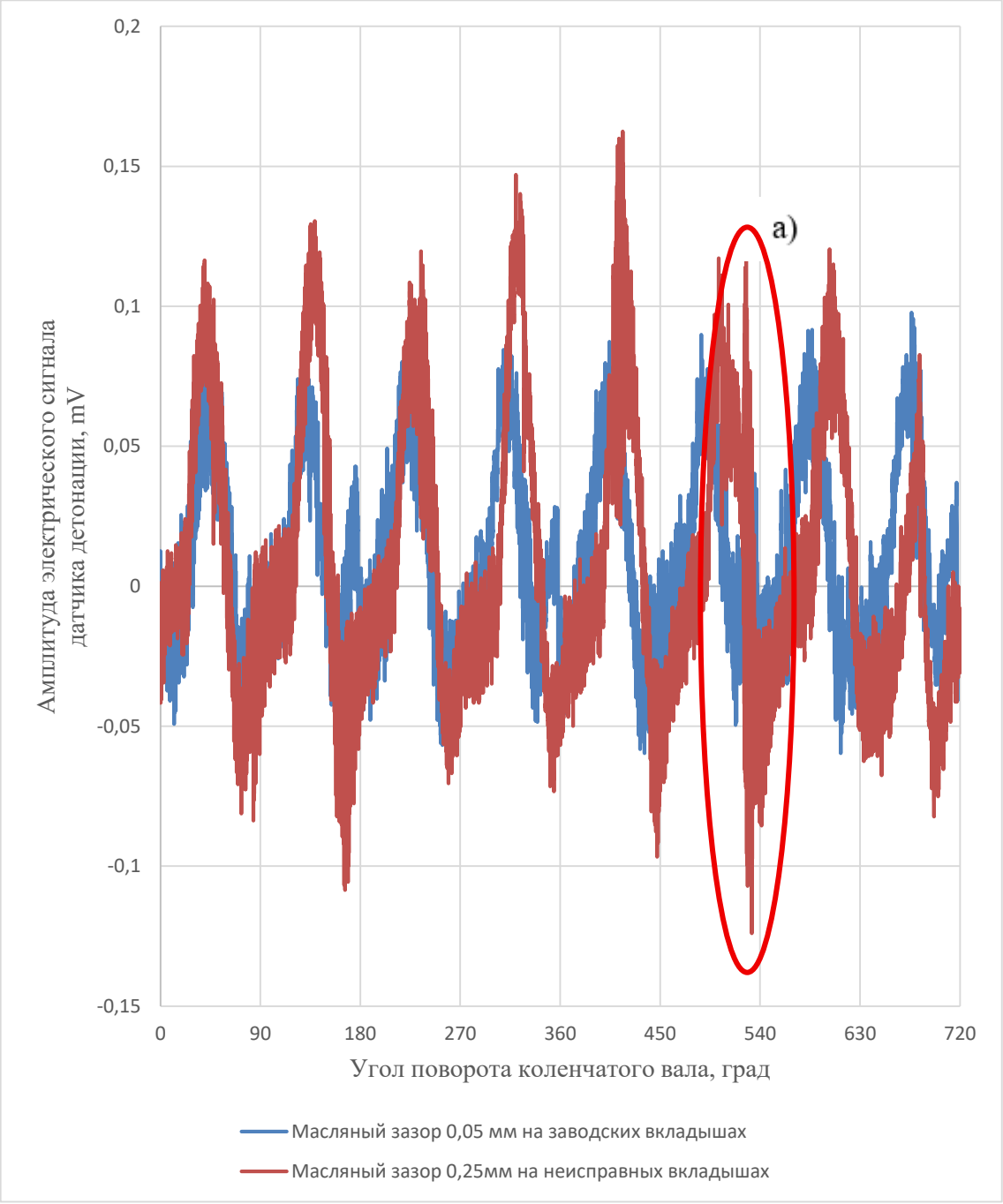


Рис. 6. График стуков при работе на холостом ходу с заводскими и неисправными шатунными вкладышами 4-го цилиндра на двигателе Honda B20b

На двигателе Honda B20 также была сымитирована неисправность в газораспределительном механизме (рис. 7, 8).

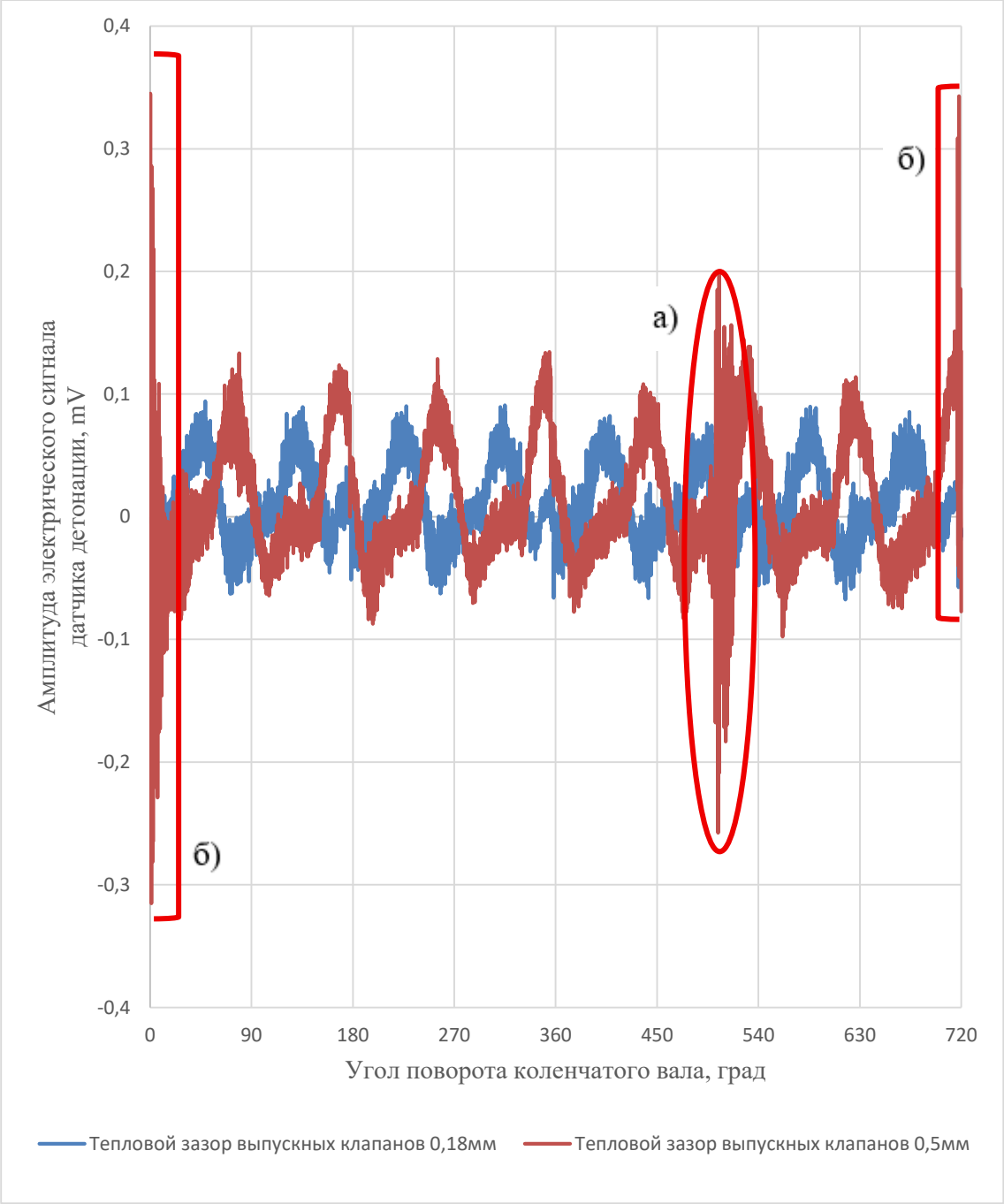


Рис. 7. График стуков при работе на холостом ходу с заводскими и увеличенными значениями теплового зазора выпускных клапанов 1-го цилиндра на двигателе Honda B20

По графику отчетливо видны два стука. Амплитуда первого стука равна 0,45 mV и он происходит на фазе а) 500°-526°, что соответствует моменту открытия выпускных клапанов в конце такта рабочего хода. И также виден стук с амплитудой 0,66 mV на фазе б) 718°-18°, что соответствует моменту закрытия выпускных клапанов в конце такта выпуска.

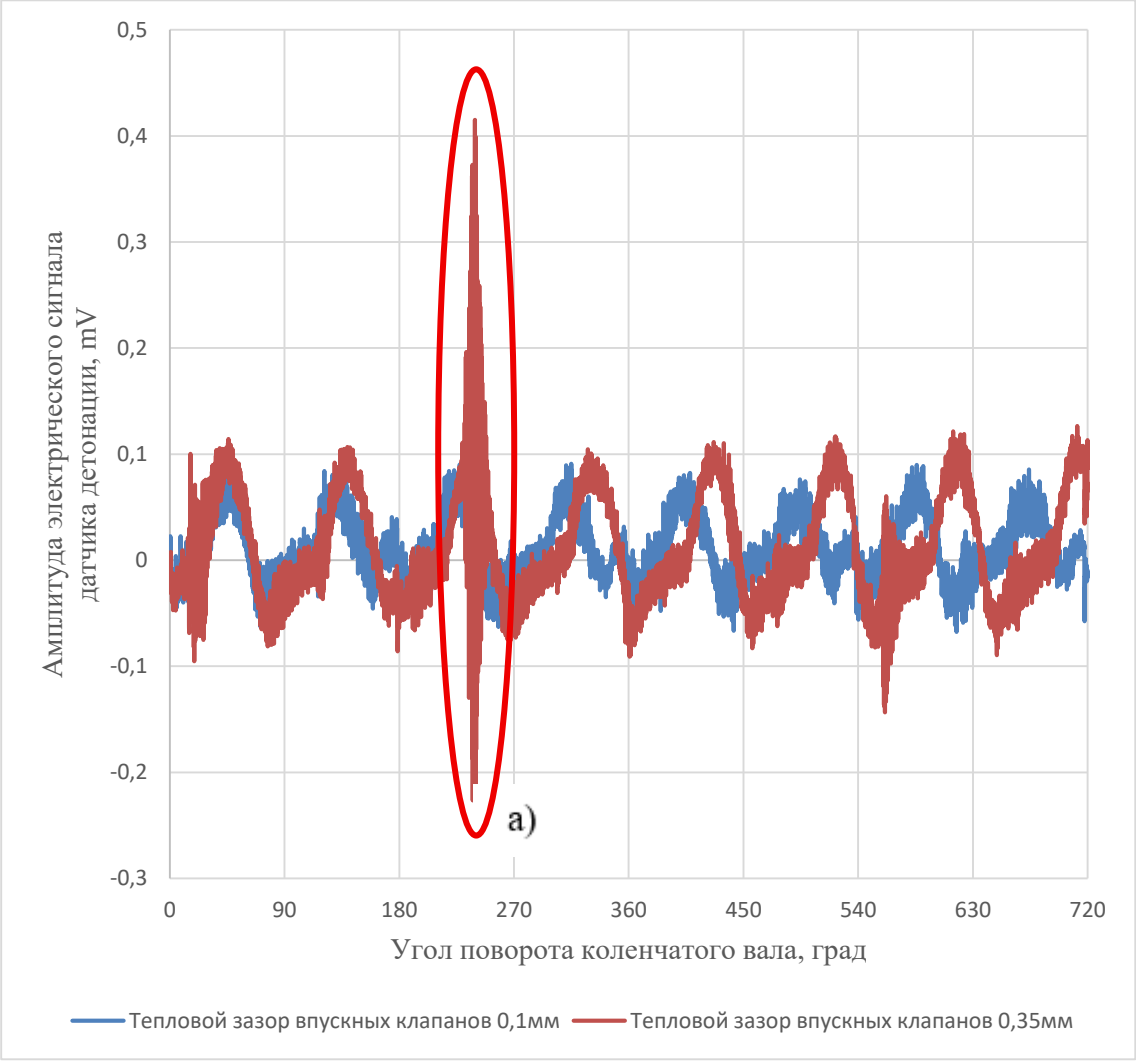


Рис. 8. График стуков при работе на холостом ходу с заводскими и увеличенными значениями теплового зазора впускных клапанов 1-го цилиндра на двигателе Honda B20

На данном графике отчетливо виден стук амплитудой 0,64 mV при фазе а) 233°-250°, что соответствует моменту закрытия впускных клапанов в начале такта сжатия.

Заключение.

Проведенные эксперименты по оценке способности фиксирования стуков с помощью датчика детонации автомобильного двигателя позволили заключить, что:

- Значения амплитуд стуков качественно и количественно отражают информацию о равномерности работы цилиндров двигателя и в дальнейшем могут быть использованы при диагностировании.

Литература:

1. Кривцов С.Н., Деньгин И.Д. Результаты экспериментального исследования метода диагностики двигателя на основе анализа бокового ускорения блока двигателя /В сборнике: Безопасность колесных транспортных средств в условиях эксплуатации. Материалы 116-й Международной научно-технической конференции. Улан-Удэ: Издательство, 2023. С. 93-98.

2. Кривцов С.Н., Яковчук П.С., Деньгин И.Д. Программа для обработки и фильтрации экспериментальных данных Filtering KYD / Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2022680578, 02.11.2022. Заявка № 2022680041 от 28.10.2022.

Results of an experimental study to determine the possibility of using a detonation sensor to diagnose engines

Krivtsov S.N.[1,a], Danilov V.A.[2,b]
[1,2]Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontov St., Irkutsk, Russia
[a]krivcov_sergei@mail.ru, [b]gargawar2015@yandex.ru

Keywords: engine diagnostics, detonation sensor, idling, gasoline engine, knock, connecting rod inserts, valve mechanism.

As the mileage increases, the wear and tear on engine components increases. This can lead to disruption of engine stability and a decrease in its performance properties and characteristics. To monitor the technical condition of the engine, we have proposed an express diagnostic method based on the recording of oscillogram amplitudes using the built-in detonation sensor. The experimental studies made it possible to evaluate the influence of the frayed connecting rod liners and the values of the thermal gaps of the valves on the readings of the detonation sensor.

УДК 623.746:534.833

Разработка виброгасящей подвески для стабилизации груза при транспортировке дроном

Клименко М.А.[1,a], Любимый Н.С.[1,b], Быценко М.В.[1,c], Вычик В.П.[1,d]
[1]Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, ул. Костюкова 46, г. Белгород, Россия
[a] mihail.klimenko.26@gmail.com, [b] nslubim@bk.ru, [c] b.michutka2005@gmail.com,
[d] vladvychik@yandex.ru

Ключевые слова: гексакоптер, демпфирующая пластина, колебания, вибрация, устойчивость, взлет, посадка.

В статье представлены результаты экспериментального исследования специальной демпфирующей пластины, установленной на гексакоптере. Основное внимание уделено анализу влияния пластины на снижение колебаний беспилотного летательного аппарата при взлете, посадке и в процессе полета. Рассмотрена конструкция пластины, выполненной из композитных материалов. Проведен анализ вибрационных характеристик гексакоптера с установленной демпфирующей системой. Показано, что применение специальной пластины позволяет существенно снизить амплитуду колебаний корпуса дрона, что положительно сказывается на стабильности полета и качестве получаемых данных с бортового оборудования. Математическое моделирование подтвердило эффективность предложенного технического решения для повышения устойчивости беспилотных систем.

Введение.

В последние годы наблюдается стремительное развитие технологий беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), особенно мультикоптеров [1]. Гексакоптеры, оснащенные шестью роторами, получили широкое распространение благодаря повышенной грузоподъемности и надежности по сравнению с квадрокоптерами. Однако одной из основных проблем при эксплуатации остаются вибрации и колебания, возникающие при работе двигателей, полете, взлете и посадке. Вибрации негативно влияют на работу бортовых систем, особенно гироскопов и акселерометров, что приводит к снижению

точности позиционирования. Для решения этой проблемы применяются различные методы демпфирования колебаний.

Целью данного исследования является экспериментальная оценка эффективности специальной демпфирующей пластины для снижения колебаний при взлете, посадке и полете.

Методика экспериментального исследования. Объектом исследования послужил гексакоптер с установленной демпфирующей пластиной (рис. 1).

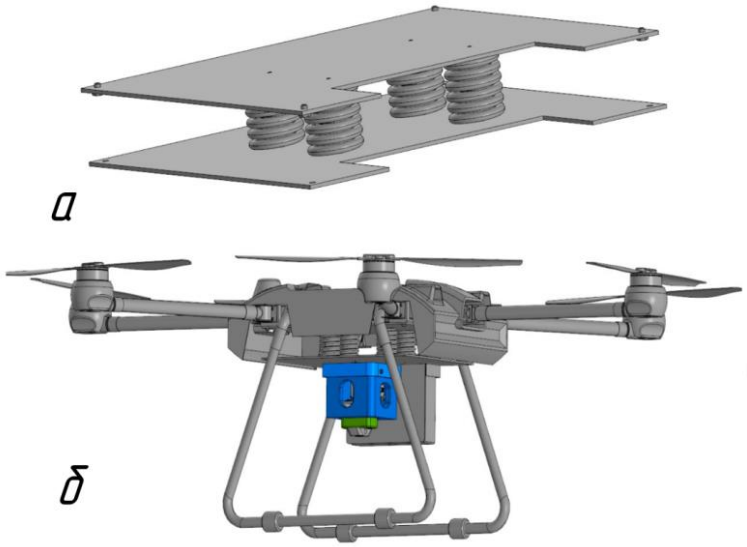


Рис. 1. Конструкция демпфирующей пластины
а – демпфирующая пластина; *б* – демпфирующая пластина на гексакоптере

Пластина выполнена из композитного материала и установлена между основным корпусом дрона и посадочной платформой. Конструкция включает эластичные элементы, обеспечивающие гашение вибраций различной частоты

Математическая модель колебаний гексакоптера с демпфирующей пластиной описывается системой дифференциальных уравнений (1):

$$mx + cx + kx = F(t) mx + cx + kx = F(t) \quad (1)$$

где m – масса системы, c – коэффициент демпфирования, k – коэффициент жесткости, F(t) – возмущающая сила от работы роторов

Экспериментальные исследования проводились в трех режимах:

1. Вертикальный взлет на высоту 2 м
2. Зависание в стационарном режиме
3. Посадка на платформу

Для регистрации колебаний использовались акселерометры, установленные на корпусе дрона и на демпфирующей пластине. Частота дискретизации составила 1000 Гц [2].

Результаты и обсуждение.

Результаты экспериментов показали, что применение демпфирующей пластины позволяет снизить амплитуду колебаний корпуса гексакоптера на 35-45% в зависимости от режима полета (табл. 1).

Таблица 1

Снижение амплитуды колебаний корпуса гексакоптера при использовании демпфирующей пластины

Режим полета	Амплитуда колебаний без пластины, м/с²	Амплитуда колебаний с пластиной, м/с²	Снижение амплитуды, %
1	2	3	4
Вертикальный взлет (вертикальные колебания)	2,45	1,42	42

продолжение таблицы 1

1	2	3	4
Вертикальный взлет (горизонтальные колебания)	1,85	1,15	38
Зависание (вертикальные колебания)	1,20	0,84	30
Зависание (горизонтальные колебания)	0,95	0,68	28
Посадка (вертикальные колебания)	2,80	1,54	45
Посадка (горизонтальные колебания)	2,10	1,24	41

Наибольший эффект достигнут при взлете и посадке, когда воздействие на конструкцию максимально. В режиме зависания снижение вибраций составило 28-32%, что согласуется с данными других исследований MDPI [3]. Анализ частотных характеристик показал, что пластина наиболее эффективно гасит колебания в диапазоне 20-80 Гц, что соответствует основным частотам вращения роторов гексакоптера

Важным результатом является снижение низкочастотных колебаний (0.5-5 Гц), которые наиболее критичны для стабильности полета и качества видеосъемки [4,5].

Выводы.

Разработанная демпфирующая пластина для гексакоптера показала высокую эффективность в снижении колебаний корпуса при всех исследованных режимах полета. Максимальное снижение амплитуды колебаний (до 45%) достигнуто при взлете и посадке, что особенно важно для безопасности полетов. Применение композитных материалов в конструкции пластины обеспечило оптимальное соотношение эффективности демпфирования и массы конструкции.

Результаты исследования могут быть использованы при проектировании систем стабилизации для много роторных БПЛА различного назначения.

Литература:

1. Применение беспилотных авиационных систем в транспортно-логистическом комплексе региона / Н. С. Любимый, Б. С. Четвериков, И. В. Топилин, А. А. Феофилова // Мир транспорта и технологических машин. – 2024. – № 4-3(87). – С. 134-142.

2. Орманов, А. Алгоритм посадки БПЛА с компенсацией ветровой нагрузки на основе нечеткой логики / А. Орманов // Будущее науки: взгляд молодых ученых на инновационное развитие общества : Сборник научных статей 3-й Всероссийской молодежной научной конференции. В 3-х томах, Курск, 30 мая 2025 года. – Курск: ЗАО "Университетская книга", 2025. – С. 505-508.

3. Development of a Drone's Vibration, Shock, and Atmospheric Profiles / Ch. Ge, K. Dunno, M. A. Singh [et al.] // Applied Sciences (Switzerland). – 2021. – Vol. 11, No. 11. – P. 5176.

4. Rahmaniar, W. Online Digital Image Stabilization for an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) / W. Rahmaniar, A. E. Rakhmania // Journal of Robotics and Control. – 2021. – Vol. 2, No. 4. – DOI 10.18196/jrc.2484.

5. К вопросу о создании беспилотных летательных аппаратов / А. В. Вытовтов, А. В. Калач, А. А. Сазанова, Ю. М. Лебедев // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. – 2016. – № 2. – С. 87-91.

Experimental study of a damping plate for reducing hexacopter oscillations during takeoff, landing and flight

Klimenko M.A.[1,a], Lyubimiy N.S.[1,b], Bytsenko M.V.[1,c], Vychik V.P.[1,d]
[1]Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 46 Kostyukov st., Belgorod, Russian Federation
[a]mihail.klimenko.26@gmail.com, [b]nslubim@bk.ru, [c]b.michutka2005@gmail.com,
[d] vladvychik@yandex.ru

Keywords: hexacopter, damping plate, oscillations, vibration, stability, takeoff, landing.

The article presents the results of an experimental study of a special damping plate installed on a hexacopter. The main focus is on analyzing the effect of the plate on reducing oscillations of the unmanned aerial vehicle during takeoff, landing, and flight. The design of the sling plate made of composite materials is considered. The vibration characteristics of the hexacopter with the installed damping system are analyzed. It is shown that the use of a special plate can significantly reduce the amplitude of oscillations of the drone body, which positively affects flight stability and the quality of data obtained from onboard equipment. Mathematical modeling confirmed the effectiveness of the proposed technical solution for improving the stability of multi-rotor unmanned systems.

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, ДИНАМИКА, ПРОЧНОСТЬ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ

УДК 538.9

Исследование взаимодействия примесных атомов водорода с вакансией

Зюзин Д.И.[1,a], Маркидонов А.В.[2,b]
[1]Алтайский государственный технический университет им.И.И.Ползунова, пр. Ленина, 46, Барнаул, Россия
[2]Кузбасский гуманитарно-педагогический институт КемГУ, пр. Металлургов, 19,Новокузнецк
[a]denis.physic96@mail.ru, [b] markidonov_artem@mail.ru

Ключевые слова: компьютерное моделирование, водород, металлы, точечные дефекты, вакансии, энергия связывания, водородная хрупкость, комплексы водород-вакансия, наводороживание.

С помощью методов молекулярно-динамического моделирования с использование программного обеспечения XMD и потенциала EAM проведено исследование взаимодействия примесных атомов водорода с вакансией в ГЦК-решетке никеля. Настоящая работа направлена на изучение влияния температуры, упругой деформации и концентрации водорода на стабильность комплекса «водород-вакансия». Экспериментальным путем получено, что атомы водорода локализуются вблизи вакансий в областях пониженной электронной плотности, где их связывание энергетически выгодно при температурах ниже ~500–700 К. Также показано, что деформация решетки существенно влияет на стабильность комплексов: сжатие способствует удержанию водорода вакансией, а растяжение ослабляет связь и может приводить к его вытеснению.

Введение.

Исследование свойств систем «металл-водород» является актуальной темой для исследований, объединяющая в себе различные области науки и техники. Растущий интерес к процессам наводороживания обусловлен широким применением систем «металл-водород» в науке и технике (поглощение ядерных излучений, аккумулирование водорода в гидридах, очистка водорода, разделение его изотопов, разработка новых типов теплообменников, катализаторов и т. д.), а также из-за влияния водорода на материалы и их свойства. Само исследование обусловлено специфическими особенностями, связанными с характером взаимодействия атомов водорода с металлами и сплавами. Данные особенности связаны с высокой подвижностью водорода в металлах и его высокой реакционной способностью – возможностью образовывать сложные сложных комплексов. Поэтому для исследования системы металл-водород необходимо применять различные методы исследования, в том числе компьютерное моделирование.

Методы исследования.

Методика исследования заключалась в моделировании с помощью программного обеспечения XMD (Molecular Dynamics for Metals and Ceramics) четной ячейки ГЦК-решетки никеля 10×10×10 элементарных ячеек (рис. 1). Граничные условия - периодические. Для проведения исследования использовался модифицированный потенциал EAM.

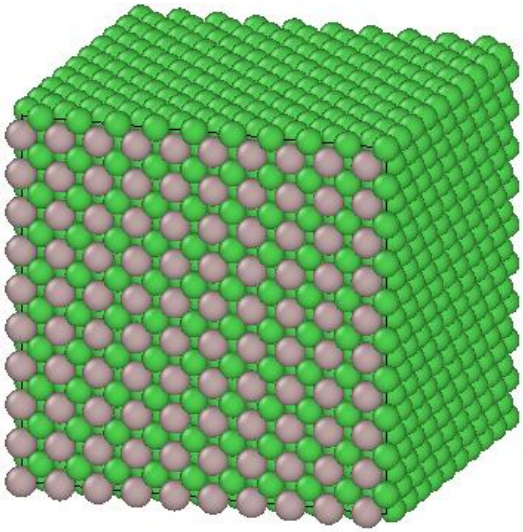


Рис.1. Моделируемая ГЦК-решетка

В тетраэдрическую пору (рис. 2) помещался примесный атом водорода в разном количестве (1, 10, 20, 30, 40, 50).

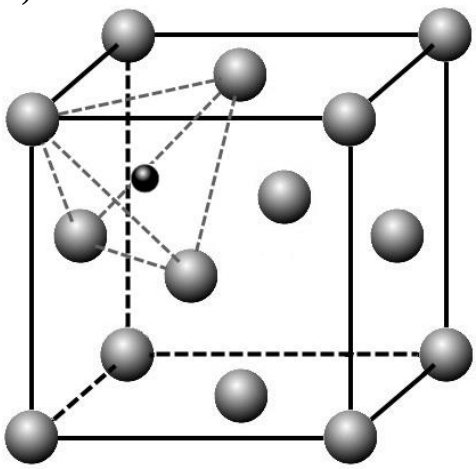


Рис. 2. Расположение примесного атома (выделен черным цветом) в тетраэдрической поре в ГЦК решетке

Оказывалась упругая деформация деформации (сжатие от 0% до -5% с шагом в 1%, растяжение от 0% до +5% с шагом 1%).

Температура расчетной ячейки таже изменялась и составляла 0К, 100К, 300К, 500К, 700К, 900К, 1100К, 1300К. Верхняя граница моделируемой температуры выбиралась из температуры плавления материала.

В ячейку также помещалась вакансия случайным образом, для исследования энергетических изменений, оказываемых ею.

Результаты и обсуждение.

На основе проведенного анализа доступной научной литературы [1-5], взаимодействие атомов водорода с вакансиями в ГЦК-структуре металлов и сплавов – это сложный физический процесс, который можно описать следующими параметрами, основываясь на физике и материаловедении:

- Атом водорода в металле чаще всего располагается в металле как протон, экранированный электронами проводимости. В области вакансии эффект экранирования ослаблен, что влияет на кулоновское притяжение протона к положительным ионами, окружающим его. Такое притяжение усиливается, а вместе с этим происходит перераспределение электронной плотности и стабилизации комплекса.

- При наличии вакансии атом водорода способен занимать различные положения относительно дефекта структуры и это оказывает влияние на расстояние между атомами и энергию системы. В свою очередь, примесный атом водорода действует как «центр расширения», расталкивая соседние атомы, когда как в вакансия в свою очередь имеет противоположный эффект, так как является «центром сжатия», где окружающие вакансию атомы смещаются во внутрь пустоты. При сближении такие противоположные упругие механизмы должны частично компенсировать друг друга, оказывая на энергию системы влияние – снижая ее.

- Взаимодействие примесного атома водорода оказывает влияние на термодинамику и кинетику точечных дефектов. К примеру, внедрение в ГЦК решетки примесного атома водорода снижает энергию образования вакансии.

- Само взаимодействие водорода с вакансией приводит к процессам, ведущих к макроскопическому разрушению решетки в связи с тем, что вакансии захватывают подвижные атомы водорода, где одна вакансия способна последовательно захватить от одного до шести (иногда более) атомов водорода [6-9], что приводит к возникновению наноразмерных комплексы типа «вакансия-водород». Такие комплексы мигрируют как целое и сливаются, образуя ди- и тривакансии, а затем нанопоры.

Таблица 1

Полные энергии различных состояний системы

Конфигурация	Полная энергия, эВ
Идеальный кристалл Ni	−4,4499
Ni с вакансией (0 H)	−4,4495
Ni с вакансией (1 H)	−4,4478
Ni с вакансией (10 H)	−4,4297
Ni с вакансией (20 H)	−4,4069
Ni с вакансией (30 H)	−4,3801
Ni с вакансией (40 H)	−4,3547
Ni с вакансией (50 H)	−4,3248

Получаемые данные демонстрируют постепенное увеличение полной энергии (рис. 3) системы с ростом числа атомов водорода.

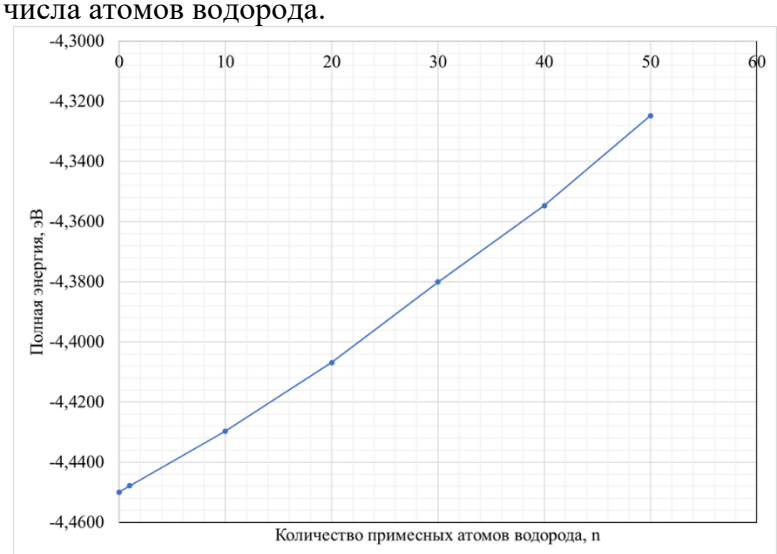


Рис. 3. Зависимость полной энергии от количества примесных атомов

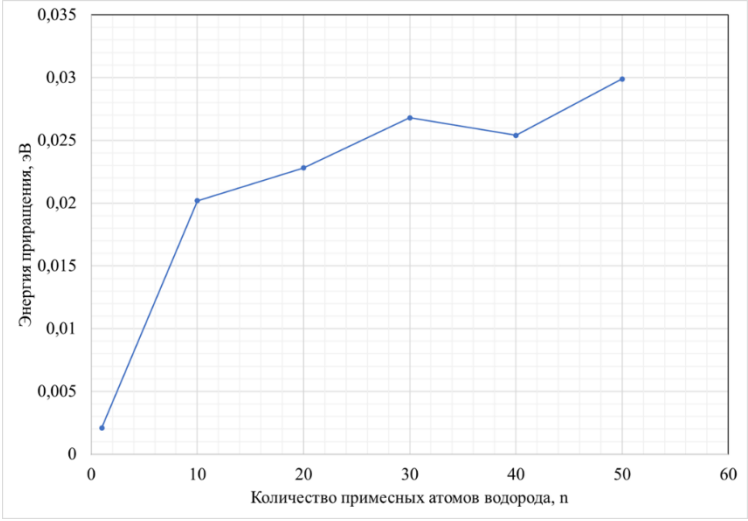
Это свидетельствует о том, что при повышении концентрации H в системе начинают доминировать:

- упругие искажения решётки Ni;
- отталкивание между атомами водорода;
- насыщение энергетически выгодных локальных позиций.

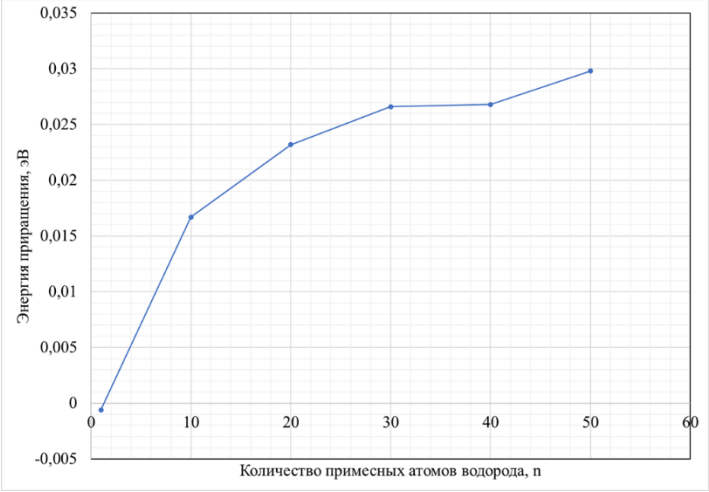
При увеличении количества атомов водорода энергетический вклад каждого дополнительного атома становится всё менее выгодным. Это указывает на насыщение вакансии водородом, переход от локального к коллективному влиянию водорода на кристалл, а также на рост роли H–H взаимодействий.

При сравнении с ранее полученными в литературе [10] данными подтверждается концепция влияния водорода на поведение вакансий в ГЦК-металлах, а также определяется в первую очередь количеством атомов H, ассоциированных с вакансией, и различием их распределения в основном и переходном состояниях миграции.

Энергия захвата (связывания) показывает тренд увеличения насыщения водородом и с каждым шагом увеличения количества атомов вносит больше стабильности. Положительное значение энергии захвата (связывания) показывает на уменьшение общей энергии системы, а следовательно процесс термодинамически благоприятен.



а)



б)

Рис.4. Зависимость энергии связывания от количества примесных атомов:
а- без вакансии; *б*- с вакансией

При появлении одного атома водорода и одной вакансии происходит повышение энергии, что, возможно, объясняется локальным перераспределением электронов из-за вакансии и первый атом водорода располагается в «неблагоприятном» месте. Дальнейший тренд энергии захвата (связывания) в положительном значении и его рост в связи с установлением с большим количеством водорода и понижении энергии термодинамически выгодного процесса. Сама система стабилизируется и заполняются атомами водорода вакансия и ближайшие активные позиции.

Энергия захвата (связывания) имеет положительное значение для всех температур до ~500–700 К, значит присоединение Н термодинамически выгодно. При более высоких температурах (900–1300 К) часть энергий связывания становится отрицательной, а следовательно гидрирование менее выгодно.

С ростом температуры полная энергия системы растет (становится менее отрицательной) так как температура повышает тепловую энергию, увеличивает колебания атомов и делает систему менее стабильной в термодинамическом смысле. Вакансия влияет на локальное изменение энергии захвата (связывания) и начальное присоединение атомов водорода. На низких температурах вакансия снижает начальное связывание водорода, а при высоких температурах эффект вакансии практически исчезает из-за тепловой энергии.

При деформации водород вытесняется из вакансии и это указывает на разрушение связи «вакансия-водород», а также рост локальных напряжений. Такое происходит из-за того влияния упругой деформации, которая усиливает локализации водорода в вакансии (при сжатии) и ослабляет связь «водород-вакансия) (при растяжении). Под напряжением водород диффундирует внутри ГЦК решетки, а также происходит зарождение трещин.

Заключение.

Атомы водорода преимущественно занимают позиции вблизи вакансий, где наблюдается сниженная электронная плотность и локальное растяжение кристаллической решетки. Энергия связывания при малых температурах и умеренных деформациях является положительной, что свидетельствует о термодинамической выгоде формирования комплексов типа «водород-вакансия». Хотя один атом водорода лишь незначительно стабилизирует вакансию, добавление последующих атомов приводит к увеличению энергии связи. Сама вакансия в данном случае выступает в роли энергетической ловушки, что способна удерживать несколько атомов водорода.

Литература:

1. Еремеев, С. В. Влияние примесей d-металлов на границах зерен на сорбцию водорода в палладии / С. В. Еремеев, С. С. Кульков, С. Е. Кулькова // Физическая мезомеханика. – 2010. – Т. 13, № 6. – С. 89-96.

2. Взаимодействие водорода с металлами / Под. ред. Захарова А.П. М.: Наука, 1987. 296 с. 4. Еремеев С.В., Кульков С.С., Кулькова С.Е.

3. Fukai Y., Okuma N. Formation of superabundant vacancies in Pd hydride under high hydrogen pressures // Phys. Rev. Letters. 1994.

4. Гельд П.В., Рябов Р.А., Кодес Е.С. Водород и несовершенства структуры металлов. М.: Металлургия, 1979. 221 с.

5. Кулабухова, Н. А. Взаимодействие примеси водорода с решеточной вакансией в ГЦК металлах / Н. А. Кулабухова, Г. М. Полетаев, М. Д. Старостенков // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2011. – Т. 8, № 2. – С. 85-89. – EDN NUZTMF.

6. Besenbacher, F. Multiple hydrogen occupancy of vacancies in Fe / F. Besenbacher, S.M. Myers, P. Nordlander, J.K. Nørskov // J. Appl. Phys. – 1987. – Т. 61, № 5. – С. 1788–1794.

7. Tateyama, Y. Stability and clusterization of hydrogen-vacancy complexes in α-Fe: an ab initio study / Y. Tateyama, T. Ohno // Phys. Rev. B. – 2003. – Т. 67. – С. 174105-1–174105-10.

8. Mao, J. Thermodynamics of Hydrogen and Vacancies in Metals: A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Doctor of Philosophy / J. Mao. – Houston, 2002.

9. О равновесной концентрации вакансий в сплавах железа с водородом / Д. А. Мирзаев, А. А. Мирзоев, К. Ю. Окишев [и др.] // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математика. Механика. Физика. – 2012. – № 11. – С. 97-104. – EDN OXTDHN.

10. PHYSICAL REVIEW B 91, 094106 (2015)Hydrogen influence on diffusion in nickel from first-principles calculationsYu Wang,1,2 D. Conn´etable,2 and D. Tanguy1

Investigation of the interaction of impurity hydrogen atoms with vacancy

Ziuzin D.I.[1,a], Markidonov A.V.[2,b]

[1]Altai State Technical University named after I.I.Polzunov, 46 Lenin Ave., Barnaul, Russia
[2]Kuzbass Humanitarian and Pedagogical Institute of KemGU, Metallurgov ave., 19, Novokuznetsk
[a] denis.physic96@mail.ru, [b]markidonov_artem@mail.ru

Keywords: computer modeling, hydrogen, metals, point defects, vacancies, binding energy, hydrogen brittleness, hydrogen-vacancy complexes, flooding.

The interaction of impurity hydrogen atoms with a vacancy in a nickel FCC lattice has been studied using molecular dynamic modeling methods using XMD software and the EAM potential. The present work is aimed at studying the effect of temperature, elastic deformation, and hydrogen concentration on the stability of the hydrogen-vacancy complex. It has been experimentally obtained that hydrogen atoms are localized near vacancies in regions of low electron density, where their binding is energetically advantageous at temperatures below ~500-700 K. It is also shown that lattice deformation significantly affects the stability of complexes: compression helps to retain hydrogen by vacancy, while stretching weakens the bond and can lead to its displacement.

УДК 538.911

О возможности изучения дислокационных структур в конструкционных материалах при помощи метода компьютерного моделирования

Маркидонов А.В.[1,a]
[1]Кузбасский гуманитарно-педагогический институт ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», ул. Циолковского 23, Новокузнецк, Россия
[a]markidonov_artem@mail.ru

Ключевые слова: моделирование, кристалл, дислокация, зарождение, смещение

В статье рассматривается роль компьютерного моделирования, в частности метода молекулярной динамики, в исследовании дислокационных структур конструкционных материалов. Проанализированы преимущества метода молекулярной динамики для исследования дефектов кристаллической решетки, включая возможность наблюдения атомарных процессов с фемтосекундным разрешением. Основное внимание уделяется возможностям изучения динамического поведения дислокаций на атомном уровне. Рассмотрены особенности моделирования дислокаций, включая требования к построению расчетных ячеек, граничным условиям и потенциалам межчастичного взаимодействия. Представлены результаты моделирования процессов зарождения и распространения дислокационных петель, в том числе их образования на поверхности пор под действием сдвиговых напряжений. Обсуждается важность понимания особенностей молекулярно-динамического моделирования для корректной интерпретации результатов и их применения при разработке материалов с улучшенными механическими свойствами.

Известно, что дислокации играют определяющую роль в формировании механических и функциональных характеристик конструкционных материалов. Их влияние неоднозначно:

с одной стороны, они обеспечивают пластичность и вязкость материала, а с другой – являются основным механизмом упрочнения.

Понимание роли дислокаций в модификации свойств материалов перешло из чисто научной плоскости в практическую инженерию материалов. Так современные конструкционные материалы создаются, в том числе, и с осознанным управлением дислокационной структурой – ее плотностью, распределением, взаимодействием с другими дефектами. Развитие экспериментальных и вычислительных методов позволяет не только прогнозировать влияние дислокаций на свойства, но и целенаправленно создавать материалы с заданным комплексом характеристик. Будущее конструкционных материалов связано с разработкой стратегий интеллектуального контроля дислокационной структуры в процессе эксплуатации, что откроет путь к созданию адаптивных, самовосстанавливающихся материалов нового поколения. При этом нужно признать, что при современном уровне развития вычислительной техники компьютерное моделирование становиться надежным инструментом для изучения дефектного строения материалов, и, в том числе, дислокационных структур.

Компьютерное моделирование стало неотъемлемой частью современной науки, особенно в области физики конденсированного состояния. Оно позволяет исследователям проводить виртуальные эксперименты, анализировать поведение сложных систем и получать новые знания там, где традиционные методы становятся ограниченными либо невозможными. Одним из наиболее популярных методов является метод молекулярной динамики, который активно используется для изучения свойств материалов на атомном уровне.

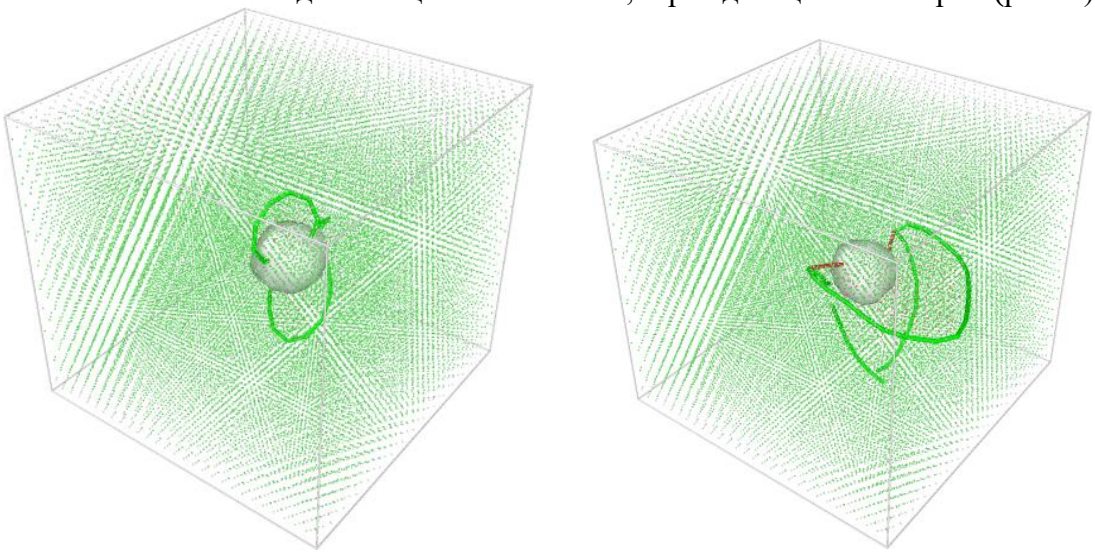
Метод молекулярной динамики (МД) основан на численном интегрировании уравнений движения Ньютона для большого числа частиц системы. Этот метод позволяет отслеживать траектории отдельных атомов или молекул в зависимости от заданных начальных условий и сил взаимодействия между ними. Преимущества метода включают способность изучать динамические процессы, происходящие в веществе, исследовать фазовые переходы, механические свойства и диффузионные явления.

В настоящее время МД предоставляет уникальную возможность изучать дефекты кристаллического строения не как статические искажения решетки, а как динамические объекты, взаимодействующие с окружающей матрицей, эволюционирующие во времени и определяющие ключевые свойства материалов. В отличие от экспериментальных методов, часто дающих усредненную или косвенную информацию, МД позволяет наблюдать атомарные процессы, связанные с дефектами, в «реальном времени» с фемтосекундным разрешением.

Моделирование дислокаций методом МД представляет собой одну из наиболее сложных задач в вычислительной физике конденсированного состояния. В отличие от точечных дефектов, дислокации являются протяженными одномерными объектами, чье корректное построение в моделируемой ячейке требует специальных методологических приемов. Их изучение сталкивается с фундаментальным противоречием: для адекватного описания дальнодействующих полей упругих напряжений требуются макроскопические объемы, но для описания структуры ядра – атомарное разрешение. Кроме того, существует ряд особенностей моделирования дислокаций. Например, необходимо использовать особенные граничные условия, позволяющие создавать периодичность расчетной ячейки только вдоль линии дислокации, для того чтобы дислокация не взаимодействовала со своими виртуальными образами, или же расчетная ячейка должна иметь возможность изменять форму в ответ на создании в ее объеме дислокации. Также необходимо, чтобы потенциалы межчастиного взаимодействия, о которых во многом зависит как скорость, так и точность вычислений, могли корректно описывать большие искажения кристалла, возникающие в ядре дислокаций, и дефекты упаковки, возникающие при расщеплении дислокаций.

Тем не менее при помощи МД удалось детально изучить механизм зарождения и распространения дислокационных петель в материале [1-3]. В частности, автором

рассматривались процессы зарождения дислокаций на поверхности поры под воздействием сдвигового напряжения [4]. Расчет показал, что в случае наличия в кристалле поры образование дислокаций наблюдается при гораздо меньшем угле сдвига, чем необходимо для возникновения дислокации в идеальном кристалле. В данном случае поверхность поры является источником дислокационных петель, зарождающихся попарно (рис. 1).



а *б*

Рис. 1. Визуализация дислокационных линий через 0.225 (а) и 0.625 (б) пс модельного времени в кристалле при создании в расчетной ячейке сдвиговых напряжений (угол сдвига 0.1 рад)

Зарождение дислокационной петли реализуется по следующему механизму. Под воздействием касательных напряжений у поверхности поры формируются области напряжений, в которых наблюдается локальное искажение кристаллической решетки, сопровождающееся наносдвигом. Описанный механизм зарождения дислокационной петли на поверхности поры, предполагающий кооперативный сдвиг группы атомов, согласуется с механизмом, изложенным в работе [6]. Авторы данной работы делают вывод, что для ГЦК металлов испускание порами дислокаций путем наноскопического идеального сдвига является энергетически выгодным процессом.

Также существуют работы, в которых исследователи наблюдают движение винтовых и краевых дислокаций [6-8], а также изучают влияние температуры и давления на подвижность дефектов [9, 10]. Кроме того, исследование скольжения дислокаций позволяет определить энергию активации процесса перемещения и барьеры Пайерлса-Наббаро [11, 12]. Такие расчеты помогают оценить устойчивость материалов к возникновению усталости.

Таким образом, метод МД предоставляет беспрецедентные возможности для изучения дислокаций на атомарном уровне, превратив абстрактные линейные дефекты в динамические, наблюдаемые объекты. Современные методики построения начальных конфигураций позволяют создавать контролируемые дислокационные структуры, а развитие вычислительных подходов – изучать их движение и взаимодействие в условиях, приближенных к реальным.

Однако моделирование дислокаций остается методологически сложной задачей, требующей тщательного учета граничных условий, размерных эффектов и ограничений применяемых потенциалов. Наиболее перспективным направлением является развитие гибридных мультимасштабных подходов, где МД используется для параметризации мезоскопических моделей, что позволяет преодолеть фундаментальные ограничения по временным и пространственным масштабам.

Понимание особенностей МД-моделирования дислокаций критически важно для корректной интерпретации результатов и их переноса на макроскопический уровень, что в конечном итоге способствует разработке материалов с улучшенными механическими свойствами.

Литература:

1. Krasnikov V.S., Mayer A.E. Dislocation dynamics in aluminum containing θ’ phase: Atomistic simulation and continuum modeling // International Journal of Plasticity. 2019. V.119. P.21-42.
2. Безбородова П.А., Красников В.С., Газизов М.Р., Майер А.Е., Погорелко В.В. Сдвиговая прочность Al-Cu сплава с разными типами упрочняющих включений: молекулярная динамика и континуальное моделирование // Известия РАН. Серия физическая. 2023. Т.87. №11. С.1562-1568.
3. Костыгова О.В. Моделирование процесса формирования краевых дислокаций методом молекулярной динамики // Известия ТулГУ. Технические науки. 2018. Вып.1. С.28-31.
4. Маркидонов А.В., Старостенков М.Д., Захаров П.В., Лубяной Д.А., Липунов В.Н. Эмиссия дислокационных петель нанопорами в ГЦК-кристалле под воздействием ударных послекаскадных волн при сдвиговой деформации // Журнал экспериментальной и теоретической Физики. 2019. Т.156. Вып.6. С.1078-1083.
5. Бобылев С.В., Морозов Н.Ф., Овидько И.А. Испускание дислокаций порами в нанокристаллических металлах // Физика твердого тела. 2007. Т.49. Вып.6. С.1044-1049.
6. Старостенков М.Д., Маркидонов А.В., Тихонова Т.А., Медведев Н.Н. Высокоскоростной массоперенос в двумерном кристалле никеля при наличии дислокационных петель различной локальной плотности // Известия ВУЗов. Черная металлургия. 2009. №6. С.57-60.
7. Старостенков М.Д., Потекаев А.А., Маркидонов А.В., Кулагина В.В., Гринкевич Л.С. Динамика краевых дислокаций в слабоустойчивом состоянии ГЦК-системы при облучении высокоэнергетическими частицами // Известия ВУЗов. Физика. 2016. Т.59. №9. С.105-112.
8. Маркидонов А.В., Старостенков М.Д., Захаров П.В., Обидина О.В. Перемещение дислокационных ансамблей в ГЦК кристалле при высокоэнергетическом внешнем воздействии // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2015. Т.12. №3. С.373-381.
9. Захаров П.В., Старостенков М.Д., Медведев Н.Н., Маркидонов А.В., Обидина О.В. Кооперативное поведение межузельных атомов в поле дислокации несоответсвия на границе биметалла Ni-Al // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2012. Т.9. №4. С.431-436.
10. Dang K., Blaschke D.N., Fensin S., Luscher D.J. Limiting velocities and transonic dislocations in Mg // Computational Materials Science. 2022. V.215. 111786.
11. Хон Ю.А., Zapolsky H. Динамические смещения атомов и атермическое скольжение дислокаций в кристаллах // Физика твердого тела. 2020. Т.62. Вып.4. С.517-521.
12. Liu G., Cheng X., Wang J., Chen K., Shen Y. Atomically informed nonlocal semi-discrete variational Peierls-Nabarro model for planar core dislocations Scientific Reports. 2017. V.7. 43785.

On the possibility of studying dislocation structures in structural materials using computer modeling

Markidonov A.V.[1,a]

[1]Kuzbass Humanitarian and Pedagogical Institute of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Kemerovo State University", 23 Tsiolkovskogo St., Novokuznetsk, Russia

[a]markidonov_artem@mail.ru

Keywords: modeling, crystal, dislocation, nucleation, displacement

The article discusses the role of computer modeling, particularly the molecular dynamics method, in the study of dislocation structures in structural materials. It analyzes the advantages of the molecular dynamics method for studying crystal lattice defects, including the ability to observe atomic processes with femtosecond resolution. The focus is on the possibilities of studying the dynamic behavior of dislocations at the atomic level. The article explores the specific features of modeling dislocations, including the requirements for constructing computational cells, boundary conditions, and interparticle interaction potentials. The results of modeling the processes of nucleation and propagation of dislocation loops, including their formation on the surface of pores under the action of shear stresses, are presented. The importance of understanding the features of molecular dynamics modeling for the correct interpretation of the results and their application in the development of materials with improved mechanical properties is discussed.

УДК 621.9.048.4

Сравнительный анализ влияния шаблонов заполнения и геометрии оболочки на прочность FDM-изделий

Камнев А. В.[1,a], Толстошеев Э. В.[1,b] , Усов Д. А.[1,c]
[1]Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия
[a]dadestone@yandex.ru, [c]usovdbulat21@yandex.ru

Ключевые слова: аддитивные технологии, FDM 3D-печать, механическая прочность, шаблон заполнения, толщина оболочки

В работе представлено экспериментальное исследование влияния параметров процесса послойного наплавления (Fused Deposition Modeling или FDM) на механическую прочность изделий. Целью работы являлось определение наиболее эффективной технологии настройки программы печати для достижения максимальной прочности при минимальном расходе материала и времени печати. В качестве объекта исследования использовалась одинаковая «стандартизированная» тестовая модель - крючок, подвергаемая комбинированной нагрузке на растяжение и изгиб. Проанализированы различные шаблоны заполнения (прямолинейный, сетчатый, треугольный, зигзагообразный и соты) при фиксированной плотности, а также влияние вариации плотности заполнения (0-100%) и количества контурных оболочек.

Введение.

Широкое распространение технологии *FDM* актуализирует задачу прогнозирования и управления механическими свойствами получаемых изделий. На конечные характеристики влияет комплекс факторов: свойства материала, ориентация на платформе, температурные режимы и, в значительной степени, параметры слайсинга [1, 2, 3]. Распространенной, но не всегда обоснованной практикой среди пользователей является стремление повысить прочность исключительно за счет увеличения плотности внутреннего заполнения (*Infill Density*), что ведет к перерасходу материала и времени [4, 5]. Данное исследование ставит целью экспериментально проверить это на практике и определить наиболее эффективные параметры печати: плотность заполнения и количество контурных оболочек при проверке изделия на прочность.

Методика экспериментального исследования.

Объектом исследования являлась одинаковая «стандартная» модель крючка (рис. 1). Конструкция крючка создает комбинированное нагружение (рис. 1(а)) его критической зоны (рис. 1(б)) на растяжение и изгиб (см. рис. 1(в)) за счет плеча рычага (рис. 1(г)), что моделирует типичные для реальных деталей условия.

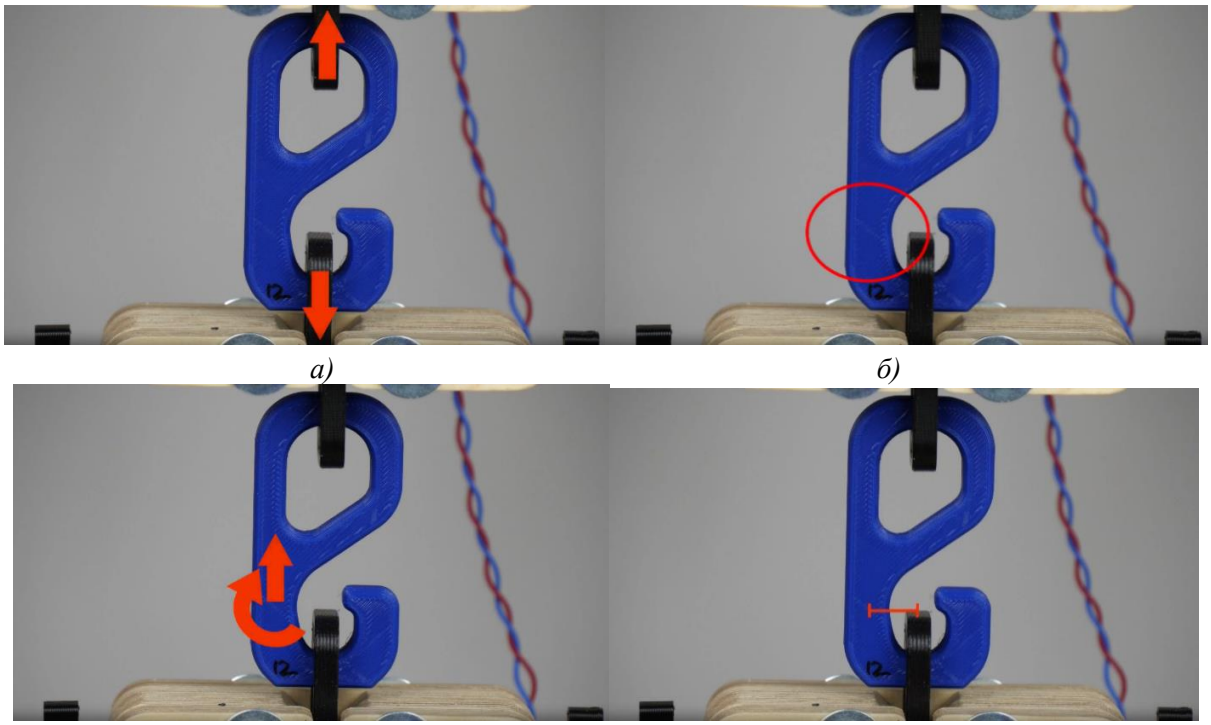
Все образцы изготовлены на 3D-принтере *Pol&Lite* с использованием филамента из полилактида *(PLA)*. Высота слоя составила 0,2 мм. Для генерации *G*-кода использовалось программное обеспечение Simplify3D.

План эксперимента:

1. Оценка шаблонов заполнения. При фиксированной плотности заполнения 30%, двух оболочек, 4 нижних и 5 верхних слоях были протестированы шаблоны: *Rectilinear, Grid, Triangular, Wiggle, Fast Honeycomb, Full Honeycomb* (рис. 2).

2. Оценка плотности заполнения. Для шаблонов *Rectilinear* и *Full Honeycomb*, как наиболее прочных при оценке шаблонов заполнения, была проанализирована зависимость прочности от плотности заполнения в диапазоне 0-100%.

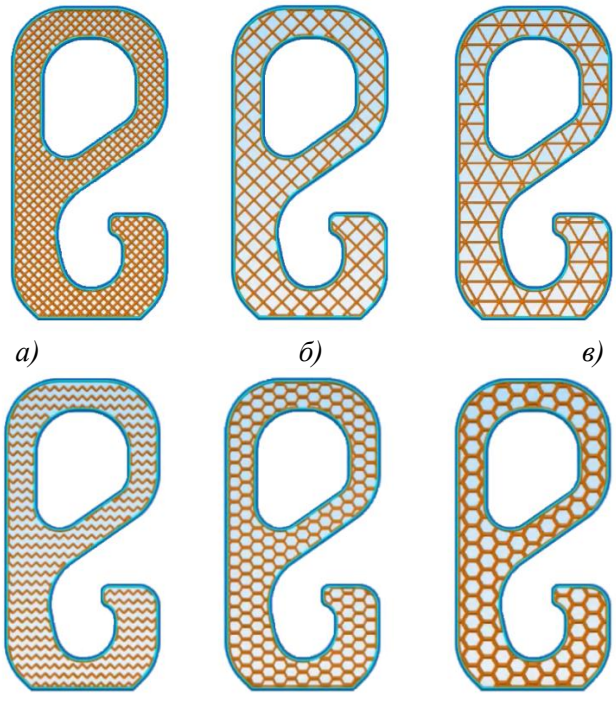
3. Оценка влияния толщины оболочки. При минимальной плотности заполнения (15%) были напечатаны образцы с количеством оболочек 2, 3, 4 и 6. Количество верхних/нижних слоев коррелировалось для сохранения общей толщины стенок.



а) *б)*

в) *г)*

Рис. 1. Внешний вид крючка, установленного на разрывной машине:
а – места приложения нагрузки к крючку; *б* – критическая зона крючка; *в* – направления растяжения и изгиба крючка; *г* – плечо рычага при разрыве



а) *б)* *в)*

г) *д)* *е)*

Рис. 2. Испытуемые шаблоны заполнения:
а - Rectilinear, б - Grid; в - Triangular, г - Wiggle, д - Fast Honeycomb, е - Full Honeycomb

Каждый образец подвергался квазистатическому растяжению до разрушения на разрывной машине. Фиксировалась максимальная нагрузка (кг). При последующей оценке заполнения дополнительно определялась масса образца и время печати.

Результаты экспериментальных исследований.

1. При исследовании различных шаблонов заполнения, дающих 30-ти % плотность, наибольшую прочность показал шаблон *Triangular*, за ним следуют *Full Honeycomb* и *Fast Honeycomb*. Худшие результаты у шаблонов *Rectilinear* и *Wiggle* (табл/ 1). Однако анализ

соотношения «прочность/масса» выявил, что сотовые шаблоны *Honeycomb* являются наиболее экономичными, обеспечивая достаточно высокую прочность при меньшем фактическом весе образца по сравнению с *Triangular*. Время печати варьировалось от 48,3 мин - *Rectilinear* до 56,5 мин –*Wiggle*.

Таблица 1

Исследуемые шаблоны

Вид шаблона заполнения	Время печати, мин	Масса детали, г	Максимальная выдерживаемая нагрузка, кг
Rectilinear	48,3	8,93	48
Grid	50,9	9,36	54
Triangular	53,1	9,98	60
Wiggle	56,5	8,91	45
Fast Honeycomb	56,3	8,86	57
Full Honeycomb	55	8,88	57

2. При плотности заполнения шаблоны *Rectilinear* и *Full Honeycomb* демонстрируют наиболее сопоставимую прочность, а после повышение плотности заполнения свыше 50%, *Rectilinear* обеспечивает аналогичную прочность при меньшем времени печати (рис. 3). Это указывает на снижение эффективности затрат материала и времени при высоких значениях плотности (табл. 2).

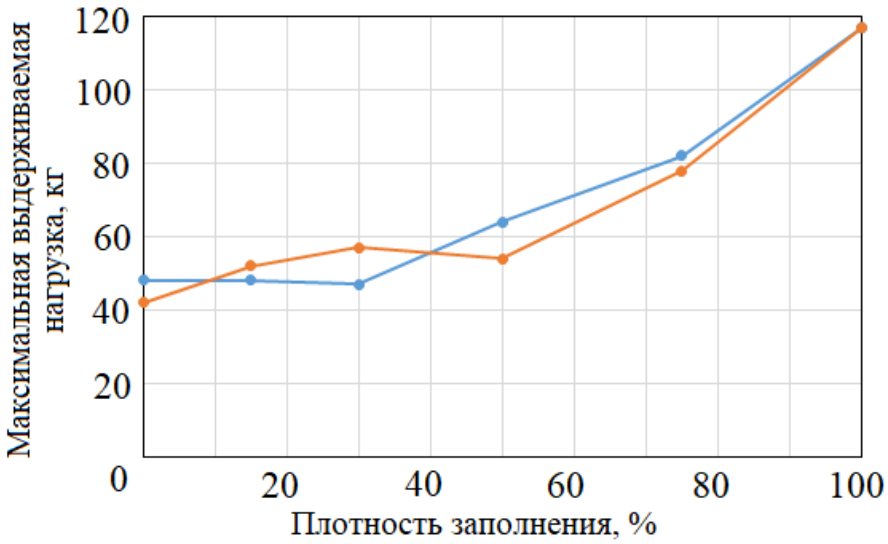


Рис. 3. Графики зависимости максимальной выдерживаемой нагрузки от плотности заполнения: ● - *Rectilinear*; ● - *Full Honeycomb*.

3. Увеличение количества оболочек с 2 до 6 при постоянной низкой плотности заполнения (15%) привело к радикальному росту прочности. Образец с 6 оболочками достиг прочности, эквивалентной образцу с 2 оболочками и 100% заполнением, но при существенно меньшей массе (рис. 4) и табл. 3.

Таблица 2

Зависимость максимальной выдерживаемой нагрузки от плотности заполнения

Плотность заполнения, %	0	15	30	50	75	100
Rectilinear						
Максимально выдерживаемая нагрузка, кг	48	48	47	64	82	117
Full Honeycomb						
Максимально выдерживаемая нагрузка, кг	42	52	57	54	78	117

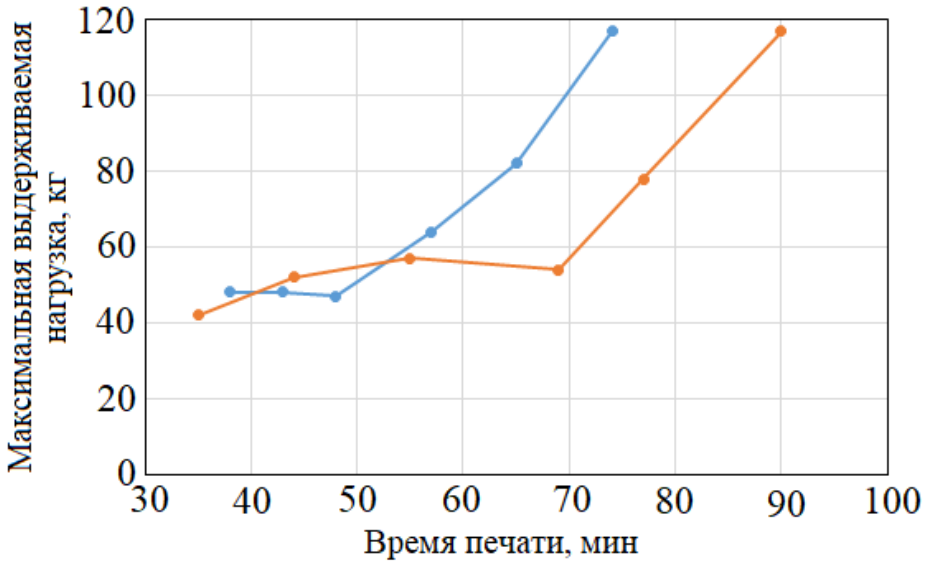


Рис. 4 - Графики зависимости максимальной выдерживаемой нагрузки от времени печати: • - *Rectilinear*; • - *Full Honeycomb*.

Таблица 3

Зависимость максимальной выдерживаемой нагрузки от плотности заполнения

Rectilinear						
Максимально выдерживаемая нагрузка, кг	48	48	47	64	82	117
Время печати, мин	38	43	48	57	65	74
Full Honeycomb						
Максимально выдерживаемая нагрузка, кг	42	52	57	54	78	117
Время печати, мин	35	44	55	69	77	90

При изгибе максимальные напряжения возникают в поверхностных слоях детали, в то время как материал в нейтральной оси нагружен минимально. Поэтому добавление материала в зоне, наиболее удаленной от центра (увеличение оболочек), эффективнее увеличивает момент сопротивления сечения, чем равномерное распределение материала по всему объему (увеличение заполнения). Кроме того, ориентация нити в контурах часто совпадает с направлением главных нагрузок, в отличие от меняющего направление внутреннего заполнения.

Выводы.

Проведенное исследование позволяет сформулировать практические рекомендации для повышения прочности *FDM*-деталей:

1. Увеличение количества контурных оболочек (толщины стенки) является наиболее эффективным способом повышения прочности и жесткости детали при минимальном приросте расхода материала. Плотность внутреннего заполнения является вторичным параметром. Ее значение редко целесообразно поднимать выше 50%. Для большинства силовых деталей оптимальным является диапазон 15-30%.
2. Среди шаблонов заполнения сотовые структуры (*Honeycomb*) показали наилучшее соотношение «прочность/масса», в то время как линейный шаблон (*Rectilinear*) представляет собой хороший компромисс между скоростью, надежностью и качеством верхних слоев.
3. Рекомендуемая базовая настройка для прочных деталей: 3-4 контурных оболочек и плотность заполнения 20-30% (сотовый или линейный шаблон): данная конфигурация обеспечивает высокую удельную прочность, экономию материала и минимизацию рисков, связанных с усадкой и деформацией при печати массивных изделий.

Литература:

1. Оптимальное объемное содержание ячеистых заполнителей для ударопрочных элементов конструкций, получаемых по технологии FDM / Е. В. Ломакин, Л. Н. Рабинский, А. В. Бабайцев, Ю. О. Соляев // Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки. – 2022. – Т. 505, № 1. – С. 73-77.

2. Особенности подготовки моделей для печати на 3D-принтере, выполненных в Компас-3D / И. В. Субботина, С. В. Максимова, И. И. Зубова, Е. В. Рыбакова // Вопросы строительства и инженерного оборудования объектов железнодорожного транспорта : Материалы научно-практической конференции, Новосибирск, 22 марта 2017 года / СГУПС. – Новосибирск: Сибирский государственный университет путей сообщения, 2017. – С. 263-269.

3. Колесников, А. А. Ситуационное управление обеспечением качества изготовления изделий по технологии печати на 3d принтере на основе технологии FDM / А. А. Колесников // Техника и технология: новые перспективы развития. – 2014. – № XII. – С. 77-79.

4. Богаткин, М. А. Особенности подготовки 3D-модели к печати на FDM 3D-принтере на примере программы PrusaSlicer / М. А. Богаткин // Постулат. – 2023. – № 7(93).

5. Кузнецов, А. Е. Основные факторы, влияющие на прочность изделий при печати на 3D-принтере / А. Е. Кузнецов, В. М. Соколова // Химия и химическая технология: достижения и перспективы : СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ V ВСЕРОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ, Кемерово, 26–27 ноября 2020 года. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2020. – С. 118.1-118.5.

Comparative analysis of the impact of filling patterns and shell geometry on the strength of FDM products

Kamnev A.V.[1,a] , Tolstosheev E.V[1,a] , Usov D.A.[1,b]
[1] Bratsk State University, 40 Makarenko st., Bratsk, 665709, Russian Federation
[a]dadestone@yandex.ru, [b]usovdbulat21@yandex.ru

Keywords: additive technologies, FDM 3D printing, mechanical strength, filling pattern, shell thickness

The paper presents an experimental study of the effect of the parameters of the layer-by-layer welding process (Fused Deposition Modeling or FDM) on the mechanical strength of products. The goal of the study was to determine the most effective printing program configuration technology to achieve maximum strength with minimal material consumption and printing time. A standardized test model (a hook) subjected to combined tensile and bending loads was used as the object of the study. Various filling patterns (linear, mesh, triangular, zigzag, and honeycomb) were analyzed at a fixed density, as well as the effect of varying the filling density (0-100%) and the number of contour shells.

УДК 62-762

Анализ воздействия потока жидкости в торцевом уплотнении на износ деталей магистрального насоса для транспортировки нефти

Кленичева А.Ю. [1,a], Корзиков Е.А. [1,b]
[1]Брянский государственный технический университет, бульвар 50 Октября, д. 7, г. Брянск, Россия
[a]klenicheva.anastasia@yandex.ru

Ключевые слова: торцевое уплотнение, износ, магистральный насос, пара трения.

В статье рассматриваются ключевые аспекты обеспечения износостойкости деталей торцевых уплотнений, используемых в магистральных насосах. Уплотнения играют критическую роль в предотвращении утечек и увеличении надежности работы насосного оборудования. Проводится анализ современных материалов и технологий, применяемых для повышения износостойкости, включая композиты и специальные покрытия. Также поднимается тема методов испытаний и оценок долговечности уплотнительных элементов в условиях эксплуатации. Результаты исследования направлены на оптимизацию производственных процессов и улучшение эксплуатационных характеристик насосов, что способствует повышению их эффективности и снижению затрат на обслуживание. Цель работы – выявить ключевые гидродинамические факторы, влияющие на износ контактирующих поверхностей уплотнения, и установить взаимосвязь между параметрами потока и деструктивными процессами в материале.

Ввведение.

Для обеспечения герметичности и предотвращения протечек перекачки жидкости насосного оборудования используются торцевые уплотнения (рис. 1). В результате проведения анализа отказов торцовых уплотнений, было обнаружено, что основной причиной выхода их из строя является перегрев и недостаток смазочных средств в результате сухого хода насоса. Это приводит к перегреву соприкасающихся деталей торцевых уплотнений, поэтому отечественная и современная наука не прекращает попытки решить проблему.

а)

б)

в)

Рис. 1. Износ торцевого уплотнения:
а – втулка торцевого уплотнения; *б* – сектор плавающий; *в* – кольцо вращающееся

Торцевое уплотнение состоит из пары трения, которая является поверхностью вращения, установленной так, что расположена перпендикулярно оси вращающегося вала. При этом одно из колец зафиксировано и установлено либо в корпусе, либо во фланце оборудования, такое кольцо называют контркольцо. Материалами колец обычно служат специальные материалы (например, карбид кремния), которые должны обеспечить твёрдость и износостойкость. При этом они должны также обладать повышенной теплопроводностью и малым коэффициентом трения [1].

Для обеспечения заданной температуры между рабочими поверхностями в торцевых уплотнениях необходимо поддерживать тонкую плёнку жидкости, которое не приведет к образованию сухого трения. При образовании сухого трения в зазоре между ответным и упорным кольцами жидкостных торцевых уплотнений происходит их повышенный износ. При возникновении повышенной температуры рабочих поверхностей ответного и упорного кольца тонкая плёнка смазочной жидкости испаряется через зазоры в торцевом уплотнении [2]. Повышение температуры рабочих поверхностей и испарение смазочной пленки осуществляется при ее минимальной толщине в следствие которой коэффициент трения принимает значение выше теоретического из-за недостаточной смазки граней по следующей формуле:

$$f_{mp} = \frac{F_{mp}}{N} \quad (1)$$

Также к основной причине повышенного износа рабочих поверхностей можно отнести неравномерный нагрев [3]. При термической деформации изменяется форма поверхностей и из-за этого рабочая поверхность становится выпуклой. Это показало, что термическая деформация оказывает большее влияние, чем механическая деформация [4]. Также было показано, что деформации из-за давления в торцевых уплотнениях насосов оказывают меньшие деформации, чем деформации, вызванные нагревом.

Методы и средства.

Важным фактором повышения надежности и эффективности является выбор материалов, так как вращающееся кольцо соприкасается с корпусом торцевого уплотнения. Кольца должны обеспечивать износостойкость, теплопроводность и химическую устойчивость в заданных режимах эксплуатации. Изготовление уплотнительных колец включает в себя использование металлические, керамические и полимерные материалы. Для определения химических элементов в детали пар трения проводится спектрометрический анализ на приборе Искролайн 100 с рабочим спектральным диапазоном 167-460 нм. Принцип работы спектрометра основан на методе эмиссионного анализа, использующий зависимость интенсивности спектральных линий от содержания элемента в пробе. Для определения отклонений от номинала были проведены измерения с помощью индикаторной шкалы часового типа с ценой деления 0,01 мм на установке в виде призмы.

Результаты и обсуждения.

В результате определения химического состава установлено, что пара трения состоит из карбида кремния, а неподвижная часть торцевого уплотнения из высокохромистой стали, результаты проведенных испытаний приведены на рис. 2.

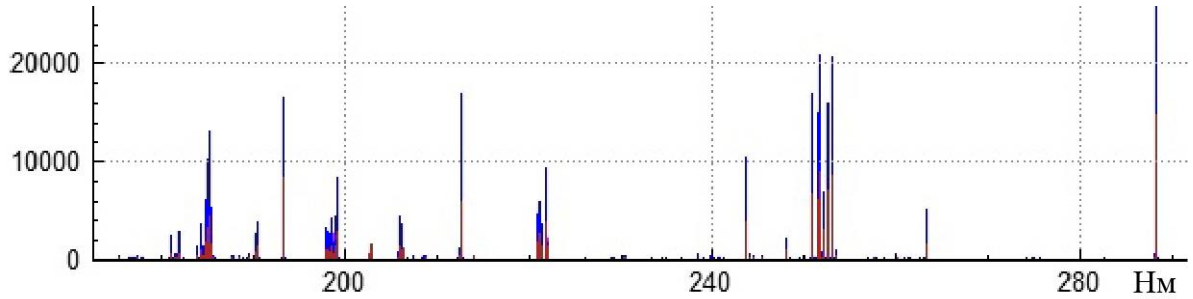


Рис. 2. Ближайшие сплавы по составу

При проверке отклонения от номинала (за номинал принимаем размер неизношенной втулки, предоставленный заводом изготовителем) сечений торцевого уплотнения, представленная на рис. 3.

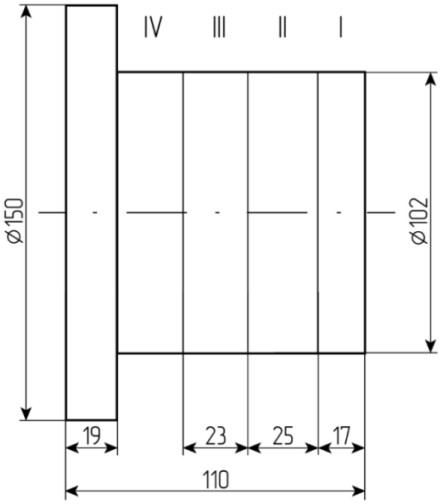
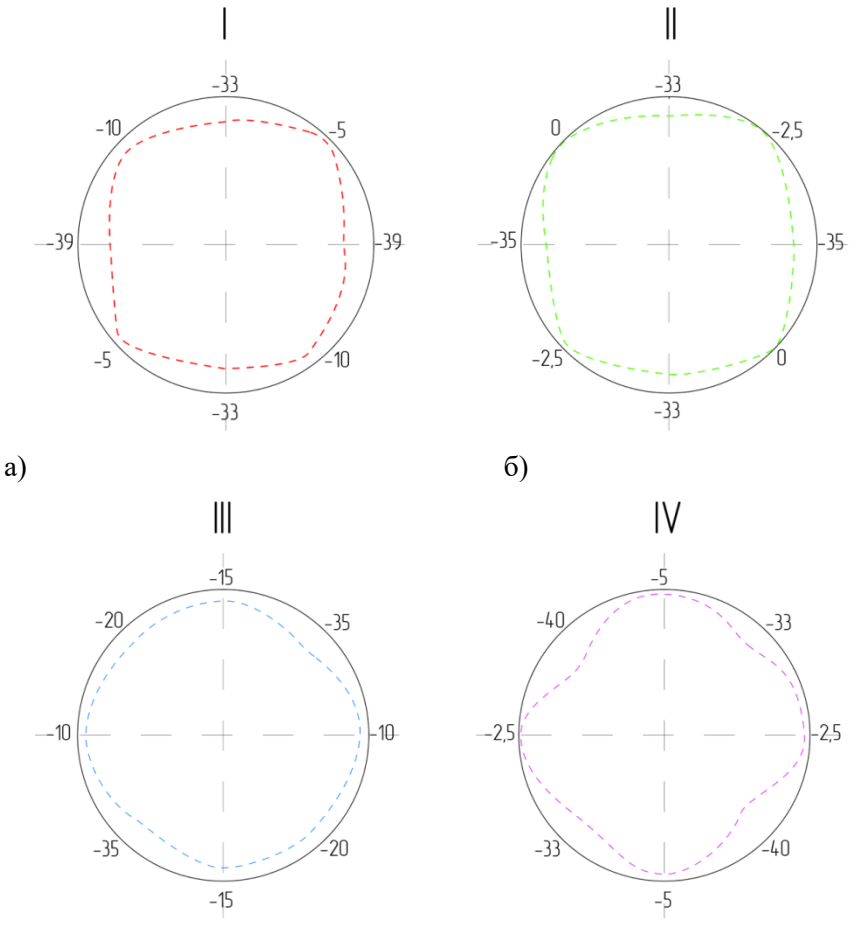


Рис. 3. Схема торцевого уплотнения

В ходе проведенных испытаний были получены следующие результаты: в сечение 1 (рис. 4, а) минимальное отклонение составило 0,5 мм, максимальное 0,39 мм; в сечение 2 (рис. 4, б) минимальное отклонение составило 0 мм (данная поверхность соприкасается с плавающим сектором из графита), максимальное 0,35 мм.



а) б)

в) г)

Рис. 4. Результаты измерений

В сечение 3 (рис. 4, в) минимальное отклонение составило 0,10 мм, максимальное 0,35 мм; в сечение 4 (рис. 4, г) минимальное отклонение составило 0,05 мм, максимальное 0,40 мм (данная поверхность соприкасается с кольцом пары трения).

Выводы.

В ходе проведенного исследования было выявлено, что втулка торцевого уплотнения изнашивается в ходе неравномерного потока жидкости, а также из-за неровного расположения втулки на самом валу, что приводит к неравномерному износу.

Литература:

1. Lebeck, AO. Principles and design of mechanical face seals. John Wiley & Sons: New York, 1991

2. Жанахутдинов С.Г., Богомолов А.В. Способы отвода тепла от поверхностей торцевых уплотнений // Наука и техника Казахстана. 2019. №4. стр.90-94

3. Pape, JG. Fundamental research on a radial face seal. // ASLE Trans 1968; 11: 302-9.

4. Li, CH. Thermal deformation in a mechanical face seal. // ASLE Trans 1976; 19(2): 146-52.

5. Кленичева А.Ю. Исследования свойств металлов торцового уплотнения после эксплуатации / А. Ю. Кленичева // Совершенствование энергетических машин: Сборник научных трудов материалов конференции, Брянск, 26 марта 2025 года. Курск: ЗАО «Университетская книга», 2025. С. 113-115.

6. Ващишина А. П. Анализ причин изнашивания элементов насоса нефтепровода / А. П. Ващишина, Е. В. Лукашова, А. Ю. Кленичева // Совершенствование энергетических машин: Сборник научных трудов материалов конференции, Брянск, 26 марта 2025 года. Курск: ЗАО «Университетская книга», 2025. С. 122-124. EDN OIJZGY.

Analysis of the effect of fluid flow in a mechanical seal on the wear of oil transportation pump parts

Klenicheva A. Yu.[1.a], Korzikov E. A.[1,b]
[1]Bryansk State Technical University, 50 Oktyabrya Boulevard, Bldg. 7, Bryansk, Russia
[a]klenicheva.anastasia@yandex.ru

Keywords: mechanical seal, wear, mainline pump, friction pair.

This article examines key aspects of ensuring wear resistance in mechanical seal components used in mainline pumps. Seals play a critical role in preventing leaks and increasing the reliability of pumping equipment. Modern materials and technologies used to improve wear resistance, including composites and special coatings, are analyzed. The topic of testing methods and assessing the durability of sealing elements under operating conditions is also addressed. The research results are aimed at optimizing production processes and improving pump performance, thereby increasing their efficiency and reducing maintenance costs. The goal of the study is to identify key hydrodynamic factors influencing wear on seal contact surfaces and to establish the relationship between flow parameters and destructive processes in the material.

УДК 621.762

О новых возможностях применения композиционных материалов в машиностроении и ремонте

Марков А.Н.[1,a], Марков В.А.[1,b], Соколова В.А.[1,c], Войнаш С.А.[2,d], Наседкин И.В.[3,e]

[1]Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, Высшая школа технологии и энергетики, ул. Ивана Черных 4, Санкт-Петербург, Россия
[2]Рубцовский индустриальный институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», ул. Тракторная 2/6, Рубцовск, Россия
[3]ФГКВОУ ВО «Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного», Тихорецкий проспект, д. 3, Санкт-Петербург, Россия
[a]markovan-63@mail.ru, [b]mactor85@mail.ru, [c]sokolova_vika@inbox.ru,
[d]sergeyvoinash@yandex.ru, [e]nasedkin.i@rambler.ru

Ключевые слова: композиционные материалы, порошковая металлургия, восстановление деталей, износостойкие покрытия, машиностроение, спекание, пресс-форма, подшипники скольжения, технология ремонта.

В статье рассматриваются современные возможности применения композиционных материалов на основе металлических порошков в машиностроении и ремонтной отрасли. Анализируются основные направления развития порошковой металлургии, позволяющие получать детали с широким диапазоном физико-механических свойств. Особое внимание уделено технологии восстановления изношенных деталей машин (втулок, подшипников скольжения) методом холодного прессования с последующим высокотемпературным спеканием. Представлены химический состав перспективных порошковых материалов на железной основе, а также конструкция специализированной пресс-формы для нанесения покрытий. Описаны оптимальные режимы технологического процесса (давление прессования, температура и время спекания), обеспечивающие высокую прочность сцепления покрытия с основой. Отмечены преимущества метода (экологичность, безотходность) и его ограничения, связанные с недостаточной несущей способностью для тяжелонагруженных деталей.

Композиционные материалы (композиты) – это многокомпонентные материалы, изготовленные из двух или более компонентов с существенно различными физическими и или химическими свойствами. Вместе эти элементы создают уникальные свойства, недостижимые по отдельности.

Благодаря возможности получения материалов с широким диапазоном физико-механических свойств, достигаемых за счет варьирования химическим составом порошков, порошковая металлургия получила широкое распространение [2].

Порошковая металлургия – отрасль технологии, занимающаяся производством металлических порошков и деталей из них. Сущность порошковой металлургии заключается в том, что из металлического порошка или смеси порошков прессуют заготовки, которые затем подвергают термической обработке - спеканию. В данной работе особый акцент внимания будет сконцентрирован на применении композиционных материалов на металлической основе.

Типовыми деталями конструкционного назначения, изготовленные методом порошковой металлургии, являются шестерни, звездочки, кулачки, накладки, корпуса, втулки, кольца, колпачки и другие детали машин [2]. На рис.1 представлены образцы номенклатуры деталей, изготовленные применением порошковой металлургии.

Рис.1. Образцы номенклатуры деталей, изготовленные применением порошковой металлургии

На заводе порошковой металлургии «Композит» кроме традиционных групп деталей изготовленных применением порошковой металлургии освоен выпуск резцов и резцовых вставок (рис. 2), которые находят самое широкое распространение в современном машиностроении.

Рис.2. Резцы и режущие вставки

В настоящее время номенклатура изделий, получаемая методами порошковой металлургии, насчитывает более 200 наименований и постоянно увеличивается.

В современных условиях дефицита запасных частей, а также их стоимости порошковая металлургия все чаше стала использоваться для восстановления деталей машин отечественного и импортного производства.

Порошковые материалы, используемые для нанесения покрытий, подразделяются на следующие группы: металлы и сплавы, интерметаллиды, карбиды, нитриды, бориды, силициды, литые твердые сплавы. В России и за рубежом для нанесения покрытий разработано около 100 марок порошковых материалов. Данные показывают, что из общего потребного количества порошковых материалов половину составляют порошки на основе железа и никеля [5]. Химический состав наиболее распространенных композиционных материалов, изготовленных на основе железного порошка, представлен в табл.1 [2].

В рамках данной области применения композиционных материалов была разработана перспективно новая технология восстановления деталей машин на основе применения композиционных материалов.

В качестве материалов для восстановления изношенных поверхностей деталей машин выбраны композиционные материалы, изготовленных на основе железного порошка, так как они наиболее соответствуют условиям эксплуатации деталей машин, применяемым в тракторостроении и машиностроении, а также учитывалась экономическая составляющая их использования.

Таблица 1

Химический состав композиционных материалов, изготовленных на основе железного порошка

Марка материала	Содержание легирующих элементов, %					
	железо	углерод	медь	никель	молибден	Олово
Ж-6,6	100	-	-	-	-	-
Ж-7,3	100	-	-	-	-	-
Жгр0,5-7,3	основа	0,4-0,6	-	-	-	-
Жгр1-6,6	основа	0,6-1,0	-	-	-	-
ЖД3-6,6	основа	-	2,5-3,0	-	-	-
ЖД3Н2-6,6	основа	-	2,5-3,0	1,6-2,0	-	-
ЖД5Н5-6,6	основа	-	4-5	4-5	-	-
ЖД1703-6,9	основа	-	16-17	-	-	2,5-3,0
ЖД302-6,6	основа	-	2,5-3,0	-	-	1,5-2,0
ЖГр0,4Д443-6,6	основа	0,4-0,6	3,4-4,0	2,5-3,0	-	-
ЖД2М3М-7,3	основа	-	2,6-2,5	2,5-3,0	0,8-1,0	-

В основе технологического процесса нанесения композиционных материалов на поверхность детали заложены формообразующие свойства данных материалов при использовании холодного прессования и высокотемпературного спекания покрытий. Рассмотрим применение композиционных материалов на примере нанесения износостойких покрытий на рабочие поверхности стальных втулок. При этом необходимо учесть тот, факт, что на стадии восстановления стальной втулки внутренний диаметр ее должен быть больше номинального на величину заданной толщины наносимого покрытия, которая может составлять от 1,5 мм до 2 мм [3].

Перед нанесением композиционного материала на основу детали необходимо произвести просушку его при температуре 150°…200°С в течение одного часа в сушильном шкафу типа Ш-0.05, при периодическом встряхивании и перемешивании. Дозировку композиционного материала необходимо выполнить при помощи аналитических весов ВА-200 с точностью определения массы порошка +0,01 грамм.

Холодное прессование композиционного материала в закрытых пресс-формах (рис.3) производится с использованием гидравлических, пневматических или электрических прессов [1].

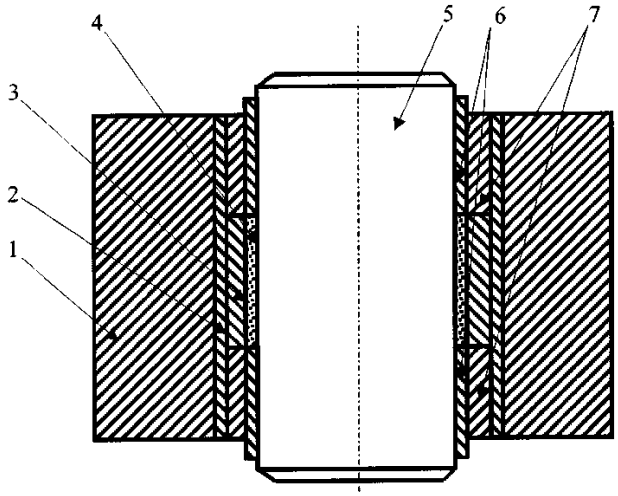


Рис. 3. Схема пресс-формы:
1– матрица; 2 – сменная втулка; 3 – деталь; 4 – покрытие; 5 – стержень;
6 – нижний и верхний пуансоны; 7 – нижняя и верхняя втулки

Пресс-форма работает следующим образом: необходимый объем порошковой композиции 4 при помощи воронки засыпается в зазор между стержнем 5, восстанавливаемой деталью 3 и неподвижными втулками 7, запрессованными в корпусе сменной втулки 2, а затем уплотнение ее производится встречным перемещением пуансонов 6 под воздействием давления пресса.

После процесса холодного прессования порошков необходимо произвести разборку пресс-формы и выполнить визуальный контроль качества полученного покрытия, если есть сколы на базовой длине его, по краям необходимо произвести допрессовку композиционного материала, снова собрав пресс-форму.

Окончательно физические и эксплуатационные свойства спрессованных порошковых материалов формируются в процессе высокотемпературного спекания. Практической целью спекания является достижение определенного уровня требуемых свойств, формирующихся в процессе нагрева исходного порошкового тела и обеспечения надежного сцепления покрытия с основой [3]. Для реализации данного процесса применяются вакуумные печи периодического действия типа СНВ-1.3.1./20И1.

В качестве образцов для проведения исследований по применению композиционных материалов по вышеописанной технологии выбраны наиболее распространённые в машиностроении подшипники скольжения, имеющие внутренние диаметры 35 мм и 45 мм, изготовленные из конструкционной углеродистой качественной стали марки 45.

Рис. 4. Образцы для проведения исследований

С учетом физико-механических свойств композиционных материалов и их себестоимости для проведения экспериментальных исследований выбран порошок марки ЖД5Н5-6,6 [4].

К режимам нанесения покрытия применительно для подшипников скольжения относятся: давление прессования Р = 475...500 МН/м^2, температура спекания Т = 1100...1150°С, время выдержки при температуре спекания τ = 2,27...2,38 часа, при обеспечении шероховатости внутренней поверхности детали R_z = 150...160мкм. При этих режимах достигаются высокие эксплуатационные показатели надежности получаемых покрытий, а именно прочность сцепления покрытия с основой составила $\tau_{сц}$ = 80...100 МПа, износостойкость шарнирных сопряжений I = 110…115 ч/мм [1, 4].

В работе разработана пресс-форма для восстановления крупногабаритных втулок с внутренним диаметром, превышавшим 100 мм. На рис.5 представлено фото пресс-формы, позволяющее реализовать вышеуказанную технологию.

Рис. 5. Пресс-форма (разобранная – сверху, в сборе – снизу)

Особенностью проектирования таких пресс-форм является тот факт, что при больших перемещениях пуансонов в процессе деформирования композиционных материалов они испытывают значительные напряжения сжатия и как следствие ломаются. Поэтому для решения такой проблемы все рабочие детали пресс-формы требуется изготавливать из высокоуглеродистых инструментальных сталей марок У8, У9, У10, У11А прошедших термическую обработку и улучшение. Для получения качественной поверхности наносимого порошкового покрытия поверхности стержня и пуансонов должны быть отшлифованы и перед использованием смазаны тонким слоем графитовой смазки.

Перед изготовлением пресс-форм все линейные размеры ее рабочих деталей необходимо проверить на прочность по контактным напряжениям сжатия.

Выводы.

1. Применение композиционных материалов является перспективным направлением современного машиностроения и ремонта деталей машин.

2. Изготовление деталей методами порошковой металлургии, а также и ремонт относится к экологически чистым и безотходным технологиям, так как практически весь композиционный материал, используемый при данных процессах, переходит в основной металл.

3. Технологический процесс восстановления деталей применением композиционных материалов не требует последующего проведения термической и механической обработки

после нанесения покрытия, что в значительной степени сокращает себестоимость ремонта деталей в целом

4. Благодаря возможности использовать различные порошки в составе композиционных материалов можно получить покрытия с оптимальными физико-механическими свойствами.

5. Основным недостатком применения композиционных материалов при восстановлении деталей машин является низкая прочность сцепления покрытия с основной τ = 50...80 МПа, что весьма ограничивает применение данного способа к восстановлению тяжело нагружённых деталей машин.

Литература:

1. Балихин В.В., Быков В.В., Иванов Н.Ю. Технология ремонта машин и оборудования: Учеб. для студентов вузов. Санкт-Петербург: СПбГЛТА, 2006. 523 с.

2. Григорьев А.К., Грохольский Б.П. Порошковая металлургия и применение композиционных материалов: Опыт внедрения. Л.: Лениздат, 1982. 143 с.

3. Анциферов В.Н., Бобров Г.В., Дружинина Л.К. и др. Порошковая металлургия и напиленные покрытия: Учебник для вузов. М.: Металлургия, 1987. 792 с.

4. Марков А.Н. Повышение долговечности подшипниковых узлов лесных машин применением композиционных материалов: дис. ... канд. техн. наук. ЛТА, 1996.

5. Черноиванов В.И., Лялякин В.П., Голубев И.Г. Организация и технология восстановления деталей машин: науч. издание. ФГБНУ «Росинформагротех», 2016. 568 с.

On new possibilities of composite material applications in mechanical engineering and repair

Markov A.N.[1,a], Markov V.A.[1,b], Sokolova V.A.[1,c], Voinash S.A.[2,d], Nasedkin I.V.[3,e]

[1] Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, Higher School of Technology and Energy, 4 Ivana Chernykh St., Saint Petersburg, Russia

[2] Rubtsovsk Industrial Institute (branch) of the Altai State Technical University named after I.I. Polzunov**,** 2/6 Traktornaya St.**,** Rubtsovsk**,** Russia

[3] Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny Military Academy of Communications, 3 Tikhoretsky Prospekt, Saint Petersburg, Russia

[a]markovan-63@mail.ru, [b]mactor85@mail.ru, [c]sokolova_vika@inbox.ru, [d]sergeyvoinash@yandex.ru, [e]nasedkin.i@rambler.ru

Keywords: composite materials, powder metallurgy, parts restoration, wear-resistant coatings, mechanical engineering, sintering, mold, sliding bearings, repair technology.

This article examines the current potential of using metal powder-based composite materials in mechanical engineering and repair. It analyzes the main development trends in powder metallurgy, enabling the production of components with a wide range of physical and mechanical properties. Particular attention is paid to the restoration of worn machine parts (bushings, plain bearings) using cold pressing followed by high-temperature sintering. The chemical composition of promising iron-based powder materials is presented, as well as the design of a specialized coating application mold. Optimal process conditions (pressing pressure, sintering temperature, and time) that ensure high adhesion between the coating and the substrate are described. The advantages of this method (environmental friendliness, zero waste) and its limitations associated with insufficient load-bearing capacity for heavily loaded components are highlighted).

УДК 539.41

Использование самонесущей способности парных технологических трубопроводов для снижения количества опор

Горунович С. Б.[1,a]
[1]У-ИТЭЦ ООО «Байкальская энергетическая компания», г. Усть-Илимск, Россия
[a]Gorunovich@baikalenergy.com

Ключевые слова: самонесущая способность, трубопроводы, промежуточная связь, пролет.

В данном исследовании мы проанализировали возможность увеличения самонесущей способности парных трубопроводов. Во введении мы подчеркнули, что данная проблема остается актуальной на сегодняшний день, в виду относительно высокой себестоимости устройства фундаментов для опор трубопроводных сетей. Целью нашей работы явилась разработка методики расчета промежуточных связей парных трубопроводов для увеличения их жесткости и снижения количества опор. Проведен анализ существующих зависимостей для определения максимально допустимых пролетов. В процессе анализа мы рассмотрели расчетную модель – изгиб парных технологических трубопроводов с промежуточными связями. Для расчета связей парных трубопроводов мы использовали гипотезу о не надавливании продольных волокон, гипотезу плоских сечений балки при изгибе, формулу Журавского. В результате мы получили упрощенные зависимости для инженерных прочностных расчетов промежуточных связей парных трубопроводов. Мы проверили применимость выведенных зависимостей, используя числовые примеры, подчеркнули, что данный конструктивный прием не противоречит нормам и правилам проектирования при прокладке сетей трубопроводов. При этом выявили, что в случае парного расположения трубопроводов друг над другом и наличия между ними связей удается существенно увеличить максимальный пролет, тем самым сократить количество опор и снизить себестоимость прокладки трубопроводных сетей.

Эстакады технологических трубопроводов – сложные конструкции, состоящие из опор на фундаментах, расположенных на некотором расстоянии друг от друга, пролетных строений между опорами, как правило, в виде ферм или балок. При этом нередко пролетные строения эстакад могут отсутствовать вовсе и все виды нормативной и технологической нагрузок приходятся на сами трубопроводы. Логично предположить, что проектирование данных объектов регламентировано документами, например: [1], СП 43.13330.2012 «Сооружения промышленных предприятий». Естественно, что в виду сравнительно высокой себестоимости и важности строительства сооружений данного типа продолжаются попытки оптимизировать и удешевить их конструкцию, принимаются меры по увеличению надежности и экологической безопасности трубопроводных сетей в целом [2 - 5].

Шаг расстановки опор в процессе проектирования эстакад технологических трубопроводов решается совместно проектировщиком строительных конструкций и технологом, определяющим ориентировочный состав и диаметры трубопроводов. В процессе эксплуатации эстакады возникают вопросы о прокладке дополнительных трубопроводов, о демонтаже или замене части существующих. Согласно [1] расстояния между отдельно стоящими опорами под трубопроводы должны назначаться из расчета труб на прочность и жесткость. При этом шаг между опорами рекомендуется принимать 12, 18, 24 и 30 м. Для уменьшения нагрузок на пролетные строения эстакад рекомендуется использовать самонесущую способность трубопроводов большого диаметра с опиранием их только на траверсы над опорами эстакад или вблизи них. В целях сокращения ширины эстакад и отдельно стоящих опор мелкие трубопроводы диаметром 50 – 200 мм допускается крепить к большим трубопроводам [1]. Кроме того трубопроводы часто прокладываются по несущим

колоннам зданий и других крупных сооружений, где используется рекомендуемый строительными нормами шаг – 3, 4, 6, 12 м.

Парными трубопроводы часто являются по единому технологическому назначению, например: основной и резервный, прямой и обратный и т.д.

Расчеты на прочность и жесткость технологических трубопроводов, в т.ч. с целью определения шага расстановки опор также регламентируются рядом документов: ГОСТ 32388-2013 «Трубопроводы технологические. Нормы и методы расчета на прочность и сейсмические воздействия»; СНиП 2.04.12-86 «Расчет на прочность стальных трубопроводов»; РД 10-400-01 «Нормы расчета на прочность трубопроводов тепловых сетей» и т.д.

Большинство документов, в т.ч. и вышеперечисленные, используют сходные зависимости для определения максимального пролета (шага расстановки опор). Используется модель балки с жесткой заделкой концов, загруженная равномерно распределенной нагрузкой, рис.1. Пролет определяют по условию прочности и жесткости. При этом, т.к. значение пролета по условию жесткости, как правило, наименьшее, условие прочности является проверочным.

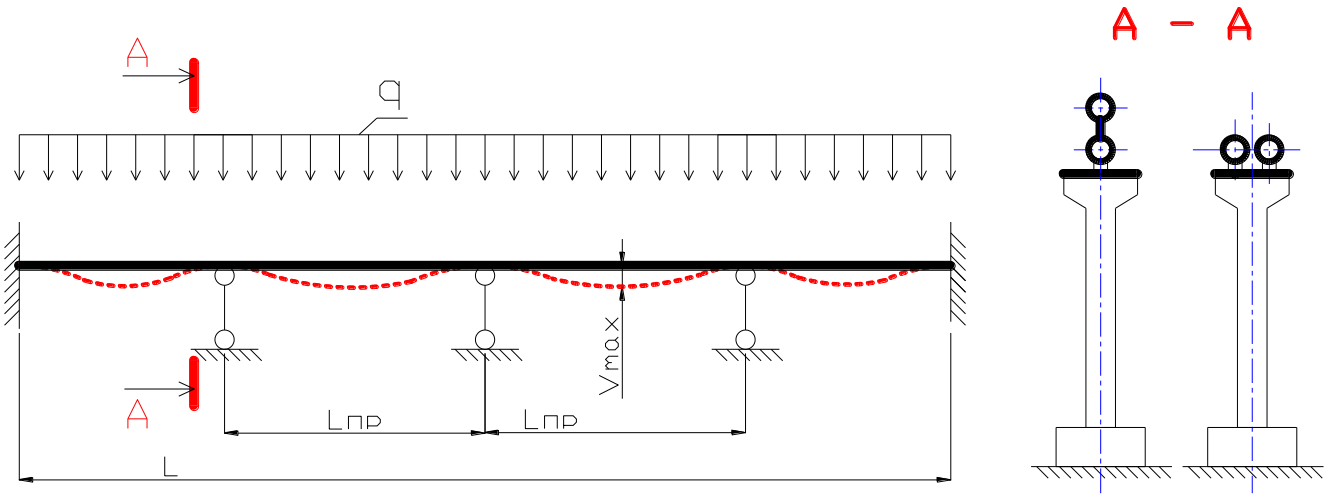


Рис.1. Расчетная модель прокладки трубопроводов на опорах

Из условия прочности максимальный пролет определяется по формуле:

$$L_{ПР} = \sqrt{12[\sigma_q]W\varphi_{bw}/q}, \quad (1)$$

где $[\sigma_q]$ – эффективное допускаемое напряжение от действия весовой нагрузки; W – момент сопротивления сечения трубы изгибу; φ_{bw} – коэффициент прочности шва при изгибе; q – погонный расчетный вес трубы с изоляцией и продуктом. Эффективное допускаемое напряжение определяется из условия сложно деформированного состояния материала трубы и условий эксплуатации.

Условие жесткости исходит из недопущения обратного уклона – «мешков» в трубопроводе, которые приводят к невозможности его полного опорожнения. При этом рекомендуется ограничить максимальное провисание (прогиб) трубопровода величиной $V_{max} = 0{,}02Dn$, где Dn – наружный диаметр трубопровода.

Из условия жесткости максимальный пролет определяется по формуле:

$$L_{ПР} = \sqrt[3]{\frac{12EJ \cdot i}{qy(1-y)(1-2y)}}, \quad (2)$$

где E – модуль упругости материала трубопровода; J – момент инерции сечения; i – уклон трубопровода (безразмерный).

Значение безразмерного параметра y определяют из условия:

$$\frac{y(3y-1)}{2} - \frac{0,02Dn(1-2y)}{i}\sqrt[3]{\frac{qy(1-y)(1-2y)}{12EJ \cdot i}} = 0 \ .$$

При любых значениях i, отличных от нуля, 0,33 ≤ y ≤ 0,5. Для большинства трубопроводов теплосетей от Ду20 до Ду800 при i=0,002 – 0,37 ≤ y ≤ 0,41. В целом выражение (2) слабо зависит от значения y, меняя свою величину не более чем на 10%. Поэтому для упрощенных инженерных расчетов справедливо принимать усредненное $y_{ср.}$ ≈ 0,38. При этом разница в результатах (в сравнении с точными расчетами) не превысит 8%.

Смысл формулы (2) определить максимальный пролет с учетом уклона, наличие которого может способствовать его увеличению. Тогда как обычно инженеры используют более простую зависимость без учета уклона:

$$L_{ПР} = \sqrt[4]{\frac{7,68Dn \cdot EJ}{q}} \ . \quad (3)$$

При этом важно заметить, что наличие уклона в сторону дренирования трубопровода обязательно и регламентируется документами. Например для трубопровода теплосети уклон i не менее 0,002. Его наличие контролируется строительными отметками (высотой) опор и определяется, главным образом, рельефом местности. Необходимость учитывать его в формуле для определения пролета возникает в редких случаях в виду преимуществ назначения единого шага опор по всей длине трубопроводной сети, вне зависимости от величин уклонов на отдельных участках.

Стоит добавить, что в отраслевых справочниках рекомендуемые расстояния между опорами трубопроводов различного диаметра в различных условиях прокладки уже рассчитаны и представлены таблицами. В документе СП 10.13130 «Системы противопожарной защиты. Внутренний противопожарный трубопровод» расстояния между опорами стальных трубопроводов регламентируются. Причем в таблице расстояния между опорами указаны с формулировкой «не менее», что не согласуется с теорией прочности и является, вероятно, опечаткой (ошибкой); т.е. следует читать «не более».

Приведем примеры максимальных расстояний между опорами из различных источников и сведем их в табл.1 для сравнения. В качестве исходных данных примем стальные трубы различных диаметров, наполненных водой при 20 °С.

Таблица 1

Максимальные значения пролетов, м

№ п/п	Диаметр трубопровода × толщина стенки, мм	ГОСТ 32388-2013, по (2) i= 0,002	РД 10-400-01, по (3) i= 0	СП 10.13130
1	Ø108 × 4	9,3	6,4	6
2	Ø159 × 5	11,9	8,4	8
3	Ø219 × 7	14,8	10,7	9
4	Ø325 × 8	18,9	13,9	9

Сравнивая результаты в таблице, можно сделать вывод, что разница значений пролетов для одних и тех же труб из разных источников может быть существенной (до 100%). Регламентированные значения (табличные), как правило, более строгие (меньшие) по сравнению с теоретическими, что можно объяснить наличием коэффициентов запаса и учетом дополнительных нагрузок и условий.

Для труб малого диаметра необходимость увеличения жесткости для снижения количества опор является особенно актуальной задачей. Например, для трубы Ø25×2 мм имеем по (2) – 3,7 м, что часто является недостаточным.

Предлагаемый нами метод увеличения жесткости достаточно прост и очевиден и подходит для парных трубопроводов, т.к. предполагает взаимное расположение труб – «друг над другом», ярусами. При этом для совместной «работы» трубопроводов на изгиб необходимо объединять их жесткими связями на участке пролета (между опорами), рис.2 - 4.

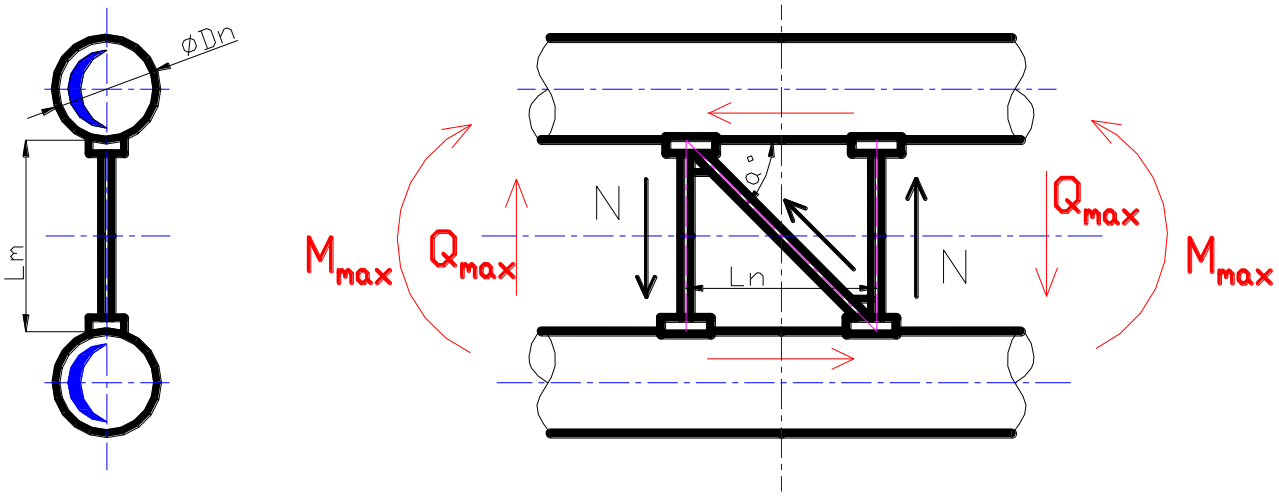


Рис.2. Расчетная модель жесткой связи, стержневая

Практически достаточно просто обеспечить жесткую связь между трубопроводами, используя два варианта конструкции: стержневую, рис.2, или сплошную, рис.4.

Можно привести реально существующий пример использования связей, в частности стержневых, при прокладке парных трубопроводов Ду400 над технологическим проездом, рис. 3.

Приведем формулы для расчета на прочность стержневой конструкции связи, которую достаточно просто выполнить из набора стандартных силовых профилей сваркой по типу участка фермы. Крепление стержней необходимо выполнять к трубопроводу через накладки или стандартные опоры, чтобы не нарушать нормативные требования.

Согласно гипотезе плоских сечений и ненадавливании соседних волокон при изгибе на стержни связей будут действовать поперечные силы, препятствующие сдвигу крайних сечений двух труб относительно друг друга и надавливанию труб друг на друга, рис.2. Предположим, что сдвигу будет препятствовать диагональная связь, а надавливанию – две вертикальные.

Тогда минимальное сечение диагональной связи F_{td} следует принимать не менее:

$$F_{td} \geq \frac{2Q_{\max}^{2d}\cos(\alpha)}{R_y\varphi}, \qquad (4)$$

где $Q_{\max}^{2d}$ – максимальная поперечная сила в сложном сечении парных трубопроводов; $Q_{\max}^{2d} = \frac{1}{2} q_{2d} L_{ПР}$. Здесь q_{2d} – погонный расчетный вес парных труб с изоляцией и продуктом; R_y – расчетное сопротивление на сжатие материала связи;

φ – коэффициент устойчивости при центральном сжатии.

Рис.3. Прокладка парных трубопроводов с промежуточными стержневыми связями

Соответственно проверку сечения вертикальных связей следует проводить по формуле:

$$F_{tv} \geq \frac{Q_{\max}^{2d}}{R_y \varphi} \quad . \tag{5}$$

Значения коэффициента устойчивости φ, расчетные сопротивления материалов можно определить по нормативным документам, например СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции» или по справочникам.

При этом очевидно, что риск потери устойчивости существует только у достаточно длинных стержней (связей) с относительной гибкостью $\bar{\lambda}$:

$$\bar{\lambda} = \lambda \sqrt{R_y / E} \geq 0,6\,, \tag{6}$$

где λ – гибкость стержня, E – модуль упругости материала.

При $\bar{\lambda} < 0,6$ для большинства типов сечений (согласно СП 16.13330.2017) следует принимать φ=1. Причем важно заметить, что выражение (6) не запрещает использовать стержни с большими значениями гибкости $\bar{\lambda}$, а лишь снижает коэффициент устойчивости φ.

Место установки связей в пролете, очевидно, следует определять по эпюрам внутренних сил в местах наибольших значений поперечных сил, что, как правило, соответствует вблизи, либо на месте (поверх) существующих опор.

Приведем формулы для расчета на прочность сплошной конструкции связи, которую достаточно просто выполнить из стального листа сваркой, рис.4. Крепление стержней необходимо выполнять к трубопроводу через накладки, чтобы не нарушать нормативные требования.

Необходимую величину катета шва H_w определим используя Формулу Журавского:

$$H_W \geq \frac{Q_{\max}^{2d} S_x}{2 R_W \beta J_{2d}}\,, \tag{7}$$

S_x – статический момент отсеченной части сечения, в случае парных труб одного диаметра $S_x = 0,5\ F_d\ (Dn + L_m)$. Здесь F_d – площадь сечения трубы, L_m – высота связи; R_W – расчетное сопротивление на срез материала шва; β – коэффициент формы углового шва, зависящий от вида сварки (для ручной $\beta = 0,8$); J_{2d} – момент инерции сложного сечения парных трубопроводов, в случае парных труб одного диаметра $J_{2d} = 2J + 0,5\ (L_m+Dn)^2\ F_d$.

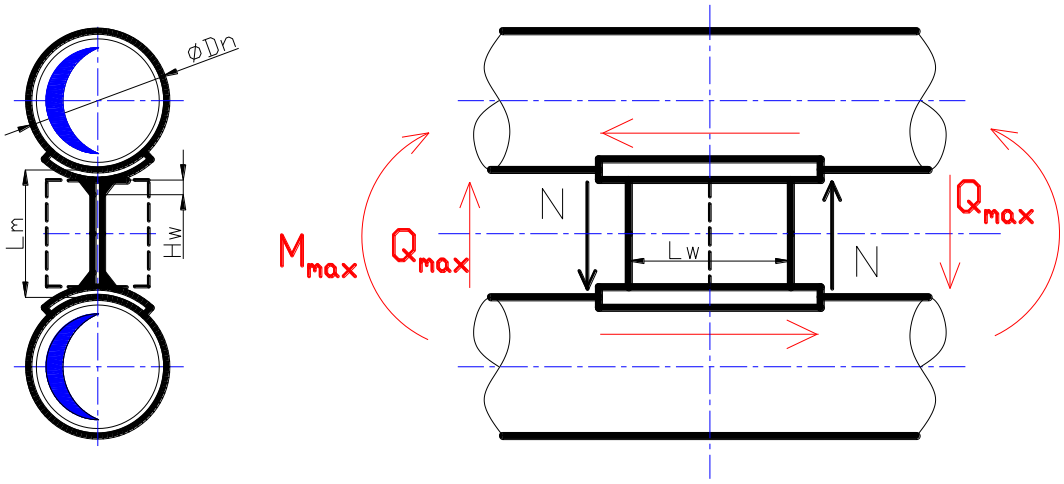


Рис.4. Расчетная модель жесткой связи, сплошная. Пунктирной линией показаны ребра.

Дополнительно длину шва – ширину листа L_W, определим по формуле:

$$L_W \geq \frac{Q_{\max}^{2d}}{R_W \beta H_W}. \tag{8}$$

При этом, при изгибе тонкого высокого листа также следует учесть вероятность потери устойчивости. По СП 16.13330.2017, [6] при выборе толщины стенки t листа следует стремиться к выполнению условия по формуле:

$$\bar{\lambda} = \left(h/t\right)\sqrt{R_y/E} \leq 3{,}5, \tag{9}$$

где h , t – высота и толщина стенки листа, соответственно.

Насколько можно увеличить пролет парных трубопроводов по сравнению с прокладкой одиночной трубы такого же диаметра можно оценить по формуле:

$$\frac{L_{ПР}^{2d}}{L_{ПР}} = \sqrt[4]{\frac{J_{2d}}{J}}, \tag{10}$$

где $L_{ПР}^{2d}$ – максимальный пролет парного трубопровода.

Приведем расчетные примеры. Сравним пролеты одинарного и парного стальных трубопроводов и рассчитаем сечения стержневых или сплошных связей. Трубопроводы заполнены средой – холодная вода, без изоляции. Расчетные сопротивления R_W = 100 МПа, R_y = 250 МПа. Пролет определяем по (3). Связи располагаем вблизи опор (по одной на пролет). Стержневые связи формируем из сдвоенных уголков, формирующих удвоенный момент инерции сечения. Угол диагональной связи α=45°. Результаты сведем в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчета парных трубопроводов

№ п/п	Диаметр трубопровода × толщина стенки, мм	Расстояние между осями парных трубопроводов, м	Тип связи – сплошная из листа: t, мм	Тип связи – стержневая: F_{td}, см^2	Коэффициент увеличения пролета: $K_{ПР} = \frac{L_{ПР}^{2d}}{L_{ПР}}$
1	2	3	4	5	6
1	Ø108 × 4	Dn	-	-	≈ 1,6
2		2Dn	12	4,54 (2 уголка 30х4)	≈ 2,1
3		3Dn	20* (10 с ребрами)	6,16 (2 уголка 40х4)	≈ 2,5

продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5	6
4	Ø325 × 8	Dn	-	-	≈ 1,6
5		2Dn	30* (10 с ребрами)	16,3 (2 уголка 70х6)	≈ 2,1
6		3Dn	(10 с ребрами)	27,86 (2 уголка 90х8)	≈ 2,5
*Использовать толстый лист в данном случае нерационально, необходимо в конструкции связи использовать ребра, рис.4. Наличие ребер позволят снизить требуемую толщину листа в два, три раза.					

Анализ результатов расчетов позволяют сделать следующие выводы:

а) расположение трубопроводов ярусом – друг над другом сразу делают возможность увеличить допустимый пролет более чем в 1,6 раза (п.1 табл.2), тем самым снизить количество опор в 1,6 раза. В этом случае в качестве связей целесообразно непосредственно использовать опоры трубопроводов;

б) при проектировании связей высотой более размера диаметра главную роль при определении параметров конструкции играют формулы проверки на устойчивость (6, 9);

в) при проектировании связей из сплошного листа высотой более размера диаметра в конструкции рекомендуется использовать ребра, рис.4;

г) при проектировании стержневых связей достаточно рассчитать сечение диагонального стержня, как наиболее длинного и нагруженного на сжатие (устойчивость), сечения вертикальных принять аналогичными для унификации.

Литература:

1. Пособие по проектированию отдельно стоящих опор и эстакад под технологические трубопроводы (к СНиП 2.09.03-85): ЦНИИпромзданий. М.: Стройиздат, 1989. 80 с.

2. Голосов С.М., Черенцов Д.А., Пирогов С.П. Оптимизация капитальных вложений на строительство надземных трубопроводов // Транспортные и транспортно-технические системы. Материалы Международной научно-технической конференции. Тюмень. 2025. С. 33–37.

3. Красницкий С.А., Кольцова Т.Р. О рациональной расстановке опор в плоском простом трубопроводе // X Международная научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов атомной отрасли «Команда». Сан-Петербург. 2023. С. 43–45.

4. Алдушкин К.Г., Токарева Л.А., Айзатуллин М.М., Сабитов Л.С. Критический анализ конструкций технологических и кабельных эстакад, а также отдельно стоящих опор под трубопроводы промышленных предприятий // Вестник ГГНТУ. Технические науки. Т. XX. №2 (36). 2024. С.94 – 105

5. Adamu Abubakar Sani, Mohamed Mubarak Abdul Wahab, Nasir Shafiq, Nuruddeen Usman, Shebu Ahmadu Bustani, Abiola Usman Adebanjo, Adamu Tafida A critical and bibliometric review of life cycle cost analysis integration into decision support systems for pipeline asset integrity management // Journal of Pipeline Science and Engineering. Vol. 6. Iss. 1, 2026. URL: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S266714332500054X

6. Малинин Г.В. Методики расчета ребристых пластин на прочность и устойчивость // Труды МАИ. 2021. №121. URL: http://trudymai.ru/upload/iblock/763/ mz8xfo5df9laz51bdk94m3tjbmh0jk6u/ Malinin_red_1_.pd.

Self-supporting coupled process pipelines application to reduce the supports number

Gorunovich S.B.[1,a]

[1]Ust-Ilimsk thermal power plant, “Baikal energy company”, Ust-Ilimsk, 666684, Russian Federation

[a]Gorunovich@baikalenergy.com

Keywords: self-supporting capacity, pipelines, coupling, span.

In this study, we analyzed the increase of coupled pipelines self-supporting capacity. In the introduction, we emphasized this problem to be relevant today, due to the relatively high cost of pipeline network supports foundations. Our work purpose was to develop a double pipelines coupling calculation method to increase their rigidity and reduce the supports number. An existing dependencies analysis to determine the pipeline span limits was carried out. In the course of the study, we considered a computational model – the bending of doubled process pipelines with couplings. To calculate the strength of doubled pipelines couplings, we used the longitudinal fibers non-pressure hypothesis, the hypothesis of flat sections retention during beam bending, and Zhuravsky formula. As a result, we obtained simplified dependencies for engineering strength calculations of doubled pipelines couplings. We tested obtained dependencies applicability using numerical examples, and emphasized the proposed design to comply with established pipeline networks norms and rules. At the same time, it was found that the proposed doubled pipelines couplings case when one pipe is right above the other and coupled is able to significantly increase the span limit, thereby reducing both the number of supports and the cost of pipeline networks construction.

УДК 621.7.01

Оценка возможности применения антифрикционного покрытия на основе графена для лепестков газодинамических подшипников

Евтух Е.С.[1,a], Евтух Г.Е.[1,b]
[1]Брянский государственный технический университет, бул. 50 лет Октября 7, Брянск, Россия
[a] karmanova.helena@yandex.ru, [b] grishan32@mail.ru

Ключевые слова: графен, металлические поверхности, методы нанесения, износостойкость, газодинамический подшипник.

Анализ причин отказов трибологических систем показывает, что их надежность и долговечность непосредственно зависит от сопротивления износу поверхностных слоев деталей, подверженных трению. Для подшипниковых узлов актуальной задачей является использование современных материалов, формирующих на поверхности контакта пар трения структуры, регулирующие трибологические свойства узла. Недавние исследования показали, что графен может стать мощным материалом для борьбы с этой проблемой. Графен, представляющий собой однослойную решетку углеродных атомов, стал объектом интенсивных исследований благодаря своим уникальным свойствам. Покрытия на основе графена стали перспективным решением для повышения коррозионной и износостойкости различных материалов. В рамках исследования выполнена оценка возможности применения покрытия, способного обеспечить повышенную износостойкость лепестков газодинамического подшипника.

В связи с растущими требованиями к качеству, надежности и сроку службы современной техники, вопрос увеличения износостойкости деталей, работающих в условиях повышенных нагрузок и интенсивного трения, становится все более актуальным. Исследования показывают, что наибольшее количество отказов машин и механизмов связано с износом элементов пар трения. Особенно уязвимыми являются подшипниковые узлы.

Одним из наиболее перспективных способов увеличения срока службы таких деталей является формирование на их поверхностях прочных и стойких антифрикционных слоев. Это позволяет существенно повысить усталостную прочность и износостойкость основных материалов.

Лепестковые газодинамические опоры – это современный тип подшипников для энергетического оборудования, гарантирующий эффективное разделение контактирующих поверхностей при значительных частотах вращения ротора [1]. Тем не менее, в режимах пуска и останова, когда устойчивый газовый слой отсутствует, происходит интенсивное трение лепестков о вал. Для защиты пар трения от износа на рабочие поверхности лепестков наносят антифрикционные материалы с малым коэффициентом трения и повышенной стойкостью к износу [2].

В представленной работе выполнена оценка возможности применения покрытия на основе графена, способного обеспечить повышенную износостойкость лепестков газодинамического подшипника.

Подшипники с антифрикционным графеновым покрытием представляют собой революционное направление в современной трибологии, основанное на использовании однослойного углерода с уникальными характеристиками.

Графен (англ. graphene) – это двумерная аллотропная форма углерода, в которой объединённые в гексагональную кристаллическую решётку атомы образуют слой толщиной в один атом, что составляет всего 0.345 нанометра. Этот материал представляет собой фундаментальную структурную единицу графита, но в изолированном виде демонстрирует совершенно иные свойства.

Графен обладает исключительными механическими характеристиками, которые делают его идеальным для применения в высоконагруженных трибологических системах. Теоретические и экспериментальные исследования показывают, что этот однослойный углеродный материал является самым прочным из когда-либо измеренных веществ. [3]

Таблица 1

Сравнительная характеристика физических свойств графена*

Механическое свойство	**Значение для графена**	**Сравнительный материал**	**Значение для сравнения**
Модуль Юнга	1000 ГПа (1 ТПа)	Сталь А36	200 ГПа
Предел прочности при растяжении	130 ГПа	Кевлар	3.6 ГПа
Максимальная деформация до разрушения	13-19%	Сталь конструкционная	0.2-0.5%
Плотность поверхности	0.77 мг/м²	Бумага	~1000 мг/м²
Теплопроводность	5000 Вт/(м·К)	Медь	400 Вт/(м·К)
Электропроводность	$\sim 10^8$ См/м	Серебро	6.3×10^7 См/м

* при комнатной температуре

Помимо высокой прочности, графен является упругим материалом, способным восстанавливать исходную форму после деформации. Это свойство особенно важно для лепестков газодинамических подшипников, где материал подвергается циклическим нагрузкам.

С случае применения покрытия на основе графена в подшипниках можно ввести такое понятие, как суперсмазка. Суперсмазка (superlubricity) представляет собой режим движения, при котором трение между контактирующими поверхностями практически исчезает или становится пренебрежимо малым. Согласно принятому определению, суперсмазка достигается, когда коэффициент трения падает ниже 0.01. Покрытия на основе графена способны демонстрировать еще более впечатляющие результаты, достигая коэффициентов трения на уровне 0.001 и даже ниже.

Стоит отметить, что для оценки нормальной работы газодинамических подшипников является изучение поведения покрытия под высоким контактным давлением. Исследования

показывают, что графеновые структуры способны поддерживать суперсмазку при давлениях до 2.5 ГПа, что сопоставимо с контактными нагрузками в реальных механических системах, что актуально для газодинамических подшипников в режиме пуска-останова турбоагрегата.

В получении антифрикционного покрытия на поверхности деталей, применяемых в подшипниковых узлах является важную роль играют методы нанесения графенового слоя.

В настоящее время наибольшее наиболее известными являются следующие методы:

- химическое осаждение из паровой фазы (Chemical Vapor Deposition);
- конденсация из паровой фазы (Physical Vapor Deposition);
- термодиффузионный;
- ионное легирование;
- ионное насыщение;
- вакуумный ионно-плазменный.

Каждый метод имеет свои особенности и может быть выбран в зависимости от требуемых характеристик графеновых слоёв и условий производства. В будущем, с развитием технологий и улучшением методов производства, можно ожидать широкое внедрение графеновых покрытий в различные отрасли, включая производство подшипниковых узлов.

Применение графена в подшипниках реализуется через различные технологические подходы, включающие непосредственное нанесение графеновых покрытий, создание композитных материалов с графеновым наполнителем и использование графена в смазочных составах.

Нанесение графеновых пленок непосредственно на рабочие поверхности подшипников методом CVD или переноса предварительно синтезированного графена позволяет создать сверхскользящий слой покрытия. Процесс переноса может осуществляться мокрым методом с травлением металлической подложки или сухим методом с механическим отделением пленки.

Критическим фактором является адгезия графенового покрытия к металлической основе деталей подшипника. Для улучшения сцепления применяются промежуточные слои покрытия поверхности. Оптимальная толщина графенового покрытия обычно составляет от одного до десяти атомных слоев, что обеспечивает оптимальный баланс между трибологическими свойствами и механической стабильностью.

Внедрение графеновых наполнителей в полимерные матрицы позволит создавать для подшипниковых узлов материалы нового поколения с улучшенными трибологическими характеристиками. Механизм действия графеновых композитов основан на формировании трибопленки на поверхности скольжения. При работе подшипника графеновые пластины мигрируют к поверхности и формируют защитный слой с низким сопротивлением сдвигу. Этот эффект особенно выражен в условиях, где графен выступает в качестве твердой смазки.

В настоящее время использование графеновых наночастиц в качестве присадок к традиционным смазочным маслам представляет собой относительно простой способ улучшения трибологических характеристик существующих подшипниковых систем. Графеновые хлопья размером от нескольких нанометров до микрометров добавляются в базовое масло в концентрациях от 0.01 до 1 процента.

Разрабатываются также гибридные системы, где графеновые покрытия комбинируются с традиционными твердыми смазками, такими как дисульфид молибдена или нитрид бора. Такая комбинация обеспечивает синергетический эффект и повышает общую надежность трибологической системы.

Твердосмазочные покрытия на основе графена на подвижных элементах подшипниковых узлов позволяют достичь сверхмалого трения без использования жидких смазок. Это особенно важно для эксплуатации подшипников в условиях, где обычные смазочные материалы неэффективны.

В подшипниках, где доступ для технического обслуживания затруднен и дорог, применение графеновых смазочных материалов позволяет увеличить интервалы между регламентными работами.

Энергетическая промышленность в вопросе транспортировки газа проявляет особый интерес к газодинамическим подшипникам нагнетателей компрессорных станций из-за критических требований к массе, надежности и работе в экстремальных условиях. Графеновые покрытия на лепестках подшипников позволят обеспечить их функционирование в допустимых пределах.

В работе выполнен обзор преимуществ нанесения покрытий на основе графена на металлические поверхности газодинамических подшипников, которые являются важной областью исследований в современных наноматериалах. Сверхнизкий коэффициент трения, достигающий значений менее 0.001 в оптимальных условиях, потенциально может снизить энергопотери в механических системах на десятки процентов. Исключительная прочность и износостойкость графена способна обеспечить долговечность подшипниковых узлов. Графеновые покрытия демонстрируют минимальный износ даже после многократных циклов нагружения, что особенно важно для высокоскоростных и высоконагруженных трибосистем.

Теплопроводность графена, превышающая теплопроводность меди в 10-15 раз, обеспечивает эффективный отвод тепла из зоны трения. Это снижает термические напряжения и предотвращает локальные перегревы, которые часто являются причиной преждевременного выхода подшипников из строя.

Развитие графеновых технологий для подшипников находится на переходном этапе от фундаментальных исследований к практическим применениям. Ожидается, что в ближайшие годы произойдет значительное расширение использования графена в трибологии, особенно в высокотехнологичных отраслях.

Важным направлением станет разработка гибридных трибологических систем, сочетающих графен с другими двумерными материалами, такими как дисульфид молибдена, нитрид бора или гексагональные нитриды металлов. Такие гетероструктуры могут проявлять синергетические эффекты и превосходить характеристики отдельных материалов [4].

В долгосрочной перспективе графеновые подшипники могут стать стандартным решением для широкого спектра применений. Полное вытеснение традиционных материалов маловероятно, но графен займет значительную долю рынка в сегментах, где его преимущества наиболее выражены.

Развитие нанотехнологий и методов прецизионного производства позволит создавать подшипники с атомарно точным управлением структурой поверхности. Комбинация графеновых покрытий с топографией поверхности на наноуровне откроет возможности для создания трибологических систем с программируемыми фрикционными характеристиками.

Литература:

1. Шалыгин М.Г. Повышение износостойкости лепестковых газодинамических подшипников компрессоров / М.Г. Шалыгин, Г.Е. Евтух // Совершенствование энергетических машин. Сборник научных трудов материалов конференции. – Курск. - 2025. - С. 125-138.

2. Wu Z.S., Ren W., Gao L., Zhao J., Chen Z., Liu B., Tang D., Yu B., Jiang C., Cheng H.–M. Synthesis of graphene sheets with high electrical conductivity and good thermal stability by hydrogen arc discharge exfoliation // ACS nano. – 2009. – V. 3. – N. 2. – P. 411–417.

3. Евтух, Г.Е. Повышение износостойкости металлических поверхностей нанесением покрытия на основе графена / Е.С. Евтух, Г.Е. Евтух. // Механики XXI веку. - 2025. - № 24. - С. 280-284.

4. Тихомиров В. П., Шалыгин М. Г., Измеров М. А. Модель контакта и оценка молекулярной составляющей силы трения // Наукоёмкие технологии в машиностроении. 2023. №. 6. С. 20-27.

Evaluation of the possibility of using a graphene-based antifriction coating for the blades of gas-dynamic bearings

Evtukh E.S.[1,a] Evtukh G.E.[1,b]
[1] Bryansk State Technical University, 7, 50 Let Oktyabrya Blvd, Bryansk, Russia
[a] karmanova.helena@yandex.ru, [b] grishan32@mail.ru

Keywords: graphene, metal surfaces, application methods, wear resistance, gas-dynamic bearing.

An analysis of the causes of failures in tribological systems shows that their reliability and durability are directly dependent on the wear resistance of the surface layers of the friction-prone parts. For bearing units, the use of modern materials that form structures on the contact surface of the friction pairs that regulate the tribological properties of the unit is an urgent task. Recent studies have shown that graphene can be a powerful material for addressing this issue. Graphene, which is a single-layer lattice of carbon atoms, has been the subject of intense research due to its unique properties. Graphene-based coatings have become a promising solution for improving the corrosion and wear resistance of various materials. As part of the study, the possibility of using a coating that can provide increased wear resistance for the blades of a gas-dynamic bearing was evaluated.

УДК 620.193/197:622.692.4

Анализ влияния вибрации на износ подшипника компрессора газотурбинного агрегата методом трибодиагностики

Шалыгин М.Г.[1,a], Евтух Г.Е.[1,b], Евтух Е.С.[1,c]
[1]Брянский государственный технический университет, бул. 50 лет Октября 7, Брянск, Россия
[a] migshalygin @yandex.ru, [b] grishan32@mail.ru, [c] karmanova.helena@yandex.ru

Ключевые слова: трибодиагностика, подшипник, износ, опорная кривая, колебания, вибрация.

В статье приведены основные положения концепции трибодиагностики подшипников скольжения нагнетателей газотурбинных агрегатов с целью прогнозирования их изнашивания. Рассмотрены колебания в газотурбинных агрегатах с точки зрения возникновения вибрации в подшипнике. Предложена методика определения предельно допустимого износа вкладыша подшипника, основанная на анализе экспериментальных кривых Аббота-Файерстоуна до и после процесса изнашивания. Приведена методика установления связи частиц износа в потоке смазочного материала, полученная с датчиков гранулометрическим способом и предельным значением износа вкладыша подшипника, полученной по кривой Аббота-Файерстоуна. Показано, что для установления связи вибрации и износа на практике, необходимо построить совмещенный график вибрации и получить точку величины износа в момент предельно допустимой вибрации.

Газотурбинные агрегаты являются объектом повышенной опасности, поэтому своевременное прогнозирование ремонта и замены их узлов представляет собой актуальную задачу. В инженерной практике требуется в рабочих условиях контролировать количественные и качественные характеристики деталей, узлов и агрегатов для обеспечения должного уровня обслуживания и своевременного ремонта. Некоторые узлы могут определять ресурс детали или агрегата в целом. Зачастую такими узлами являются фрикционные пары. Их износ вызывает необходимость остановки процесса эксплуатации и

проведение планового ремонта. К таким парам трения можно отнести подшипники газотурбинного агрегата, как подшипники с масляным смазочным материалом, так и газодинамические подшипники [1]. Износ подшипника приводит к увеличению вибрации вала, который в свою очередь фиксируется соответствующими контролирующими системами, и к необходимости проведения ремонтных работ. В этой связи, целью настоящей статьи является попытка связи трибодиагностики с вибродиагностикой.

Подшипники компрессоров изнашиваются по причине возникновения больших нагрузок в момент касания вала и вкладыша. Наиболее простыми способами фиксации наличия износа могли бы быть: фиксация потери массы подшипника (Δm) и фиксация линейного износа вкладыша (Δh). В таком случае скорость изнашивания можно было рассчитать по выражениям:

- скорость о массе

$$v_m = \frac{\Delta m}{t}; \quad (1)$$

- линейная скорость

$$v_h = \frac{\Delta h}{t} \quad (2)$$

где t – время работы подшипника.

Однако, в условиях эксплуатации и с существующими в настоящее время измерительными средствами это является трудновыполнимой задачей. Например, в случае с масляными подшипниками фиксацией факта начала процесса изнашивания может являться наличие частиц износа в смазочном материале. Многие системы смазывания оснащены фильтрами, которые призваны, в том числе, улавливать частицы износа и, таким образом, очищать смазочный материал для дальнейшего использования. Кроме того, следует учитывать кинематику и механику контактного взаимодействия пар трения подшипника [2].

В настоящее время в свободной продаже присутствует достаточное количество измерительных мембран, позволяющих устанавливать их на пути смазочного материала в фильтр и определять массу, проходящих твердых частиц, например осуществляющие гранулометрический анализ, позволяющий определить содержание частиц износа в смазочном материале. В работе [3] приведен один из методов анализа смазочного материала на содержание металлов в процессе эксплуатации. Таким образом, задача сводится к построению связи между массой частиц износа и вибрацией газотурбинного агрегата. Для это цели необходимо выделить колебания, возникающие в системе подшипник-вал и устранить помехи от других возмущающих колебаний. Такая обратная связь вызвана необходимостью учета того, что колебания вызывают износ, а износ вызывает дополнительные колебания (рис. 1.).

Согласно [4] при трении твердых тел возникают акустические колебания трех видов: автоколебания, возникающие в результате изменения статистических, динамических или кинематических условий сопряжений; эмиссионные колебания волн напряжений, вызванных пластическим деформированием, структурнофазовой перестройкой и разрушением поверхности трения; поверхностных волн. Следовательно, для построения адекватной прогнозной модели целесообразно определять износ подшипника и измерять вибрацию по времени. В условиях работы подшипника компрессора газотрубинного агрегата процесс приработки будет повторяться в следствии вибрации в вертикальном направлении (рис. 2), так как происходит сдвиг одной контактирующей поверхности относительно другой и, как следствие, изменение гидродинамического режима.

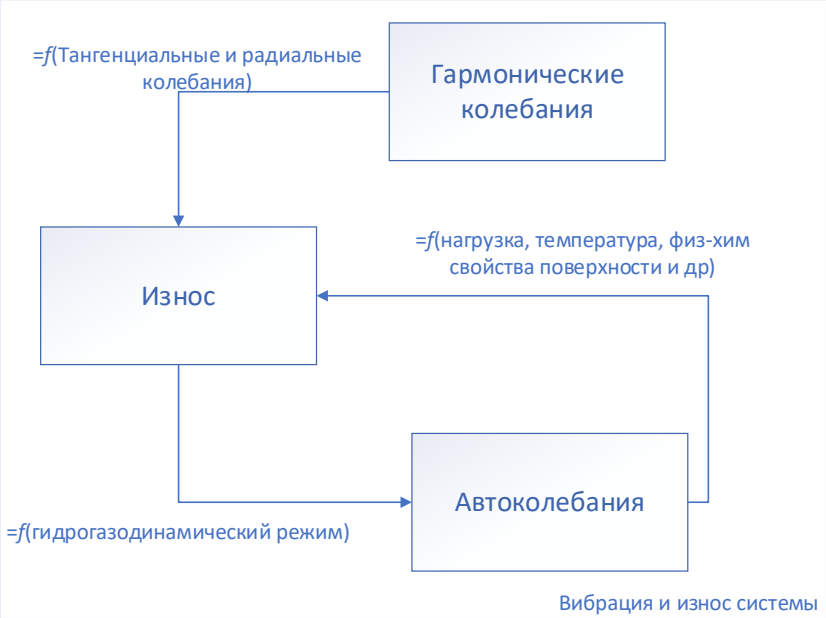


Рис.1. Схема обратной связи колебаний и изнашивания в режиме эксплуатации

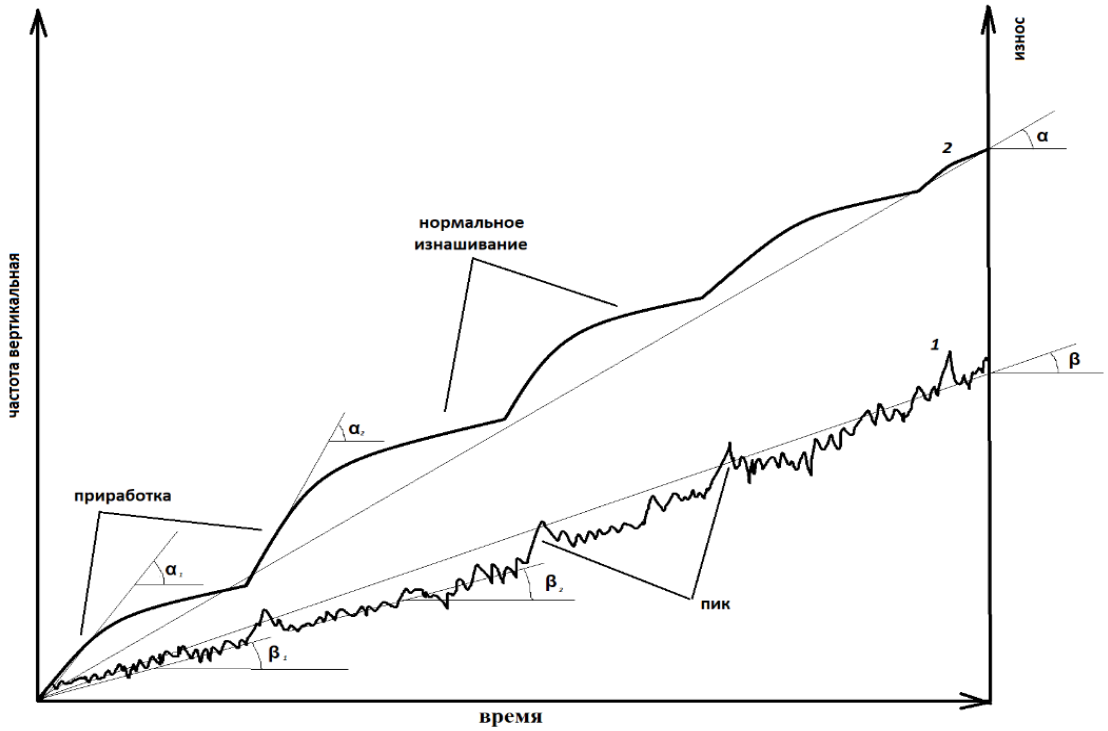


Рис.2. Корреляция вертикальных колебаний (*1*) подшипника ГТА и его износа (*2*)

Наличие пика на кривой колебаний происходит в момент касания цапфы с поверхностью при останове или в момент пуска. Совершенно очевидно, что углы α_i на кривой износ, характеризующие угол наклона кривой в период приработки и β_i на кривой частот вертикальных колебаний буду близки по значению, тогда увеличение вибрации можно определить по износу подшипника с введением поправочного коэффициента, учитывающего вибрацию не относящихся к подшипнику факторов.

При использовании гранулометрических датчиков необходимо определить места их установки. Так места установки датчиков вибрации регламентируются нормативными документами, например, схема установки датчиков вибрации приведена в работе [5]. В

датчиках, работающих по гранулометрическому методу, концентрацию частиц металла в смазывающей жидкости определяют по выражению

$$C_L = \frac{P_L}{k\left(1 - e^{-\frac{kt}{\mathrm{V}}}\right)}, \quad (3)$$

тогда масса частиц в смазывающей системе

$$m_{\text{ч}} = C_L \cdot \mathrm{V}_{\text{сист}},$$

где P_L – скорость образования частиц, мг/ч; t – время работы датчика, ч.; k – константа скорости удаления частиц, л/ч; V – объем смазывающей жидкости, л.

В этом случае по выражению (1) можно получить значение скорости изнашивания. Однако, с учетом того, что скорость изнашивания не является постоянной величиной в период приработки значения величины скорости изнашивания будет недостаточно для прогнозирования ресурса подшипника.

Рассчитать потерю массы подшипника, учитывая уровень современный технологий, не представляется возможным, поэтому целесообразно оценивать объем частиц в смазке

$$\mathrm{V}_{\text{ч}} = \frac{\mathrm{m}_{\text{ч}}}{\rho}, \quad (4)$$

где $\mathrm{m}_{\text{ч}}$ – масса частиц, мг; ρ – плотность частиц.

Очевидно, что условием прекращения работоспособности будет достижение некоторого объема изношенных частиц $[\mathrm{V}_{\text{ч}}]$ в смазывающей системе. Исходя из общих рекомендаций по проектированию подшипника скольжения поверхность цапфы должна иметь параметр шероховатости Ra = 2,5 и вкладыша Ra = 1,25. Можно принять условием изнашивания вкладыша подшипника приработку поверхности трения до равновесной шероховатости в следствии пластических деформаций при пуске/останове.

Тогда значение $[\mathrm{V}_{\text{ч}}]$ находится в прямой корреляции с опорной кривой профиля поверхности (рис. 3).

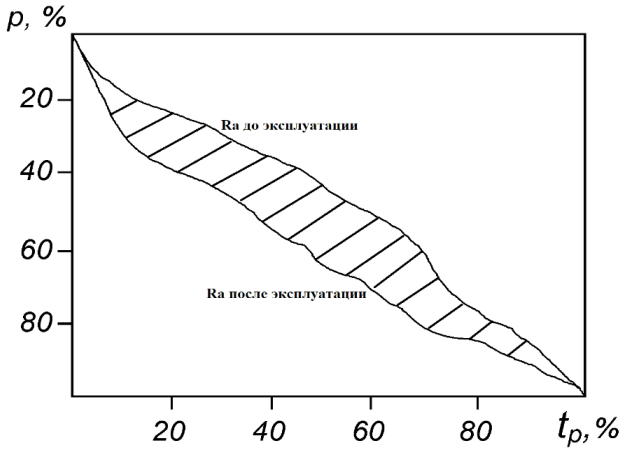


Рис.3. Опорная кривая до изнашивания поверхности и после

Так, объем изношенного материала можно найти как разность площадей под кривыми Аббота-Файерстоуна до $f(t_p^{\text{до}})$ и после $f(t_p^{\text{после}})$ изнашивания

$$[\mathrm{V}_{ч}] = \int_0^{t_p} f(t_p^{до}) - \int_0^{t_p} f(t_p^{после}). \quad (5)$$

При этом, получить кривую Аббота-Файерстоуна после процесса изнашивания достаточно для типового подшипника данной серии. Откуда ресурс работы подшипника

$$\mathrm{V}_{\text{ч}} < [\mathrm{V}_{\text{ч}}].$$

На основе предположения о периодически повторяющимся процессе приработки при касании вкладыша и цапфы подшипника, а также нарастании вибрации по мере изнашивания вкладыша предложены зависимости для прогнозирования ресурса подшипника. Для установления связи вибрации и износа на практике, необходимо построить совмещенный

график вибрации и получить точку величины износа в момент предельно допустимой вибрации. Рассчитать значение износа подшипника и на основе полученных данных, с использованием датчиков анализа частиц в потоке смазочного материала, контролировать характер работы газотурбинного агрегата.

Таким образом, прогнозировать вибрации в газотурбинном агрегате можно на основе анализа вибрации в подшипниках и объема частиц износа в смазочной системе.

Литература:

1. Шалыгин М.Г., Евтух Е.С., Евтух Г.Е. Износостойкость газодинамических подшипников компрессоров // Строительные и дорожные машины. 2023. № 6. С. 35-38.

2. Тихомиров В. П., Шалыгин М. Г., Измеров М. А. Модель контакта и оценка молекулярной составляющей силы трения // Наукоёмкие технологии в машиностроении. 2023. №. 6. С. 20-27.

3. Грядунов К.И., Козлов А.Н., Немчиков М.Л., Мельникова И.С. Диагностирование авиационных двигателей по содержанию металлов в маслах // Научный вестник МГТУ ГА. 2019. №3. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/diagnostirovanie-aviatsionnyh-dvigatelei-po-soderzhaniyu-metallov-v-maslah (дата обращения: 26.12.2023).

4. Свириденок А.И., Анатолий Иванович Акустические и электрические методы в триботехнике / А.И. Свириденок, Н.К. Мышкин, Т.Ф. Калмыкова, О.В. Холодилов; Под ред. В.А. Белого АН БССР, Ин-т механики металлополимер. систем. - Минск: Наука и техника, 1987. - 279 с.

5. Потерянский, Л.И. Исследование вибрационного состояния газотурбинной установки SIMENS V64.3A на пусковых режимах и под нагрузкой при опытно-промышленной эксплуатации [Электронный ресурс] / Л.И. Потерянский, С.Л. Потерянский. – 23 с. – Режим доступа: http://www.nppmera.ru/assets/files/vibro-expert_example.pdf.

6. Евтух Г.Е. Перспективные направления повышения эксплуатационной надёжности нагнетателя // Турбины и трубопроводный транспорт: исследования и разработки. сборник научных трудов. – Курск. - 2025. С. 101-106.

7. Шалыгин М.Г. Повышение износостойкости лепестковых газодинамических подшипников компрессоров / М.Г. Шалыгин, Г.Е. Евтух // Совершенствование энергетических машин. Сборник научных трудов материалов конференции. – Курск. - 2025. - С. 125-138.

Technology of applying graphene coating to metal surface by thermal diffusion method

Shalygin, M.G.[1,a] Evtukh G.E.[1,b], Evtukh E.S.[1,c]
[1] Bryansk State Technical University, 7, 50 Let Oktyabrya Blvd, Bryansk, Russia
[a] migshalygin @yandex.ru, [b] grishan32@mail.ru, [c] karmanova.helena@yandex.ru

Keywords: tribodiagnostics, bearing, wear, the Abbott-Firestone curve, fluctuations, vibration.

The article presents the main provisions of the concept of tribodiagnostics of plain bearings of gas turbine units superchargers in order to predict their wear. The fluctuations in gas turbine units are considered from the point of view of vibration occurrence in the bearing. The technique of determination of the maximum permissible wear of the bearing insert is proposed, based on the analysis of the experimental Abbot-Firestone curves before and after the wear process. The paper presents a method for establishing the relationship between wear particles in the lubricant flow, obtained from sensors using the granulometric method, and the limit value of bearing insert wear, obtained using the Abbott-Firestone curve. It is shown that in order to establish the relationship between vibration and wear in practice, it is necessary to construct a combined vibration graph and obtain the point of wear value at the moment of maximum permissible vibration.

УДК 67.017

О применении металлокерамических композиционных материалов для изготовления деталей механизмов, машин и оборудования

Гиннэ С.В.[1,a], Колосова Е.Р.[1,b]
[1]Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва, пр. им. газеты Красноярский рабочий 31, Красноярск, 660037, Россия
[a]svetlanaginneh@rambler.ru, [b]eva.kolosova@mail.ru

Ключевые слова: композиционные материалы, металлокерамические композиционные материалы.

Статья посвящена определению приоритетных областей применения металлокерамических композиционных материалов. Изучение научно-технической литературы, патентной документации и производственной практики позволило установить, что в настоящее время в сфере индустриального использования металлокерамические композиционные материалы являются одним из эффективных инструментариев для решения сложнейших инженерных задач в таких отраслях промышленности, как: энергетическое машиностроение, автомобилестроение, станкостроение, авиация, космонавтика и другие. Обширное промышленное применение металлокерамических композитов обусловлено экономически выгодной продуктивностью употребления этих материалов вследствие существенного возрастания срока службы механизмов, машин и оборудования, уменьшения расходов на их ремонт и обслуживание из-за наличия у таких материалов исключительно высоких показателей прочности, износостойкости и термостойкости, что позволяет создавать более компактные и надёжные технические объекты.

На текущем этапе развития промышленного производства невозможно обойтись без использования композиционных материалов (композитов), поскольку традиционные конструкционные материалы (металлы и сплавы на их основе) зачастую не способны в полной мере удовлетворить всему комплексу требований, предъявляемых к современным техническим объектам, которые, как правило, эксплуатируются в экстремальных условиях (при высоких механических нагрузках, значительных температурных градиентах, воздействии агрессивных сред, интенсивных скоростях износа и др.). Композиты представляют собой сложные искусственные материалы, которые состоят из двух и более материалов (компонентов), отличных друг от друга по форме, фазовому состоянию, химическому составу, свойствам и соединённых в единое целое за счёт сил адгезионного взаимодействия на границе раздела между матрицей (связующим компонентом) и её наполнителем (армирующим компонентом). Актуальность применения композитов в разных отраслях индустрии специалисты объясняют присутствием у них в сравнении с традиционными конструкционными материалами таких преимуществ, как: повышенные твёрдость, прочность, жёсткость, коррозионная стойкость (особенно в интервале высоких температурах) при сравнительно малом удельном весе, а также гибкая конструкция, которая может быть адаптирована условиям и задачам конкретного проекта [1 – 5].

Анализ нормативно-технологических источников информации показал, что одним из наиболее перспективных видов композиционных материалов, используемых для изготовления деталей механизмов, машин и оборудования, являются металлокерамические композиты (МКК), которые состоят из металлической матрицы и керамических наполнителей. По мнению экспертов, металлокерамические композиты открывают принципиально новые возможности в развитии науки и техники благодаря обладанию ими синергетическим набором ценных свойств, присущих как керамике (высокие твёрдость,

прочность, износостойкость, жаропрочность (до 1500 °С и выше), малая ползучесть, химическая инертность), так и металлу (высокие теплопроводность, электропроводность, стойкость к ударным нагрузкам (вязкость), способность к формообразованию) [6 – 11].

Изучение научно-технической литературы, патентной документации и производственной практики позволило определить ключевые области применения металлокерамических композиционных материалов, к которым относятся энергетическое машиностроение, автомобилестроение и станкостроение [9 – 20].

В энергетическом машиностроении употребление металлокерамических композитов в эксплуатационно-техническом контексте оправдано для производства:

– деталей турбин (лопаток, роторов, уплотнений и других ответственных элементов), генераторов и иного оборудования: благодаря интеграции высоких показателей механической прочности, коррозионной стойкости, стойкости к изнашиванию и термостойкости МКК происходит увеличение периода работы и продуктивности службы оборудования за счёт роста КПД, а также уменьшение трат на его обслуживание;

– узлов котлов и теплообменников, работающих во взаимодействии с агрессивными средами и при нагреве до значительных температур: интенсивность процессов коррозии и эрозии заметно снижается по причине повышенной жаропрочности и химической инертности МКК;

– звеньев систем управления и автоматизации, которым необходимо обладать комбинацией существенных параметров устойчивости к температурным перепадам, точности и прочности;

– фильтров для очистки отработавших газов в энергетических установках, что играет важнейшую роль в обеспечении экологической безопасности производственных процессов.

В автомобилестроении металлокерамические композиты рекомендуется активно использовать для изготовления:

– подшипников (рис. 1): установлено, что металлокерамические подшипники допустимо подвергать эксплуатации в режиме высоких температур под коррозионным и абразивным воздействием, а также при совместном влиянии магнитных и электрических полей, при этом, пластичная металлическая матрица МКК приводит к нивелированию проблемы хрупкости подшипников;

– покрытий для защиты от истирания и коррозии особо значимых деталей и узлов, например: поршневые кольца можно покрывать нитридом титана для повышения износостойкости, а тормозные диски с металлокерамическими покрытиями улучшают тормозные характеристики двигателей (рис. 2);

– разнообразных уплотнителей: процедура износа металлокерамического композитного уплотнения формируется из последовательности обособленных операций отрыва частиц металлической матрицы и керамического наполнителя по причине уменьшения адгезии по границам каждой частицы, в этой связи отделение и уход частиц способствует отведению из зоны трения излишков тепла, что препятствует нагреву контактирующих деталей.

В станкостроении металлокерамические композиты наибольший интерес представляют при металлообработке в плане повышения твёрдости, теплостойкости, допускаемой скорости резания различного вида режущего инструмента:

– фрезы и свёрла с покрытием из карбида вольфрама (WC),

– резцы с нитрид-титановым покрытием (TiN),

– шлифовальные круги с керамической связкой и армированием металлокерамическими сегментами.

Проведенный информационно-аналитический обзор научной и производственной информации по тематике исследования показал, что в настоящее время в сфере индустриального использования металлокерамические композиционные материалы являются одним из эффективных инструментариев для решения сложнейших инженерных

задач во многих промышленных областях: энергетическом машиностроении, автомобилестроении, станкостроении, авиации, космонавтики и некоторых других.

Рис. 1. Металлокерамические подшипники

а) *б)*

Рис. 2. Детали с использованием металлокерамического покрытия
а – поршневые кольца; *б* – тормозные диски

Обширное промышленное применение металлокерамических композитов обусловлено экономически выгодной продуктивностью употребления этих материалов вследствие существенного возрастания срока службы механизмов, машин и оборудования, уменьшения расходов на их ремонт и обслуживание из-за наличия у таких материалов исключительно высоких показателей прочности, износостойкости и термостойкости, что позволяет создавать более компактные и надёжные технические объекты. Таким образом, металлокерамические композиты можно назвать прогрессивными материалами для создания современных механизмов, машин и оборудования, а дальнейшая разработка новых видов металлокерамических композиционных материалов и улучшение их свойств выступают перспективными направлениями развития машиностроительной отрасли промышленного производства.

Литература:

1. Рогов В.А., Шкарупа М.И., Велис А.К. Классификация композиционных материалов и их роль в современном машиностроении // Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования. 2012. № 2. С. 41 – 49.

2. Гиннэ С.В., Кольчевский Д.В. Об особенностях применения в промышленном производстве композиционных материалов // Синергия науки и практики в контексте инновационных прорывов в развитии экономики и общества: национальный и международные аспекты : сборник

научных статей по итогам Международной научно-практической конференции. 9-10 декабря 2019 года. СПб. : Изд-во СПбГЭУ, 2019. С.165 – 167.

3. Васильев В.В. Композиционные материалы: Справочник. М.: Машиностроение, 1990. 356 с.

4. Alem S.A., Sabzvand M.H., Govahi P., Poormehrabi P., Azar M.H., Siouki S.S., Rashidi R., Angizi S., Bagherifard S. Advancing the next generation of high–performance metal matrix composites through metal particle reinforcement // Advanced Composites and Hybrid Materials. 2025. № 8:3. P. 1 – 68. https://doi.org/10.1007/s42114-024-01057-4

5. Ремизов И.И. Исследование влияния режимов СПС на прочностные характеристики высоконаполненных алюмоматричных композиционных материалов. Томск, 2016. URL: http://earchive.tpu.ru/handle/11683/29327 (дата обращения 17.02.2026).

6. Roach J.T., Lenz B.M., Read K.S. Ceramic matrix composites and method of making // Patent US № US 2024/0278543 A1. 22.08.2024. URL: https://patents.google.com/patent/US20240278543A1/en

7. Лымарь Е.А. Исследование характеристик спекания керамометаллических композитов // Инновации в науке. 2012. № 14-1. С. 88 – 93.

8. Стоякина Е.А., Курбаткина Е.И., Симонов В.Н. Механические свойства алюмоматричных композиционных материалов, упрочненных частицами SiC, в зависимости от матричного сплава // Труды ВИАМ. 2018. № 2. С. 62 – 73.

9. Пантелеенко Ф.И., Оковитый В.А., Сидоров В.А., Оковитый В.В., Асташинский В.М. Обзор современного применения металлокерамических покрытий // Вестник КузГТУ. 2021. № 3. С. 5 – 17.

10. Балинова Ю.А., Гращенков Д.В., Шавнев А.А., Бабашов В.Г., Чайникова А.С., Курбаткина Е.И., Большакова А.Н. Высокотемпературные теплозащитные, керамические и металлокерамические композиционные материалы для авиационной техники нового поколения // Вестник Концерна ВКО Алмаз-Антей-Москва. 2020. № 2. С. 83 – 92.

11. Поповский Г.Н., Хабалов Т.И., Хабалов Г.И., Александров В.И., Титов А.М., Недосекина Н.А. Высокотемпературный металлокерамичесикй композит // Патент РФ № RU 2389814 C2. 20.05.2010. URL: https://patents.google.com/patent/RU2450082C2/ru

12. Шерстобоева М.В. Применение металлокерамических композитов для обесцвечивания сточных вод. Томск, 2016. URL: https://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Repository/vital:3120 (дата обращения 11.03.2026).

13. Лекарев А.В., Жуковский В.Б., Ковалева А.А., Жереб В.П. Исследование прочности металлокерамики УМБ-4С // Решетнёвские чтения. 2013. Т. 1. № 17. С. 425 – 427.

14. Большаков Б.О., Галиакбаров Р.Ф., Смыслов А.М., Лисянский А.С., Усачев К.М. Металлокерамический композитный материал для надбандажных уплотнений проточной части паровых турбин // Вестник УГАТУ. 2019. Т.23. № 4 (86). С. 11 – 17.

15. Бурковская Н.П., Севостьянов Н.В. Металлокерамические композиционные материалы для подшипников скольжения (обзор) // Труды ВИАМ. 2023. № 3 (121). С. 84 – 94.

16. Критский В.Ю. Зубко А.И. Исследование возможности использования керамических авиационных подшипников скольжения нового поколения в конструкциях опор роторов газотурбинных двигателей // Двигатель. 2013. № 3. С. 24 – 26.

17. Сморчков Г.Ю., Кондрохин Д.Н., Рачковский А.И., Курганов С.С., Трушин В.С. Способ получения высокотемпературного композитного антифрикционного материала // Патент РФ № RU 2695854 C2. 29.07.2019.

18. Мурашева В.В., Щетанов Б.В., Севостьянов Н.В. Высокотемпературные MoSi композиционные материалы (Обзор) // Конструкции из композиционных материалов. 2014. № 2. С. 24 – 35.

19. Бурковская Н.П., Севостьянов Н.В., Болсуновская Т.А., Ефимочкин И.Ю. Совершенствование материалов для подшипников скольжения двигателей внутреннего сгорания (обзор) // Труды ВИАМ. 2020. № 1 (85). С. 78 – 91. URL: http://viam-works.ru (дата обращения: 08.03.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-78-91.

20. Беляченков И.О., Щеголева Н.Е., Чайникова А.С., Ваганова М.Л. Нитридокремниевые керамические материалы для подшипников авиационных ГТД и способы их получения (обзор) // Труды ВИАМ. 2019. № 7 (79). С. 42 – 49.

About the use of metal-ceramic composite materials for the manufacture of parts for mechanisms, machines and equipment

Ginne S.V.[1,a], Kolosova E.R.[1,b]
[1]Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, the ave. of the newspaper the Krasnoyarsk worker 31, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
[a]svetlanaginneh@rambler.ru, [b]eva.kolosova@mail.ru

Keywords: composite materials, metal-ceramic composite materials.

The article is devoted to the identification of priority areas of application of metal-ceramic composite materials. The study of scientific and technical literature, patent documentation and production practice has revealed that metal-ceramic composite materials are currently one of the most effective tools for solving complex engineering problems in industries such as energy engineering, automotive engineering, machine tool manufacturing, aviation, astronautics and others. The widespread industrial use of metal-ceramic composites is due to the economically advantageous productivity of using these materials due to a significant increase in the service life of mechanisms, machines and equipment, reducing the cost of their repair and maintenance due to the exceptionally high strength, wear resistance and heat resistance of such materials, which allows to create more compact and reliable technical objects.

УДК 51-7

Двойная сверточная архитектура для мультимодального прогнозирования трещинообразования в металлических пластинах при одноосном растяжении

Хряпенко К.Д.[1,a], Григорьева А.Л.[1,b]
[1]Комсомольский-на-Амуре государственный университет, проспект Ленина 27, Комсомольск-на-Амуре, Россия
[a]vicarious024@mail.ru, [b]naj198282@mail.ru

Ключевые слова: трещинообразование, искусственный интеллект, нейронные сети, механика разрушения, машинное обучение.

В статье представлена методология прогнозирования зарождения трещин в конструкционных материалах на основе гибридного применения методов искусственного интеллекта. Для формирования обучающего набора данных проведена серия конечно-элементных симуляций в среде MSC.Patran, охватывающая алюминиевые и стальные пластины с дефектом (техническое отверстие) при одноосном растяжении. На основе результатов расчётов сформированы два типа данных: табличные признаки (приложенная сила, максимальное и минимальное напряжения, тип материала, наличие дефекта или его отсутствие, образование трещины или ее отсутствие) и снимки пластин. Разработаны специализированные нейросетевые модели: многослойный перцептрон для решения задач классификации (наличие/отсутствие трещины) и регрессии (прогноз критической нагрузки) по табличным данным, а также сверточная нейронная сеть для распознавания трещин на изображениях нагруженных образцов. Интеграция моделей в единый программный модуль позволяет оперативно оценивать склонность конструкции к растрескиванию без выполнения ресурсоемкого конечно-элементного анализа в режиме реального времени. Валидация показала высокую точность предсказаний, а предложенный подход обеспечивает сокращение времени инженерного анализа при сохранении физической достоверности результатов.

Введение.

Одной из центральных задач инженерного анализа является предсказание поведения конструкционных материалов при воздействии внешних нагрузок. Особенно критичными являются процессы зарождения и развития трещин: даже микроскопические дефекты способны спровоцировать внезапное разрушение несущих элементов в таких отраслях, как строительство, авиастроение и машиностроение. Классические подходы к моделированию этих явлений – аналитические методы механики разрушения и численные методы, в частности метод конечных элементов (МКЭ) – обладают физической обоснованностью, однако требуют значительных вычислительных затрат и времени, что затрудняет их использование в условиях, где необходимы быстрые инженерные оценки [1-3].

В последние годы методы машинного обучения (МО) искусственного интеллекта (ИИ) демонстрируют возрастающую эффективность в материаловедении и механике деформируемого твердого тела. Нейронные сети, благодаря способности выявлять сложные нелинейные закономерности в многомерных данных, позволяют создавать высокоскоростные прогностические модели, аппроксимирующие механическое поведение материалов [4-6]. Вместе с тем, развитие данного направления сдерживается дефицитом качественных и публично доступных наборов данных, особенно для задач динамического нагружения с образованием трещин [7].

Целью настоящего исследования является создание информационного модуля на основе искусственного интеллекта для оперативного прогнозирования образования трещин в конструкционных материалах, сочетающего высокую точность предсказаний со значительными сокращением времени расчётов по сравнению с традиционными кончено-элементными методами.

Методика исследования. Формирование набора данных.

Для генерации репрезентативного набора данных была применена имитационная среда MSC.Patran. В ходе моделирования исследовались пластины из двух материалов – алюминий и стали – с двумя вариантами геометрии: сплошные и с центральным техническим отверстием [8]. Основные физико-механические и геометрические параметры образцов приведены в табл. 1.

Таблица 1

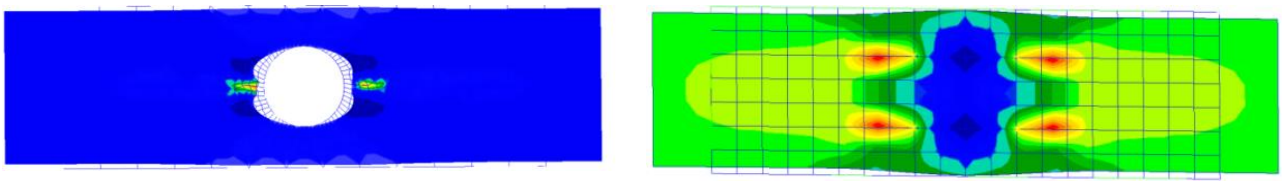
Характеристики исследуемых пластин

Характеристики	Значение
Длина, a	0,1524 м
Ширина, b	0,0508 м
Высота, c	0,003 м
Диаметр отверстия, d	0,0254 м

Для каждой комбинации «материал-геометрия» проводилась мгновенное нагружение растягивающей силой. В результате сформирован сбалансированный набор данных объемом 4000 образцов (по 1000 для каждой комбинации), равномерно распределённых между классами «трещина отсутствует» и «трещина присутствует». Набор включал:

1. табличные признаки: приложенная сила, тип материала, бинарный признак наличия технического отверстия, максимальные и минимальные напряжения, бинарный признак наличия трещины;

2. изображения пластин после деформации (рис. 1) в формате PNG (разрешение 128×128 пикселей).



а) б)

Рис. 1.Изображения пластин
а – пластина с техническим отверстием; б – пластина без технического отверстия

Перед подачей в модели все количественные параметры были приведены к единицам Международной системы (СИ), а изображения подверглись предварительной очистке от визуального «шума» (сетка КЭ, векторы сил) с применением алгоритма цифрового восстановления [9].

Архитектура нейросетевых моделей.

Для решения задачи классификации разработаны две специализированные архитектуры:

1. Многослойный перцептрон (MLP) – обработка табличных данных:

Перед обучением производился подбор лучших параметров модели: размер обучающего файла, вероятность отключения нейронов, количество эпох, оптимизатор.

Структура сети включала входной слой (8 нейронов), два скрытых слоя (128 и 64 нейрона с активацией ReLU) и выходной слой (1 нейрон с сигмоидальной функцией). Для повышения обобщающей способности использовался метод «обнуления» нейронов с вероятностью отключения 0,2. В качестве входных признаков применялись: сила нагружения, максимальное и минимальное напряжения, материал (кодировка: 0 – алюминий, 1 – сталь), наличие отверстия, а также синтезированные признаки (произведения и квадраты исходных переменных). Обучение проводилось путем минимизации бинарной кросс-энтропии (1) с системой ограничений (2):

$$L(\theta) = -\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}[y_i \cdot \log(\hat{y}_i) + (1 - y_i) \cdot \log(1 - \hat{y}_i)] \to min, \quad (1)$$

где y_i – фактическое значение метки (0 или 1); $\hat{y}_i$ – предсказанная вероятность образования трещины. Для компенсации возможного дисбаланса классов на этапе обучения применялся алгоритм SMOTE.

$$\begin{cases} y_i \in \{0,1\}, \hat{y}_i \in (0,1), X \in \mathbb{R}^{N\times d} \\ z_{ij} = \frac{x_{ij}-\mu_j}{\sigma_j} \in Z \in \mathbb{R}^{N\times d},\ \forall i \in [1;N],\ \forall j \in [1;d] \\ \mu_j = \frac{1}{N}\cdot\sum_{i,j} x_{ij}\,, \sigma_j = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i,j}\left(x_{ij}-\mu_j\right)^2}\ , \forall i \in [1;N], \forall j \in [1;d] \\ X' \in \mathbb{R}^{N\times d'},\ d' > d \\ h^{(1)} = ReLU\left(W^{(1)}\cdot x_i' + b^{(1)}\right), W^{(1)} \in \mathbb{R}^{128\times d'}, b^{(1)} \in \mathbb{R}^{128} \\ \widetilde{h^{(1)}} = Dropout(h^{(1)}, p) \\ h^{(2)} = ReLU\left(W^{(2)}\cdot \widetilde{h^{(1)}} + b^{(2)}\right), W^{(2)} \in \mathbb{R}^{64\times 128}, b^{(2)} \in \mathbb{R}^{64} \\ \widetilde{h^{(2)}} = Dropout\left(h^{(2)}, p\right) \\ \hat{y}_i = \sigma\left(W^{(3)}\cdot \widetilde{h^{(2)}} + b^{(3)}\right), W^{(3)} \in \mathbb{R}^{1\times 64}, b^{(3)} \in \mathbb{R} \\ \nabla_\theta L(\theta) \exists, \eta > 0, \beta_1, \beta_2 \in (0,1) \\ t^* = \arg\max_t\left(2\cdot\frac{\text{Precision(t)}\cdot\text{Recall(t)}}{\text{Precision(t)}+\text{Recall(t)}}\right), t \in [0,1] \end{cases}, \quad (2)$$

где $\theta = \{W^{(l)}, b^{(l)}\}$; N – количество объектов; d – количество признаков; x_{ij} – значение -го признака для j-го объекта;; μ_j – среднее значение i -го признака; σ_j – стандартное

отклонение i -го признака; z_{ij} – нормализованное значение; Z – нормализованная матрица; X' – расширенная матрица признаков; l – номер слоя ($l = \overline{1,L}$); $h^{(l)}$ – выход l -го слоя; $W^{(l)}$ – матрица весов размерности $\left(n_{out}^{(l)}, n_{in}^{(l)}\right)$; $b^{(l)}$ – вектор смещений размерности $\left(n_{out}^{(l)},\right)$; $\widetilde{h^{(l)}}$ – случайным образом обнуляет часть нейронов ($h_j^{(l)}$ с вероятностью $1-p$ или 0 с вероятностью p); σ – функция активации (сигмоида); t – пороговое значение.

2. Сверточная нейронная сеть (CNN) – анализ снимков:

Архитектура содержит три сверточных блока (32, 64 и 168 фильтров размером 3×3 с активацией ReLU), чередующихся слоями, реализующих уменьшение размерности входных данных, полносвязный слой (512 нейронов, ReLU), обнуление нейронов с вероятностью0,5 и входной слой (4 нейрона с активацией преобразования вектора чисел в распределение вероятностей) для одновременной классификации по материалу и наличию трещины (четыре класса).

$$J(\Theta) = -\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\sum_{k=1}^{K} y_{ik}\log(\widehat{y_{ik}}) + \lambda\sum_{l=1}^{L}\|W_l\|_F^2 \to min, \quad (3)$$

где N – количество изображений в батче; K – количество классов; y_{ik} – истинная метка для i-го изображения и -го класса; $\widehat{y_{ik}}$ – предсказанная вероятность для i-го изображения и k-го класса; W_l – матрица весов l-го слоя; $\|W_l\|_F^2$ – квадрат нормы Фробениуса матрицы весов; λ – коэффициент регуляризации.

$$\begin{cases} H \times W \times C = 128 \times 128 \times 3 \\ x_{norm} = \frac{x_{i,j,c}}{255} \\ K_h \times K_w = 3 \times 3,\ F = [32,64,128] \\ P_h \times P_w = 2 \times 2 \\ D = H''' \times W''' \times F_L \\ M = 512,\ K = 4 \\ B = 32,\ E = 20,\ \eta = 0.0001,\ \lambda = 0.0001 \end{cases}, \quad (4)$$

где B – размер обучающего файла; E – количество эпох; η – скорость обучения.

Обе модели обучались с использованием оптимизатора Adam (скорость обучения 0,0001, размер обучающего файла 32) [10].

Результаты и обсуждение.

Анализ смоделированных данных выявил значительное влияние геометрических дефектов на прочностные характеристики материалов. Наличие отверстия привело к резкому снижению критической силы, вызывающей образование трещины: для алюминиевых пластин – снижение в 4,22 раза, для стальных – снижение в 9,09 раз. Полученные значения критических нагрузок совпали с теоретическими расчетами по классическим формулам механики разрушения с погрешностью менее 1%, что подтверждает валидность сгенерированного набора данных.

Качественные характеристики обученных моделей представлены в табл. 2.

Таблица 2

Метрики качества моделей

Метрика	MLP	CNN
Точность	0,9425	0,9075
AUC-ROC	0,942	0,9210
F1-мера (класс «трещина»)	0,92	0,90

Особую практическую ценность представляет чувствительность модели многослойного перцептрона вблизи критических значений нагрузки.

На основе разработанных моделей создан единый информационный модуль с интуитивно понятным графическим интерфейсом (рис. 2).

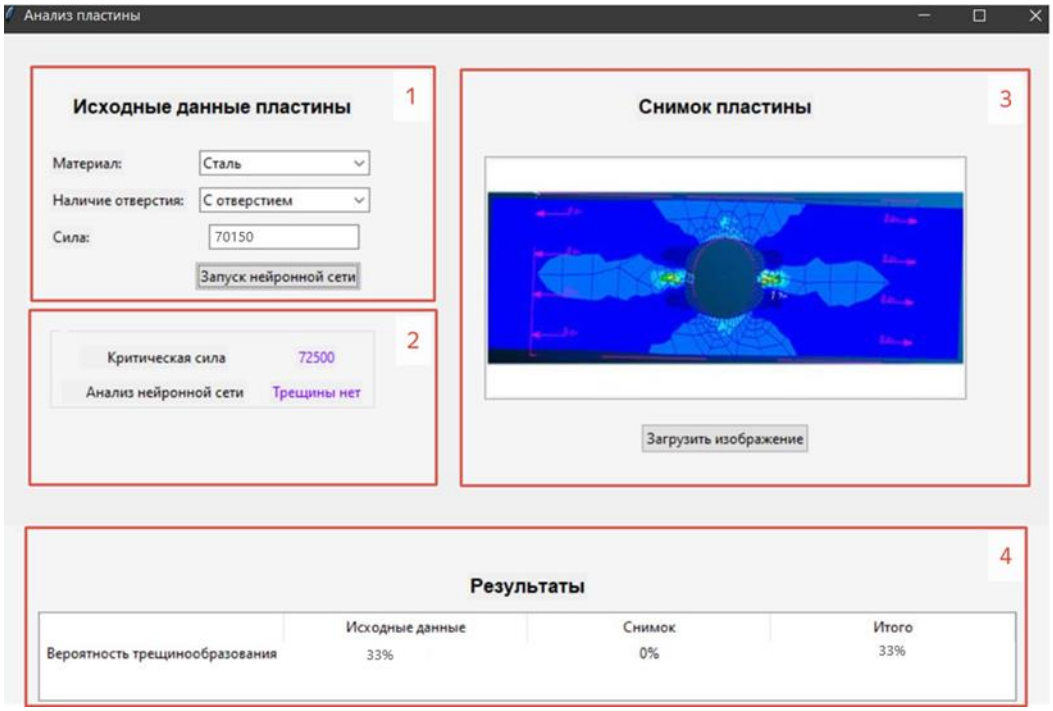


Рис. 2. Интерфейс информационного модуля прогнозирования трещинообразования

Пользователь задает параметры образца (материал, наличие отверстия, величина нагрузки) в блоке 1 и при необходимости загружает изображение деформированной пластины в блоке 3. Система в режиме реального времени предоставляет: расчётную критическую силу для заданной конфигурации в блоке 2; вероятность образования трещины по табличной модели (MLP) и результат визуального анализа изображения (CNN); интегрированный прогноз риска разрушения в блоке 4.

Выводы.

Сформирован и верифицирован набор данных по трещинообразованию в алюминиевых и стальных пластинах, полученный методом конечно-элементного моделирования в среде MSC.Patran и подтвержденный сопоставлением с аналитическими решениями механики разрушения.

Разработаны и обучены две специализированные нейросетевые модели: многослойный перцептрон для прогнозирования вероятности образования трещины по инженерным параметрам и сверточная сеть для визуального распознавания трещин на изображениях. Интеграция моделей в единый программный модуль обеспечивает экспресс-оценку риска разрушения менее чем за одну секунду, исключая необходимость запуска ресурсоемкого конечно-элементного анализа и тем самым ускоряя процесс принятия инженерных решений. Также установлено, что геометрические концентраторы напряжений критически снижают прочность конструкций.

Предложенный подход обладает потенциалом для масштабирования: расширения спектра материалов, включения сложных дефектов (трещины, надрезы), учета дополнительных параметров (длина трещины, тип деформации) и последующей интеграции модуля в промышленные программные комплексы конечно-элементного анализа.

Литература:

1. Cha Y. J. Deep learning-based crack damage detection using convolutional neural networks / Y. J. Cha, W. Choi, O. Büyüköztürk // Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. – 2017. – Vol. 32, № 5. – P. 361–378. – DOI: 10.1111/mice.12263.

2. Zhang Y. Machine learning approach to predict fatigue crack growth / Y. Zhang, C. Wen, C. X. Wang [et al.] // Materials & Design. – 2020. – Vol. 195. – Art. 109047. – DOI: 10.1016/j.matdes.2020.109047.

3. Mozaffar M. Deep learning predicts path-dependent plasticity / M. Mozaffar, R. Bostanabad, W. Chen [et al.] // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. – 2019. – Vol. 116, № 52. – P. 26414–26420. – DOI: 10.1073/pnas.1911815116.

4. Bessa M. A. A framework for data-driven computational mechanics based on manifold learning / M. A. Bessa, R. Bostanabad, Z. Liu [et al.] // Computational Mechanics. – 2017. – Vol. 60, № 5. – P. 835–854. – DOI: 10.1007/s00466-017-1443-4.

5. Liu Y. A machine learning study on the fatigue crack path of short cracks on notched specimens / Y. Liu, Q. Wang, Z. Shen [et al.] // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. – 2023. – Vol. 381, № 2260. – Art. 20220391. – DOI: 10.1098/rsta.2022.0391.

6. Gupta A. Physics-informed neural networks for linear elastic fracture mechanics: Application of assessing stress intensity factor and transverse stress / A. Gupta, S. K. Yadav, S. Natarajan // Engineering Applications of Artificial Intelligence. – 2023. – Vol. 126. – Art. 107142. – DOI: 10.1016/j.engappai.2023.107142.

7. Хряпенко, К. Д. Проблематика определения материала образца в механике деформируемого твердого тела с помощью применения искусственного интеллекта / К. Д. Хряпенко, А. Л. Григорьева // Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению : Материалы III Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, Комсомольск-на-Амуре, 11–12 декабря 2024 года. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2025. – С. 237-240. – EDN BLFSAR.

8. Математическое описание исследования деформации стальных изделий, изготовленных из Ст3 при равномерном растяжении / А. Л. Григорьева, И. В. Канашин, С. Д. Хасаншин, К. Д. Хряпенко // Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению : Материалы Международной научно-практической конференции, Комсомольск-на-Амуре, 07–11 февраля 2022 года. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2022. – С. 208-210. – EDN XLQFPS.

9. Хряпенко, К. Д. Формирование датасета при исследовании поведения материала с использованием MSC.Patran для моделирования трещинообразования / К. Д. Хряпенко, А. Л. Григорьева // Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований : Материалы VIII Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 07–11 апреля 2025 года. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2025. – С. 604-607. – EDN EGDJHQ.

10. Хряпенко, К. Д. Решение задач классификации и регрессии при исследовании поведения материала при трещинообразовании / К. Д. Хряпенко, А. Л. Григорьева // Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований : Материалы VIII Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 07–11 апреля 2025 года. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2025. – С. 600-603. – EDN AXIHKT.

A dual convolutional architecture for multimodal crack prediction in metal plates under uniaxial tension

Khryapenko K.D.[1,a], Grigorieva A.L.[1,b]

[1] Federal State-Financed Educational Institution of Higher Learning «Komsomolsk-na-Amure State University», Lenina 27, Komsomolsk-na-Amure, Russian Federation

[a]vicarious024@mail.ru, [b]naj198282@mail.ru

Keywords: crack formation, artificial intelligence, neural networks, fracture mechanics, machine learning.

This article presents a methodology for predicting crack initiation in structural materials using a hybrid application of artificial intelligence methods. To form a training dataset, a series of finite element simulations were conducted in the MSC.Patran environment, covering aluminum and steel plates with a defect (technical hole) under uniaxial tension. Based on the simulation results, two types of data were generated: tabular attributes (applied force, maximum and minimum stress, material type, presence or absence of defect, crack formation or absence) and plate images.

Specialized neural network models were developed: a multilayer perceptron for solving classification (presence/absence of crack) and regression (critical load prediction) problems based on tabular data, as well as a convolutional neural network for crack recognition in images of loaded specimens. Integrating models into a single software module allows for rapid assessment of a structure's susceptibility to cracking without performing resource-intensive finite element analysis in real time. Validation demonstrated high accuracy of predictions, and the proposed approach ensures a reduction in engineering analysis time while maintaining the physical reliability of the results.

УДК 621.9.02

Расчёт деформаций в задаче о вдавливании клина с ограниченной поверхностью контакта в выпуклую заготовку

Канашин И. В.[1,a], Григорьева А. Л.[1,b], Григорьев Я. Ю.[1,c]
[1]Комсомольский-на-Амуре государственный университет, пр. Ленина 27, Комсомольск-на-Амуре, Россия
[a]kanashin94@mail.ru, [b]naj198282@mail.ru, [c]rector@knastu.ru

Ключевые слова: жёсткопластическое тело, плоская деформация, клин, тензор Альманси, линия разрыва скоростей

В статье приводится расчёт деформаций, возникающих в окрестностях особенностей поля скоростей перемещений, в задаче о вдавливании клина с заданным углом раствора и шириной контактной поверхности в выпуклую заготовку криволинейной симметричной формы. К рассматриваемым особенностям поля скоростей относятся линия разрыва скоростей и центр веера характеристик. В качестве меры деформаций выбран тензор конечных деформаций Альманси. Рассматривается построение пластической области и деформированной поверхности, необходимое для вычисления деформаций. Форма поверхности заготовки задаётся уравнением гиперболического цилиндра. Делаются выводы о том, в окрестностях какой из особенностей поля скоростей деформации будут наибольшими. Приводится сравнение деформаций, получаемых частицами материала в процессе вдавливания, с учётом и без учёта коэффициента трения.

Решение задачи о внедрении симметричного твёрдого недеформируемого клина в жесткопластическое полупространство при условиях текучести Треска – Сен–Венана и Мизеса приводится в работах Хилла, Ли и Таппера [1]. Ими были исследованы положение смещённой поверхности, траектории частиц среды, искажение первоначально квадратной сетки. Решение задач о вдавливании клина с неограниченной, а также ограниченной поверхностью контакта в выпуклое тело рассматривалось в работах Г. И. Быковцева, Д. Д. Ивлева, А. И. Хромова [2, 3]. Исследование полей деформаций в различных точках пластической области в задаче о вдавливании клина в полупространство при условии текучести Кулона-Мора проводилось в работе [4].

Цель данного исследования заключается в определении деформаций в окрестностях особенностей поля линий скольжения – линии разрыва скоростей и центре веера характеристик – при учёте коэффициента трения клина о заготовку.

Процесс внедрения клина шириной $2h$ и углом раствора 2θ в выпуклую симметричную заготовку криволинейной формы можно разделить на два этапа. Пластическое течение на первом этапе соответствует течению в задаче о вдавливании клина в выпуклое тело [5, 6]. Деформированная поверхность образуется в точке C, а в точке A она подминается клином (рис. 1, а). Вновь образовавшийся элемент деформированной поверхности будет оказывать влияние на пластическое течение, определяя положение точки

A через промежуток времени τ_A. Угол раскрытия веера характеристик ψ монотонно уменьшается на протяжении всего этапа.

Второй этап начинается с момента времени t^*, когда вся поверхность клина вступит в контакт с материалом заготовки и точка A займёт положение угловой точки, которое при дальнейшем внедрении клина изменяться не будет. Образование деформированной поверхности будет происходить не только в точке C, но и в точке A (рис. 1, б). Угол раскрытия веера увеличивается от начального значения ψ_0 до конечного значения ψ_k, которое определяется из условия существования продолжения поля напряжения в окрестности точки C.

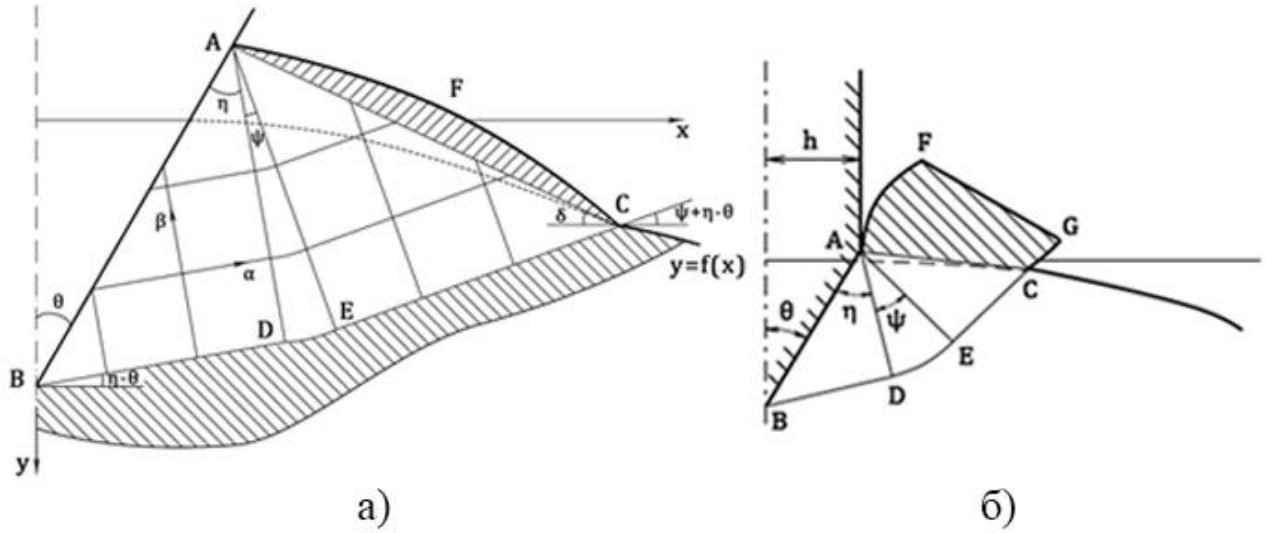


Рис. 1. Внедрение клина с ограниченной поверхностью контакта в выпуклую заготовку
а - первый этап; *б* - второй этап

Пластическая область и форма деформированной поверхности на первом этапе определяются решением системы дифференциальных уравнений с отклоняющимся аргументом.

$$
\begin{gathered}
y'_C(t) - f'(x_C)x'_C = 0,\\
x'_C z_1 - y'_C z_2 - \omega\psi'[x_C \sin\delta\, {z_1}^2 - (y_C + t)\cos\delta\, {z_2}^2] = z_2,\\
x'_C z_1 - \psi' x_C {z_1}^2 \omega \sin\delta + \tau'_A\left[\upsilon_\alpha \cos\left(\eta - \theta + \psi(\tau_A)\right) - x'_C(\tau_A)\right] = \upsilon_\alpha \cos(\eta - \theta + \psi),\\
y'_C \frac{z_2}{tg\theta} - \omega\cos\delta \frac{z_2}{tg\theta}\psi'[ttg\theta + z_2(y_C + t\omega tg\theta \sin\delta)] +\\
+\tau'_A\left[\upsilon_\alpha \sin\left(\eta - \theta + \psi(\tau_A)\right) - y'_C(\tau_A)\right] = \upsilon_\alpha \sin(\eta - \theta + \psi) - \omega \sin\delta\, z_2.
\end{gathered}
\qquad (1)
$$

Здесь x_C, y_C – координаты точки C, $f(x_C)$ – уравнение, задающее форму поверхности заготовки, $\upsilon_\alpha = -V_y \frac{\sin\theta}{\cos\eta}$ – проекция скорости $V_y = -1$ на α −линии, η – угол, связанный с коэффициентом трения μ зависимостью $\mu = \frac{\cos 2\eta}{1+\sin 2\eta}$, $\delta = \frac{\pi}{4} - \eta + \theta - \psi$, τ_A – время начала движения материальной точки, имеющей в момент времени t координаты $x_A(t), y_A(t)$, $z_1 = \frac{1}{1+\omega\cos\delta}$, $z_2 = \frac{tg\theta}{1-\omega tg\theta \sin\delta}$, $\omega = \frac{\sqrt{2}}{\upsilon_\alpha}$.

На втором этапе деформированную поверхность можно разбить на три участка (рис. 1, б): на участке FG поверхность определяется историей деформирования до момента времени t^*. Координаты точки C и угол раскрытия веера ψ как функции времени t определяются из уравнений

$$x_C = x_A + \sqrt{2}\frac{h\cos\eta}{\sin\theta}\cos\left(\frac{\pi}{4} - \eta + \theta - \psi\right),$$
$$y_C = y_A - \sqrt{2}\frac{h\cos\eta}{\sin\theta}\sin\left(\frac{\pi}{4} - \eta + \theta - \psi\right), y_C = f(x_C). \quad (2)$$
$$y_A(t) = y_A(t^*) - t, x_A = h$$

Все точки области $AECGFA$ в данный момент перемещаются с одной и той же скоростью, равной $\upsilon_\alpha = \frac{\sin\theta}{\cos\eta}$. Проекции скорости на оси координат

$$\upsilon_x = \frac{\sin\theta}{\cos\eta}\cos(\eta - \theta + \psi),$$
$$\upsilon_y = \frac{\sin\theta}{\cos\eta}\sin(\eta - \theta + \psi). \quad (3)$$

Поэтому поверхности AF и GC могут быть представлены в параметрическом виде

$$x_1(\tau, t) = h + \int_\tau^t \upsilon_x\, dt, y_1(\tau, t) = y_A(\tau) + \int_\tau^t \upsilon_y\, dt$$
$$x_2(\tau, t) = x_C(\tau) + \int_\tau^t \upsilon_x\, dt, y_2(\tau, t) = y_C(\tau) + \int_\tau^t \upsilon_y\, dt. \quad (4)$$

Параметр τ совпадает со временем выхода рассматриваемой точки поверхности из точек A и C соответственно.

На рис. 2 построены пластическая область и деформированная поверхность в задаче о внедрении клина с шириной контактной поверхности $2h = 0.4$ и углом раствора $2\theta = 60°$ в заготовку, поверхность которой имеет форму гиперболического цилиндра, задаваемую функцией $y = \sqrt{2} - \sqrt{x^2 + 2}$.

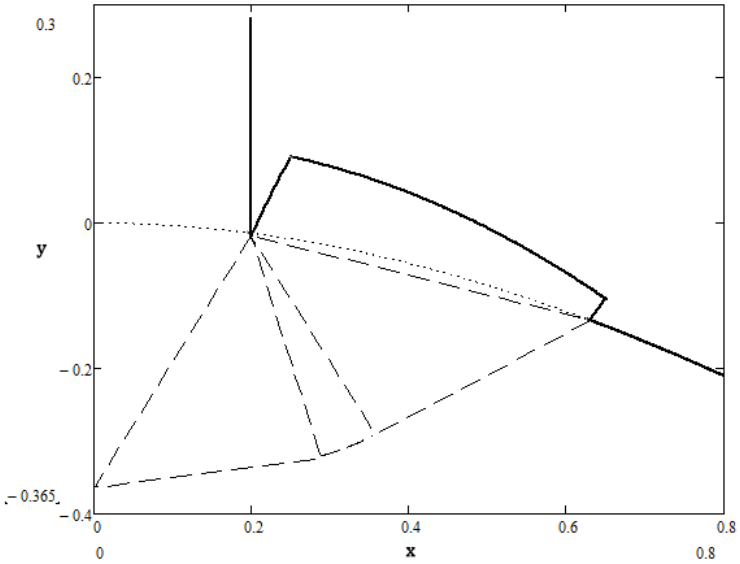


Рис. 2. Пластическая область и деформированная поверхность в задаче о вдавливании клина с углом раствора 60° и шириной 0.4 в заготовку $y = \sqrt{2} - \sqrt{x^2 + 2}$

Деформации на линии разрыва скоростей определяются величиной удельной диссипации энергии $\bar{W}$, которая зависит от нормальной $V_n = 0$ и касательной $[V_\tau] = V^+ - V^- = \frac{\sin\theta}{\cos\eta}$ составляющих скорости, а также нормальной скорости распространения линии $BDEC - G$.

Скорость G определяется соотношением

$$G = \frac{1}{|grad\, f|} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2}}, \quad (5)$$

где $f(x,y)=t$ – функция, определяющая уравнение линии разрыва скоростей перемещений.

Уравнения для составляющих линии $BDEC$ имеют вид:

– линия BD: $xtg(\eta-\theta)-y=t$;

– линия DE: $\begin{cases}x=x_A+R\cos\xi\\ y=y_A+R\sin\xi\end{cases}, R=|AE|, \xi=\alpha-\frac{\pi}{2}$;

– линия EC: $y=y_C+xtg(\eta-\theta+\psi)-x_C tg(\eta-\theta+\psi)$.

Тогда из (5) скорость движения линии разрыва:

$$G=\begin{cases}\cos(\eta-\theta)\\ -\sin\xi, \xi\in\left[\eta-\theta-\frac{\pi}{2};\eta-\theta-\frac{\pi}{2}+\psi\right]\\ \frac{(x-x_C)\psi'}{\cos(\eta-\theta+\psi)}+\cos(\eta-\theta+\psi)\left[y'_C-x'_C\,tg(\eta-\theta+\psi)\right]\end{cases}. \quad (6)$$

Полученные значения скорости G позволяют определить величину объёмной плотности диссипации энергии

$$\bar{W}=\frac{[V_\tau]}{G+V_n},$$

от которой зависит первое главное значение тензора конечных деформаций Альманси и угол между первым главным направлением тензора Альманси и касательной к линии разрыва скоростей:

$$E_1=\frac{\bar{W}^2}{4}\left[\sqrt{1+\frac{4}{\bar{W}^2}}-1\right], tg2\theta=-\frac{2}{\bar{W}}.$$

Деформации в окрестности центра веера определяются решением системы уравнений

$$\begin{aligned}\frac{da_{11}}{d\alpha}\bar{A}-a_{11}\sin\alpha\cos\alpha+a_{21}(\cos\alpha)^2=0,\\ \frac{da_{12}}{d\alpha}\bar{A}-a_{12}\sin\alpha\cos\alpha+a_{22}(\cos\alpha)^2=0,\\ \frac{da_{21}}{d\alpha}\bar{A}-a_{11}(\sin\alpha)^2+a_{21}\sin\alpha\cos\alpha=0,\\ \frac{da_{22}}{d\alpha}\bar{A}-a_{12}(\sin\alpha)^2+a_{22}\sin\alpha\cos\alpha=0.\end{aligned}$$

Здесь a_{ij} – компоненты тензора дисторсии, $\bar{A}=\frac{v_\alpha-a'\cos\alpha-b'\sin\alpha}{v_\alpha}$, $a'=\frac{dx_A}{dt}$, $b'=\frac{dy_A}{dt}$ – закон движения центра веера линий скольжения. Приведённая система может быть решена методом Рунге-Кутты IV порядка; в силу того, что частица попадающая в веер получает начальные деформации на линии EC, решение системы должно удовлетворять начальным условиям

$$A=\begin{bmatrix}1 & 0\\ \bar{W}_{EC} & 1\end{bmatrix}.$$

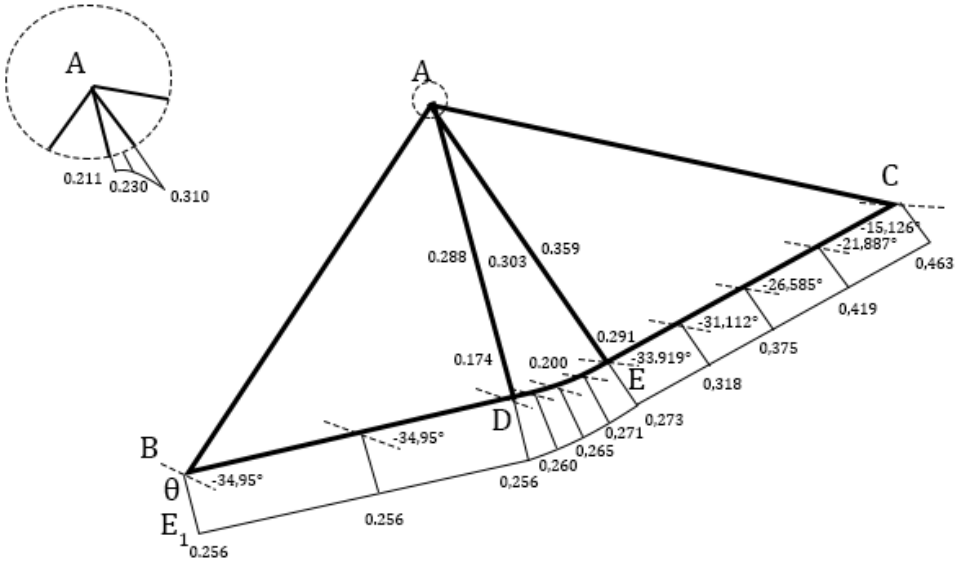


Рис.3. Распределение деформаций на линии разрыва скоростей перемещений и в окрестности центра веера линий скольжения при $t = 0.356$

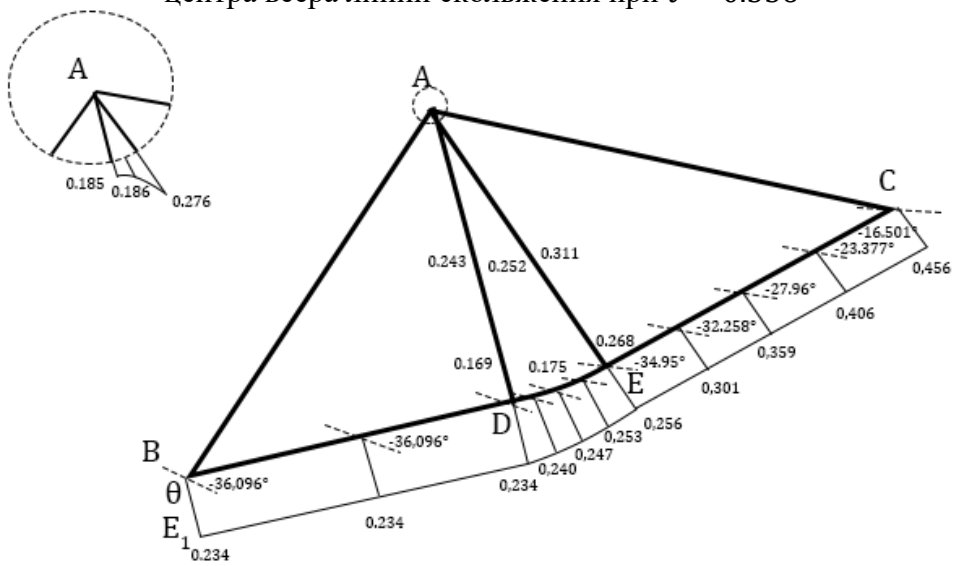


Рис.4. Распределение деформаций на линии разрыва скоростей перемещений и в окрестности центра веера линий скольжения при $t = 0.365$

На рис. 3 приведено распределение деформаций в окрестностях особенностей поля линий скольжения для приведённых выше условий без учёта коэффициента трения, на рисунке 4 показано распределение деформаций с учётом коэффициента трения.

Время деформирования для расчёта на втором этапе для обоих случаев одинаково и равно 0.08. Первый этап деформирования в случае без учёта коэффициента трения заканчивается быстрее и вся поверхность клина вступает в контакт в момент времени $t^* = 0{,}276$; при учёте коэффициента трения $t^* = 0{,}285$.

На первом этапе с увеличением времени происходит рост деформаций, наибольшие деформации в обоих случаях будут наблюдаться в окрестности центра веера. На втором этапе из-за того, что деформированная поверхность будет образовываться также и в точке A, распределение деформаций меняется. Происходит рост деформаций вдоль линии разрыва скоростей $BDEC$, и наибольшие деформации в обоих случаях будут наблюдаться в окрестности точки C.

Из сравнения полученных результатов следует, что при учёте коэффициента трения деформации материала на обоих этапах будут меньше, чем в противном случае. Это обусловливается тем, что деформирование при учёте трения будет более вязким, деформированная поверхность образуется быстрее, но в то же время быстрее подминается клином.

Литература:

1. Хилл, Р. Математическая теория пластичности / Р. Хилл. – Москва: Гостехиздат, 1956. – 407 с.

2. Быковцев, Г. И. Теория пластичности / Г. И. Быковцев, Д. Д. Ивлев. – Владивосток: Дальнаука, 1998. – 528 с.

3. Хромов, А. И. Деформация и разрушение жесткопластических тел / А. И. Хромов. – Владивосток: Дальнаука, 1996. – 183 с.

4. Анисимов, А. Н. Внедрение клина в полупространство при условии текучести Кулона-Мора / А. Н. Анисимов, А. И. Хромов // Вестник Самарского государственного технического университета. Физико-математические науки. – 2007. – № 1(14). – С. 44–49.

5. Григорьев, Я. Ю. Математическая модель задачи о вдавливании клина в выпуклую заготовку /Я. Ю. Григорьев, А. Л. Григорьева, И. В. Канашин // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2025. – № III (83). – С. 117-126.

6. Канашин, И. В. Моделирование процесса определения деформаций и формы деформируемой границы при вдавливании клина в заготовку выпуклой формы / И. В. Канашин, А. Л. Григорьева, Я. Ю. Григорьев // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И. Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. – 2025. – № 2(64). – С. 85-104.

7. Канашин, И. В. Численное решение задачи о вдавливании клина в выпуклое тело / И. В. Канашин, А. И. Хромов // Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению: материалы III Всероссийской научно-практической конференции молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 11-12 декабря 2024 г. / редкол.: А. В. Космынин (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2025. – Ч. 2 – 412 с., с. 184-187.

8. Хряпенко, К. Д. Численное решение задачи о вдавливании клина с ограниченной поверхностью контакта в выпуклое тело / К. Д. Хряпенко, И. В. Канашин, А. И. Хромов // Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению: материалы III Всероссийской научно-практической конференции молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 11-12 декабря 2024 г. / редкол.: А. В. Космынин (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2025. – Ч. 2 – 412 с., с. 188-191.

Calculation of deformations in the problem of pressing a wedge with a limited contact surface into a convex workpiece

Kanashin I.V.[1,a], Grigorieva A.L.[1,b], Grigoriev Y.Y.[1,c]

[1]Komsomolsk-on-Amur state university, pr. Lenina 27, Komsomolsk-on-Amur, Russian Federation
[a] kanashin94@mail.ru, [b] naj198282@mail.ru, [c] rector@knastu.ru

Keywords: rigid-plastic body, plane strain, wedge, Almansi tensor, velocity rupture line

The article presents calculations of deformations arising in the vicinity of features of the displacement velocity field in the problem of pressing a wedge with a given angle of resolution and contact surface width into a convex workpiece of a curvilinear symmetrical shape. The features of the velocity field under consideration include the velocity rupture line and the centre of the fan of characteristics. The Almansi finite deformation tensor is chosen as a measure of deformations. The construction of the plastic region and the deformed surface necessary for calculating deformations is considered. The shape of the workpiece surface is given by the equation of a hyperbolic cylinder. Conclusions are made about the vicinity of which feature of the velocity field the deformations will be greatest. A comparison is given of the deformations obtained by the material particles during the pressing process, with and without taking into account the friction coefficient.

УДК 539.3

Численное решение краевой задачи термоупругости для непрерывно-неоднородных тел с переменным коэффициентом линейного расширения

Веремейчик А.И.[1a]
[1]Брестский государственный технический университет, ул. Московская, 267, Брест, 224017, Беларусь
[a]vai_mrtm@bstu.by

Ключевые слова: напряжения, деформации, краевая задача, интегральное уравнение, неоднородность, термоупругость, коэффициент линейного расширения.

Статья посвящена применению метода граничных интегральных уравнений для исследования напряженно-деформированного состояния непрерывно-неоднородных тел. С помощью метода возмущений трехмерная краевая задача термоупругости изотропных непрерывно-неоднородных тел сводится к последовательности краевых задач термоупругости и теории упругости однородных тел. Построены сингулярные интегральные уравнения трехмерной краевой задачи термоупругости при переменном коэффициенте линейного расширения.

Введение.

Обычно материалы, используемые для изготовления конструктивных элементов машин и механизмов, имеют определенную неоднородность, которую можно разделить на микронеоднородность (дефекты и неправильность кристаллической решетки, молекулярная структура полимеров и т. д.) и макронеоднородность (параметры, определяющие свойства среды) [1, 2]. С позиции инженерной практики интерес представляет исследование напряженно-деформированного состояния (НДС) тел с макронеоднородностью (непрерывной неоднородностью). Неоднородность упругих свойств возникает в процессе формирования тела (различные температурные условия в технологическом процессе), в грунтах и горных выработках (естественная неоднородность), при эксплуатации конструкций под влиянием окружающей среды (термическое воздействие, радиационное облучение, воздействие активных жидкостей и газов). В статье рассматривается решение задачи термоупругости изотропных непрерывно-неоднородных тел при переменном коэффициенте линейного расширения.

Постановка задачи.

Рассмотрим статическую задачу о деформации изотропного упругого тела, механические и тепловые свойства которого зависят от температуры $\left(E(T),\ \alpha(T),\ \upsilon = const\right)$ при стационарном поле температуры T в декартовой системе координат $\left(x_1,\ x_2,\ x_3\right)$. Температура T определяется в результате решения краевой задачи теплопроводности (задача Дирихле). Предполагаем, что источники тепла отсутствуют, а коэффициент теплопроводности есть функция температуры $\lambda = \lambda(T)$. Температурное поле T удовлетворяет уравнению теплопроводности:

$$div\left(\lambda grad T\right) = 0\,. \tag{1}$$

Дифференциальные уравнения равновесия в перемещениях (объемные силы не учитываются) запишутся в виде:

$$\Delta u_i + \frac{1}{1-2\upsilon}\frac{\partial \Theta}{\partial x_i} - \frac{2(1+\upsilon)}{1-2\upsilon}\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\int_0^T \alpha(T)\,dT\right) = -\varphi B_j \frac{2(1+\upsilon)}{E}\sigma_{ij}\,, \tag{2}$$

где φ – малый параметр, определяемый функцией $E(T)$: $\frac{1}{E}\frac{dE}{dT}=\frac{d}{dT}\left[\ln\frac{E}{E_0}\right]=\varphi\Psi(T)$. Так как $\frac{1}{E}\frac{\partial E}{\partial x_j}=\frac{1}{E}\frac{dE}{dT}\frac{\partial T}{\partial x_j}=\varphi\Psi(T)\frac{\partial T}{\partial x_j}=\varphi B_j(x_s)$, то $B_j(x_s)=\Psi(T)\frac{\partial T}{\partial x_j}$.

Граничные условия задачи имеют вид:

$$\sigma_{ij}n_j=q_i(x_s). \tag{3}$$

Одним из наиболее эффективных общих методов решения задач теории упругости неоднородных тел является метод возмущений, предложенный и разработанный В.А.Ломакиным [1], позволяющая свести краевые задачи термоупругости неоднородных тел к последовательности краевых задач термоупругости и теории упругости однородных тел.

Рассматриваемая краевая задача зависит от малого параметра φ и имеет вид разложения по степеням параметра φ. Решение этой задачи также будем искать в виде ряда по степеням φ:

$$u_i=\sum_{r=0}^{\infty}\varphi^k u_i^k\ . \tag{4}$$

Подставляя (4) в уравнения (2) и приравнивая коэффициенты при одинаковых степенях φ, получим краевую задачу для u_i^0:

$$\Delta u_i^{(0)}+\frac{1}{1-2\upsilon}\frac{\partial\Theta^{(0)}}{\partial x_i}-\frac{2(1+\upsilon)}{1-2\upsilon}\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\int_0^T\alpha(T)\,dT\right)=-\varphi B_j\frac{2(1+\upsilon)}{E}\sigma_{ij},$$

$$\sigma_{ij}^0n_j=q_i(x_s). \tag{5}$$

$$\sigma_{ij}^{(0)}=\frac{E(T)}{1+\upsilon}\left[\frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i^{(0)}}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j^{(0)}}{\partial x_i}\right)+\frac{\upsilon}{1-2\upsilon}\Theta^{(0)}\delta_{ij}-\frac{1+\upsilon}{1-2\upsilon}\int_0^T\alpha(T)\,dT\delta_{ij}\right].$$

где i, j = 1,2,3.

Нулевой член ряда (4) u_i^0 будет решением краевой задачи термоупругости (5) однородного тела при удовлетворении граничных условий рассматриваемой области. Последующие члены ряда u_i^k $(k=1,\ 2,...)$ разыскиваются в результате решения краевых задач для u_i^1:

$$\Delta u_i^{(1)}+\frac{1}{1-2\upsilon}\frac{\partial\Theta^{(1)}}{\partial x_i}=-\frac{2(1+\upsilon)}{E^2}\frac{dE}{dT}\frac{\partial T}{\partial x_j}\sigma_{ij}^{(0)},$$

$$\sigma_{ij}^1n_j=0,$$

$$\sigma_{ij}^{(1)}=\frac{E(T)}{1+\upsilon}\left[\frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i^{(1)}}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j^{(1)}}{\partial x_i}\right)+\frac{\upsilon}{1-2\upsilon}\Theta^{(1)}\delta_{ij}\right]$$

и последовательности краевых задач для u_i^k $(k=2,3,...)$

$$\Delta u_i^k+\frac{1}{1-2\upsilon}\frac{\partial\Theta^{(k)}}{\partial x_i}=-\frac{2(1+\upsilon)}{E^2}\frac{dE}{dT}\frac{\partial T}{\partial x_j}\sigma_{ij}^{(k-1)},$$

$$\sigma_{ij}^kn_j=0,$$

$$\sigma_{ij}^{(k)} = \frac{E(T)}{1+\upsilon}\left[\frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i^{(k)}}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j^{(k)}}{\partial x_i}\right) + \frac{\upsilon}{1-2\upsilon}\Theta^{(k)}\delta_{ij}\right],$$

где $\Theta^k = \frac{\partial u_j^k}{\partial x_j}$, $k = 0,\ 1,\ 2,\ldots$, и удовлетворяют однородным граничным условиям. При этом правая часть дифференциальных уравнений для u_i^k рассматривается как фиктивные объемные силы.

Таким образом, пространственная краевая задача термоупругости неоднородных тел сведена к последовательности краевых задач термоупругости и теории упругости однородного тела.

Запишем дифференциальное уравнение равновесия задачи (5) в перемещениях в виде:

$$\Delta u_i^{(0)} + \frac{1}{1-2\upsilon}\frac{\partial^2 u_j^{(0)}}{\partial x_i \partial x_j} = \frac{2(1+\upsilon)}{1-2\upsilon}\frac{\partial}{\partial x_i}\int_0^T \alpha(T)\,dT, \tag{6}$$

где $u_i^{(0)}$ – вектор перемещений, соответствующий нулевому члену ряда (4), $i, j = 1,2,3$.

Температура T считается найденной после решения уравнения (1) и она не является гармонической функцией.

Решение уравнения (6) будем разыскивать в виде:

$$u_i^{(0)} = u_i^U + u_i^T, \tag{7}$$

где общее решение u_i^U соответствует решению задачи теории упругости.

Частное решение u_i^T представляем в виде:

$$u_i^T = \frac{\partial W}{\partial x_i}. \tag{8}$$

Уравнение (6) обращается в тождество при подстановке в него (8), если принять:

$$\Delta W = \frac{1+\upsilon}{1-\upsilon}\int_0^T \alpha(T)\,dT. \tag{9}$$

Через функцию W можно получить формулы температурных перемещений u_i^T, напряжений σ_{ij}^T фиктивной температурной нагрузки p_i^T, построить сингулярные интегральные уравнения и решить поставленную краевую задачу.

Согласно [3], для большинства материалов коэффициент $\alpha(T)$ имеет зависимость:

$$\alpha = \alpha_0(1+\gamma T), \tag{10}$$

α_0 – значение коэффициента теплового расширения для исходного состояния, γ – постоянная величина, определяемая из экспериментов.

Подставляя (10) в (9), имеем:

$$\Delta W = a\left(T + \frac{T^2}{2}\gamma\right), \tag{11}$$

где $a = \frac{1+\upsilon}{1-\upsilon}\alpha_0$.

Коэффициент теплопроводности разных веществ изменяется в широких пределах и зависит от химического состава, физического строения и состояния вещества, а также от температуры. Для многих металлов коэффициент теплопроводности уменьшается с повышением температуры по линейному закону:

$$\lambda = \lambda_0(1-kT), \tag{12}$$

где k – определяется с помощью экспериментальных кривых [3], λ_0 – коэффициент теплопроводности при исходной температуре.

Функция T связана с гармонической функцией T^* при изменяющемся по закону (12) коэффициенте $\lambda(T)$ неявной зависимостью:

$$T^* = \int_0^T \lambda(T)\,dT\,. \tag{13}$$

Подставляя (12) в (13), получаем:

$$T = \frac{1}{k}\left(1-\sqrt{1-\frac{2k}{\lambda_0}T^*}\right). \tag{14}$$

Здесь T^* подчиняется уравнению Лапласа.

Соотношение (14) вносим в (11) и после элементарных преобразований получим:

$$\Delta W = abT - acT^*, \tag{15}$$

где $b = 1+\frac{\gamma}{k}$, $c = \frac{\gamma}{k\lambda_0}$, или в случае внутренней области имеем:

$$\Delta W = abT - ac\left[\oint_{S_i+S_e}\chi(y)\frac{\cos\varphi}{r^2}dS_y + \sum_{k=1}^{n}\frac{A_k}{r_{A_k}}\right]. \tag{16}$$

Используя потенциал с фиктивной плотностью T, представим первое слагаемое в правой части (16) объемным потенциалом:

$$\Delta W = -\frac{ab}{4\pi}\int_V T(y)\Delta\left(\frac{1}{r}\right)dV_y - ac\left[-\oint_{S_i+S_e}\chi(y)\Delta\left(\frac{d(r/2)}{dn(y)}\right)dS_y + \sum_{k=1}^{n}A_k\Delta\left(\frac{r_{A_k}}{2}\right)\right]. \tag{17}$$

Тогда функция W принимает вид:

$$W = -\frac{ab}{4\pi}\int_V T(y)\frac{1}{r}dV_y + \frac{ac}{2}\left[\sum_{k=1}^{n}\oint_{S_i+S_e}\chi(y)\cos\varphi dS_y - \sum_{k=1}^{n}A_k r_{A_k}\right]. \tag{18}$$

Представим эту функцию в виде суммы $W = \overset{(N)}{W} + \overset{(G)}{W}$:

$$W = \overset{(N)}{W} + \overset{(G)}{W} = -a\oint_S \chi(y)\frac{\cos\varphi}{2}dS_y + \frac{a}{2}\sum_{k=1}^{n}A_k r_{A_k}\,. \tag{19}$$

Рассмотрим функцию $\overset{(G)}{W} = \frac{a}{2}\sum_{k=1}^{n}A_k r_{A_k}$. Запишем перемещения в виде суммы:

$$u_i^T = \overset{(K)}{u}{}_i^T + \overset{(M)}{u}{}_i^T, \tag{20}$$

где $\overset{(K)}{u}{}_i^T$ – частное решение, зависящее от температурной объемной нагрузки,

$$u_i^T = -\frac{a}{2}\oint_S \chi(y)\frac{\partial^2 r}{\partial n(y)\partial x_i}dS_y = -\frac{a}{2}\oint_S \frac{1}{r}\left[\beta_i\cos\varphi - n_i(y)\right]dS_y\,,$$

$$\overset{(M)}{u}{}_i^T = \frac{\partial W^{(M)}}{\partial x_i} = -\frac{a}{2}\sum_{k=1}^{n}A_k\beta_i^{(A_k)}\,. \tag{21}$$

Тогда температурные добавки перемещений примут вид:

$$u_i^T = -\frac{a}{2}\left\{\oint_S \chi(y)\frac{1}{r}\left[\beta_i\cos\varphi - n_i(y)\right]dS_y + \sum_{k=1}^{n}A_k\beta_i^{(A_k)}\right\}. \tag{22}$$

Температурные добавки напряжений во внутренних точках области V^+ определяется:

$$\sigma_{ij}^{T}(x)=\overset{(K)}{\sigma}{}_{ij}^{T}+\overset{(M)}{\sigma}{}_{ij}^{T}=-\mu a\left\{\oint_S\frac{\chi(y)}{r^2}\Big[3\beta_i\beta_j\cos\varphi-n_i(y)\beta_j-\right. \tag{23}$$

$$\left.-n_j(y)\beta_i+\delta_{ij}\cos\varphi\Big]dS_y+\sum_{k=1}^{n}A_k\frac{\beta_i^{(A_k)}\beta_j^{(A_k)}+\delta_{ij}}{r_{A_k}}\right\}.$$

Определим слагаемые температурных добавок перемещений $\overset{(N)}{u}{}_i^T$ и напряжений $\overset{(N)}{\sigma}{}_i^T$, которые выражаются через $\overset{(N)}{W}$. Для этого внесем $\overset{(N)}{W}$ в формулы (8) и в выражения для температурных добавок напряжений [4]:

$$\sigma_{ij}^{T}=\frac{E}{1+\upsilon}\left(\frac{\partial^2 W}{\partial x_i\partial x_j}-\Delta W\delta_{ij}\right). \tag{24}$$

Выполняя подстановку, необходимо иметь частные производные от объемного потенциала

$$Q=\int_V T(y)\frac{1}{r}dV_y \tag{25}$$

и вместе с тем возникает необходимость рассмотреть основные свойства этого потенциала и его частных производных.

Исследование свойств объемного потенциала.

При рассмотрении потенциала (18) считаем, что плотность потенциала $T(y)$ удовлетворяет условию Гёльдера [5]. При соблюдении этого условия плотность есть непрерывная функция координат и потенциал удовлетворяет уравнению Пуассона [6].

Продифференцируем (25):

$$\frac{\partial Q}{\partial x_i}=\int_V T(y)\frac{\beta_i}{r^2}dV_y, \tag{26}$$

$$\frac{\partial^2 Q}{\partial x_i\partial x_i}=\int_V T(y)\frac{3\beta_i\beta_i-\delta_{ij}}{r^3}dV_y. \tag{27}$$

Интеграл в (26) сингулярный порядок его особенности равен мерности области интегрирования [7]. Его сингулярную часть, представляющую вклад точки $x=y$, вычисляем следующим образом. Вокруг этой точки опишем сферу радиуса ε. Эта сфера выделит из области V^+ шаровую область Q. Тогда

$$J=\int_V T(y)\frac{3\beta_i\beta_i-\delta_{ij}}{r^3}dV_y=\int_{V/Q}T(y)\frac{3\beta_i\beta_i-\delta_{ij}}{r^3}dV+\int_Q T(y)\frac{3\beta_i\beta_i-\delta_{ij}}{r^3}dV_y. \tag{28}$$

Предел первого слагаемого интеграла при $\varepsilon\to 0$ является главным значением по Коши сингулярного интеграла или его регулярной частью. Для вычисления второго слагаемого интеграла формально применим теорему Гаусса:

$$J=\int_V T(y)\frac{\partial^2(1/r)}{\partial x_i}dV_y=T(x)\oint_S n_i(x)\left(-\frac{\beta_i}{r^2}\right)dS_y.$$

Т.к. нормаль $n_i(x)$ совпадает с направляющими косинусами, имеем:

$$-T(x)\oint_S\frac{\beta_i\beta_j}{r^2}dS_y=-T(x)\frac{1}{\varepsilon^2}\varepsilon^2\oint_S\beta_i\beta_j d\omega, \tag{29}$$

где принято $dS=r^2d\omega$, ω - телесный угол, $i,\ j=1,2,3$.

Перейдем к полярной системе координат r, φ, ϑ. Учитывая, что $\beta_1=\sin\vartheta\cos\varphi$, $\beta_2=\sin\vartheta\sin\varphi$, $\beta_3=\cos\vartheta$, $d\omega=-d\varphi d(\cos\vartheta)$, проинтегрировав (29), находим при $i=j$,

$J(x) = -\frac{4}{3\pi} T(x)$, при $i \neq j$, $J(x) = 0$.

Таким образом сингулярный интеграл примет вид

$$J(x) = -\frac{4}{3}\pi T(x)\delta_{ij} + V.p.\int_V T(y)\frac{3\beta_i\beta_i - \delta_{ij}}{r^3} dV_y . \quad (30)$$

Рассмотрим ещё одно свойство объёмного потенциала. Оно характерно тем, что при пересечении поверхности S тела вторые частные производные потенциала (25) испытывают скачок. Величину этого скачка, согласно [5], можно определить, воспользовавшись способом Вейнгартена:

$$J(x_S) = \eta 2\pi n_i(x) n_j(x) T(x) + V.p.\int_V T(y)\frac{3\beta_i\beta_i - \delta_{ij}}{r^3} dV_y . \quad (31)$$

Здесь $\eta = -1$ при стремлении точки x к S изнутри (внутренняя задача) и $\eta = 1$ при $x \to S$ снаружи (внешняя задача).

Интегралы (30), (31) можно использовать для построения формул температурных добавок перемещении и напряжений.

Построение интегральных формул перемещений, напряжений и системы СИУ задачи.

Чтобы получить формулы термоупругих перемещений и напряжений, оказывается достаточном рассмотреть температурные добавки этих величин, которые выражаются через функцию $\overset{(N)}{W}$ и затем простым суммированием с уже определёнными выше другими слагаемыми перемещений и напряжений определить итоговые величины.

Температурные добавки перемещении определяем, подставив $\overset{(N)}{W}$ в (8), тогда с учётом (30) получим:

$$\overset{(N)}{u}{}_i^T = -\frac{ab}{4\pi}\int_V T(y)\frac{\beta_i}{r^2} dV_y . \quad (32)$$

Для определения температурных добавок напряжений используем формулу (24), которая является справедливой и в этом случае. Внося в (24) функцию $\overset{(N)}{W}$ и учитывая результаты п. 2, получим интегральные формулы добавок напряжений в точках внутри V^+:

$$\overset{(N)}{\sigma}{}_{ij}^T(x) = -\frac{a_1 E(T)}{4\pi}\left[\int_V T(y)\frac{3\beta_i\beta_j - \delta_{ij}}{r^3} dV_y + 4\pi T\delta_{ij}\right], \quad (33)$$

где $a_1 = \frac{b\alpha_0}{1-\upsilon}$.

В особых точках напряжения определяем по формуле

$$\overset{(N)}{\sigma}{}_{ij}^T(x_0) = -\frac{a_1 E(T)}{4\pi}\left[\int_V T(y)\frac{3\beta_i\beta_j - \delta_{ij}}{r^3} dV_y + \frac{8}{3}\pi T(x)\delta_{ij}\right]. \quad (34)$$

Добавки напряжений в граничных точках выражаются по формуле:

$$\overset{(N)}{\sigma}{}_{ij}^T(x_S) = -\frac{a_1 E(T)}{4\pi}\left\{\int_V T(y)\frac{3\beta_i\beta_j - \delta_{ij}}{r^3} dV_y + 4\pi T(x_S)\left[\delta_{ij} - \frac{n_i(x_S)n_j(x_S)}{2}\right]\right\}. \quad (35)$$

Если теперь $\overset{(N)}{W}$ подставим в формулу фиктивной поверхностной нагрузки $\bar{p}_T = 2\mu\left(\alpha\frac{1+\upsilon}{1-\upsilon}\bar{n}_0 T_s - grad\frac{dW}{dn}\right)$ [3], получим слагаемое этой нагрузки:

$$\overset{(N)}{f}{}_i^T(x_S) = -\frac{a_1 E(T)}{4\pi}\left\{\int_V \frac{1}{r^3}\left[3\beta_i\cos\varphi - n_i(x_S)\right] dV_y + 4\pi T(x_S)n_i(x_S)\right\}. \quad (36)$$

Полностью формулу для $f_i^T(x_S)$ нетрудно получить суммированием (36) с другим слагаемым, которое выражается через $\overset{(G)}{W}$:

$$f_i^T(x_S)=-\frac{a_0E(T)}{1-\upsilon}\left(\left\{\sum_{k=1}^{n}\oint_{S_k+S_e}\chi(y)\frac{1}{r^2}\left[3\beta_i\cos\varphi\cos\psi-n_i(y)\cos\psi-\right.\right.\right.$$
$$\left.-\beta_i\cos\xi+n_i(x_S)\cos\varphi\right]dS_y+\sum_{k=1}^{n}A_k\frac{\beta_i^{(A_k)}\cos\varphi^{(A_k)}+n_i(x_S)}{r_{A_k}}\Bigg\}c+ \tag{37}$$
$$\left.+\frac{b}{4\pi}\int_V\frac{1}{r^3}\left[3\beta_i\cos\varphi-n_i(x_S)\right]dV_y+2\pi T(x_S)n_i(x_S)\right).$$

Полные перемещения $u_i^{(0)}$ определяются суммированием (32) с выражением, которое получается подстановкой $\overset{(G)}{W}$ в (8) и перемещениями u_i^U.

$$u_i^{(0)}=u_i^U+u_i^T=u_i^U+\overset{(G)^T}{u}_i+\overset{(N)^T}{u}_i=u_i^U+\frac{a}{2}\left\{\oint_S\chi(y)\frac{1}{r}\left[\beta_i\cos\varphi-\right.\right.$$
$$\left.\left.n_i(y)\right]dS_y+\sum_{k=1}^{n}A_k\beta_i^{(A_k)}-\frac{b}{2\pi}\int_V T(y)\frac{\beta_i}{r^2}dV_y\right\}, \tag{38}$$

Полные напряжения задачи определяем для внутренних точек области как

$$\sigma_{ij}^{(0)}(x)=\sigma_{ij}^U(x)+\overset{(G)^T}{\sigma}_{ij}(x)+\overset{(N)^T}{\sigma}_{ij}(x)=\sigma_{ij}^U(x)+\frac{a_0E(T)}{2(1-\upsilon)}\times$$
$$\times\left(c\left\{\oint_S\frac{\chi(y)}{r^2}\left[3\beta_i\beta_j\cos\varphi-n_i(y)\beta_j-n_j(y)\beta_i+\delta_{ij}\cos\varphi\right]dS_y+\right.\right. \tag{39}$$
$$\left.\left.+\sum_{k=1}^{n}A_k\frac{\beta_i^{(A_k)}\beta_j^{(A_k)}+\delta_{ij}}{r_{A_k}}\right\}-\frac{b}{2\pi}\int_V T(y)\frac{3\beta_i\beta_j-\delta_{ij}}{r^3}dV_y+4\pi T\delta_{ij}\right).$$

Здесь $\sigma_{ij}^U(x)$ – напряжения, которые соответствуют решению и определяются по формуле (40) без неинтегральных слагаемых:

$$\sigma_{ij}=n_i(x)\upsilon_j(x)+n_j(x)\upsilon_i(x)-\frac{n_i(x)n_j(x)-\upsilon\delta_{ij}}{1-\upsilon}\upsilon_n(x)+ \tag{40}$$
$$+\frac{1}{4\pi(1+\upsilon)}\oint_S\frac{\upsilon_k(y)}{r^2}\left[(1-2\upsilon)\left(\delta_{ik}\beta_j+\delta_{kj}\beta_i-\delta_{ij}\beta_k\right)+3\beta_i\beta_j\beta_k\right]dS_y,$$

где $\upsilon_n(x)=n_m(x)\upsilon_m(x)$. Интегралы в (40) следует понимать в смысле главного значения по Коши.

При вычислении напряжений в особых точках, возникающих для последнего слагаемого в правой части (39), вместо этого слагаемого используем формулу (34).

Полные напряжения в граничных точках определяются

$$\sigma_{ij}^{(0)}(x_S)=\sigma_{ij}^U(x_S)+\frac{a_0E(T)}{2(1-\upsilon)}\left(4\pi\chi(x_S)\left[\delta_{ij}-n_i(x_S)n_j(x_S)\right]c+V.p.\overset{(G)^T}{\sigma}_{ij}(x_S)-\right.$$
$$\left.-\frac{b}{2\pi}\left\{\int_V T(y)\frac{3\beta_i\beta_j-\delta_{ij}}{r^3}dV_y+4\pi T(x_S)\left[\delta_{ij}-\frac{n_i(x_S)n_j(x_S)}{2}\right]\right\}\right). \tag{41}$$

Систему сингулярных интегральных уравнений получаем подстановкой (41) в граничные условия задачи (5):

$$\upsilon_i(x)+\frac{1}{4\pi(1-\upsilon)}\oint_S \frac{\upsilon_k(y)}{r^2}\Big\{(1-2\upsilon)\big[\delta_{ik}\cos\psi+n_k(x)\beta_i-n_i(x)\beta_k\big]+ \\ +3\beta_i\beta_j\cos\psi\Big\}dS_y=f_i(x_S)+f_i^T(x_S). \tag{42}$$

Система сингулярных интегральных уравнений (42), а также интегральные формулы (38, 39, 41) дают решение краевой задачи трёхмерной термоупругости в случае когда коэффициент $\alpha(T)$ является функцией температуры. Эти формулы являются также решением в первом приближении трехмерной краевой задачи термоупругости неоднородного тела.

Если рассматривается внешняя область, используем аналогичный подход, однако при вычислении отдельных значений напряжений в (35) берем внешний предел.

Заключение.

В статье рассмотрено применение метода граничных интегральных уравнений к решению трехмерной краевой задачи термоупругости изотропных непрерывно-неоднородных тел при переменном коэффициенте линейного расширения. С помощью метода возмущений решение краевой задачи термоупругости изотропных непрерывно-неоднородных тел сведено к решению последовательности краевых задач изотермической термоупругости и теории упругости с учетом фиктивных массовых сил. Построены интегральные формулы перемещений, напряжений и сингулярные интегральные уравнения краевой задачи.

Литература:

1. Ломакин В. А. Теория упругости неоднородных тел / В. А. Ломакин. – М. : Изд. МГУ. – 1976. – 367 с.

2. Веремейчик, А. И. К решению плоских краевых задач термоупругости неоднородных тел методом потенциала / А. И. Веремейчик, В. В. Гарбачевский, В. М. Хвисевич // Теоретическая и прикладная механика : международный научно-технический журнал. Вып. 30 / редкол.: А. В. Чигарев [и др.]. – 2015. – С. 184-189.

3. Писаренко, Г. С. Прочность материалов при высоких температурах / Г. С. Писаренко, В. Н. Руденко, Г. Н. Третьяченко. – М. : Наука, 1966. – 796 с.

4. Хвисевич, В. М. Численное решение двухмерных краевых задач термоупругости неоднородных тел / В. М. Хвисевич, А. И. Веремейчик // Перспективные материалы и технологии: монография: в 2 томах / под. ред. чл.-корр. Рубаника В. В. – Витебск : УО «ВГТУ», 2019.– Т. 2. – Гл. 7. – С. 87–104.

5. Копейкин, Ю. Д. Применение бигармонических потенциалов в краевых задачах статики упругого тела: дисс. … доктора физ.-мат. наук 01.02.04 / Ю. Д. Копейкин. – М., 1969. – 280 с.

6. Хвисевич, В. М. Прямое решение трехмерных краевых задач несвязанной стационарной термоупругости методом интегральных уравнений теории потенциала: дис. ... канд. техн. наук: 01.02.04 / В. М. Хвисевич. – М. : МИСИ, 1980. – 230 с.

7. Михлин, С. Г. Приложения интегральных уравнений к некоторым проблемам механики математической физики и техники. – М. – Л. : Гостехиздат. – 1947. – 304 с.

Numerical solution of the thermoelastic boundary value problem for continuously inhomogeneous bodies with a variable coefficient of linear expansion

Verameichyk A.I.[1,a]

[1]Brest State Technical University, Moskovskaya st., 267, 224017, Brest, Belarus

[a]vai_mrtm@bstu.by

Keywords: stresses, deformations, boundary value problem, integral equation, inhomogeneity, thermoelasticity, coefficient of linear expansion.

The article is devoted to the application of the method of boundary integral equations for the study of the stress-strain state of continuously inhomogeneous bodies. Using the perturbation method, the three-dimensional boundary value problem of thermoelasticity of isotropic continuously inhomogeneous bodies is reduced to a sequence of boundary value problems of thermoelasticity and elasticity theory of homogeneous bodies. Singular integral equations of the three-dimensional thermoelastic boundary value problem with a variable linear expansion coefficient have been constructed.

УДК 621.01; 621.81; 621.646

Особенности моделирования шероховатых поверхностей для задач герметологии

Огар П.М.[1,a], Сампетова М.В.[1,b], Сангзода А.А.[1,c], Угрюмова Е.В.[1,d], Маргарян Д.Э.[1,e]

[1]Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия

[a] ogar@brstu.ru, [b] sampetovamv @mail.ru, [c] adamjonsaidov4@gmail.ru, [d] hellensh@yandex.ru, [e] jerocko72@gmail.ru

Ключевые слова: шероховатая поверхность, кривая опорной поверхности, парабола, бета-функция, распределение высот неровностей, контактные характеристики.

Основной проблемой является необходимость высокоточного описания микрогеометрии уплотнительных поверхностей для обеспечения герметичности соединений. В работе рассмотрена дискретная модель шероховатой поверхности с использованием кривых опорной поверхности. Разработана усовершенствованная дискретная модель шероховатости, позволяющая находить функции распределения вершин и впадин неровностей на основе параметров опорной кривой.

Введение.

Одним из важнейших факторов, определяющих герметичность соединений, является микрогеометрия уплотнительных поверхностей. В этой связи задача моделирования топографии весьма актуальна, и ее эффективное решение позволяет более точно описать процесс контактного взаимодействия шероховатых поверхностей.

Уплотнительная поверхность является весьма сложным объектом по набору составляющих элементов, их иерархии и взаимному расположению. Отклонение реальной поверхности от идеально гладкой связано с воздействием на тело различных независимых факторов. Поэтому можно представить поверхность как совокупность неровностей четырех размерных уровней: макроотклонений, волнистости; шероховатости и субшероховатости. При этом нет каких-либо ограничений на размерные диапазоны неровностей и не существует всесторонне обоснованного критерия разделения неровностей по масштабу [1]. В качестве условного критерия используют отношение шага и высоты неровности S_i / H_i . Критерии неровностей смежных уровней различаются на порядок и более.

Для модельного представления, принятого в трибомеханике, используют разные подходы – от детерминистского до статистического, фрактального [2] и конечно-элементного. Каждый из них имеет достоинства и недостатки, поэтому правильный выбор метода описания поверхности во многом зависит от решения конкретной задачи. При решении задач герметологии возникает необходимость определения контактных характеристик – относительной площади контакта и плотности стыка, а также геометрических параметров микроканалов в стыке и вероятность протекания среды.

В настоящей работе основное внимание будет уделено неровностям уровня шероховатости, которые характеризуются некоторыми особенностями:

1. Поскольку контактное давление $\bar{q}_i$ необходимое для полного деформирования неровности $i-го$ уровня, при упругом контакте пропорционально $(S_i / H_i)^{-1}$,т.е.

$$\bar{q}_i \Theta \sim (S_i / H_i)^{-1},$$

где θ – упругая постоянная, то во многих случаях для тяжело нагруженного контакта, когда $q_c > q_i$, макроотклонения и волнистость будут деформированы полностью. Для шероховатости, как показано в [2], $\bar{q}\theta \to \infty$.

2. В конкретных случаях, когда необходимо учитывать макроотклонения и волнистость, могут быть успешно использованы детерминистские или другие модели, для которых имеются решения контактных задач [3, 4 и др.].

3. В отличие от уровней макроотклонений и волнистости, для которых характерен только упругий контакт, для неровностей уровня шероховатости возможны разные виды контакта, причем одновременно.

4. Параметры шероховатости в большей мере стандартизированы.

5. Нижеприведенная модель шероховатости может быть использована для описания неровностей других уровней.].

Структурная организация и морфологическое строение неровностей.

Для более достоверного описания шероховатой поверхности необходимо охарактеризовать ее как пространственный объект с определенной топологией. Следует выделить два уровня понятий, позволяющих это сделать. Первый из них связан со структурной организацией неровностей друг относительно друга, второй – с морфологическим строением элементарных объектов (неровностей), составляющих поверхность [1].

Структурную организацию неровностей можно описать, используя текстурные признаки. Образование текстуры связывают с неслучайным характером внешних формообразующих воздействий на обрабатываемую поверхность в процессе механической обработки. На качественном уровне текстуру описывают как мелкозернистую, крупнозернистую, гладкую, нерегулярную и т.п. [1]. Количественные изменения текстуры могут быть связаны с применением автокорреляционных функций и определением главных корреляционных направлений [5]. Поэтому для учета текстуры в модель должны входить параметры шероховатости, определяющие автокорреляционные функции в главных корреляционных направлениях. Такими параметрами являются шаги неровностей в продольном и поперечном направлениях $S_{пр}, S_{поп}, S_{mпр}, S_{m поп}$ и среднеквадратические отклонения профиля $R_{q\,пр}, R_{q\,поп}$. Текстура в неявном виде регламентируется ГОСТ 2.309-73 как «направленность обработки».

Если локальные характеристики в пределах некоторого участка претерпевают существенные изменения, то преобладающим признаком области будет текстура, если несущественные, то доминирующим признаком в геометрических свойствах поверхности является морфология неровности. Текстура и морфология объединяются общим термином «топология».

Таким образом, шероховатая поверхность является сложным структурно-организованным геометрическим объектом, который обладает различными характеристиками, обусловленными как масштабными факторами (метрические), так и представлением о топологии строения (топологические) [1].

Следует отметить, что не все параметры шероховатости можно однозначно отнести либо к метрическим, либо к топологическим, так как по соотношению нескольких метрических характеристик (параметров) по главным корреляционным направлениям можно получить информацию о топологии. Однако такой подход несколько упрощает изучение и моделирование шероховатой поверхности.

Описание опорных кривых профиля параболой и отношением бета-функции.

Дискретная модель контактирования шероховатых поверхностей, разработанная И.В. Крагельским и Н.Б. Демкиным с учениками, базируется на описании начальной части опорной кривой профиля шероховатой поверхности параболой:

$$t_p = \eta(\varepsilon) = b\varepsilon^{\nu}, \quad (1)$$

где ν и b – константы; $\varepsilon = y/R_{\max}$ – относительное расстояние от линии выступов; y – расстояние от линии выступов до рассматриваемого уровня; $R_{\max}$ – максимальная высота неровностей.

Так как параллельные профили шероховатой поверхности обладают свойством эргодичности, то опорная площадь шероховатой поверхности $\eta(\varepsilon)$ совпадает с опорной кривой профиля $t_p(\varepsilon)$. Поэтому для определения функции распределения неровностей используется выражение (1).

Впоследствии Н.Б Демкиным [6] было предложено для описания опорной кривой всего профиля, а не только его начальной части, использовать регуляризованную неполную бета-функцию:

$$t_p(\varepsilon) = I_{\varepsilon}(p,q) = \frac{\mathrm{B}_{\varepsilon}(p,q)}{\mathrm{B}(p,q)}, \quad (2)$$

где

$$p = \left(\frac{R_p}{R_q}\right)^2 \left(\frac{R_{\max} - R_p}{R_{\max}}\right) - \frac{R_p}{R_{\max}}, \quad q = p\left(\frac{R_{\max}}{R_p} - 1\right). \quad (2a)$$

$\mathrm{B}_{\varepsilon}(p,q)$ и $\mathrm{B}(p,q)$ – неполная и полная бета-функции; R_p– глубина сглаживания профиля; R_q– среднеквадратическое отклонение профиля.

Для анализа результатов, полученных с использованием разных опорных кривых, важно знать соотношения между параметрами p и q при описании опорной кривой профиля регуляризованной неполной бета-функцией, и параметрами ν и b – при описании опорной кривой параболой, которые определяется следующими выражениями [7]:

$$\nu = \frac{\mathrm{B}_{\varepsilon_p}(p+1,q)}{\varepsilon_p \mathrm{B}_{\varepsilon_p}(p,q) - \mathrm{B}_{\varepsilon_p}(p+1,q)}, \; b = \frac{\mathrm{B}_{\varepsilon_p}(p,q)}{\mathrm{B}_{\varepsilon_p}(p+1,q)}\left(\frac{p+q}{p}\right)^{\nu}, \quad (3)$$

где

$$\varepsilon_p = \frac{R_p}{R_{\max}} = \frac{p}{p+q}$$

Моделирование шероховатых поверхностей.

Считаем, что исходными данными для модельного представления шероховатой поверхности являются параметры шероховатости по стандартам ISO 4287–1997, ISO 4287/1–1997: максимальная высота неровностей $R_{\max}$, среднее арифметическое отклонение профиля R_a, среднеквадратическое отклонение профиля R_q, глубина сглаживания R_p, шаг неровностей по вершинам S, шаг неровностей по средней линии S_m, относительная опорная длина профиля t_p, относительная опорная длина профиля на средней линии t_m, средний наклон профиля Δ_a, средний квадратический наклон профиля Δ_q. Таким образом, для разрабатываемой модели стандартные параметры шероховатости по главным корреляционным направлениям должны совпадать с соответствующими параметрами реальной поверхности.

При определении герметичности используют следующие модели шероховатости: в виде нормального случайного поля, дискретную, фрактальную, дискретно-фрактальную, конечно-элементную.

Модель в виде нормального случайного поля может быть использована для уплотнительных поверхностей, образованных после абразивной обработки, а также чистовой обработки лезвийным инструментом. В работах [8, 9] она использовалась для определения геометрических размеров сечений микроканалов – площади и периметра, а также для числа

микроканалов на единицу длины профиля. При этом модель в виде нормального случайного поля предполагает симметричность относительно средней линии профиля, что не всегда имеет место в уплотнительных поверхностях. Поэтому такая модель шероховатости не может являться универсальной.

Конечноэлементную модель шероховатой поверхности получают путем сканирования реальной поверхности с помощью профилографа-профилометра, представления информации в память ЭВМ и получении поверхности в виде $z(x,y)$. Этот метод не позволяет синтезировать поверхность с заданными параметрами и рассматривать их влияние на герметичность.

При использовании фрактальной модели шероховатости также получают шероховатую поверхность вида $z(x,y)$, однако при этом имеется возможность синтезировать ее с помощью модифицированной функции Вейерштрасса-Мандельброта с заданными высотными и шаговыми параметрами [10].

В работах [11, 12] такая модель использована для определения размеров неровностей и функции их распределения по высоте шероховатого слоя. При этом их распределение должно соответствовать уравнению опорной кривой. Полученная новая модель шероховатости названа фрактально-дискретной, так как ее дальнейшее применение ничем не отличается от дискретной модели.

В дальнейшем рассмотрим разновидности дискретной модели шероховатости, более универсальной в плане определения характеристик контакта, и ее использование в качестве плоской перколяционной модели при определении вероятности протекания среды и герметизирующей способности уплотнительного стыка.

Для описания всей шероховатой поверхности необходимо знать одну из двух функций:

$$\eta_u(\varepsilon)=\frac{A_u}{A_c} \quad \text{или} \quad \varphi_n(u)=\frac{n_u}{n_c},$$

где A_u – площадь сечения материала на относительном уровне $\varepsilon = h/R_{\max}$; A_c – контурная площадь; n_u – число неровностей, вершины которых расположены выше уровня u; n_c – общее число неровностей.

Так как согласно стандарту ISO 4287–1997 параметры шероховатости определяются из профилограмм, а функции, описывающие распределение для профиля t_p и поверхности $\eta_u(\varepsilon)$, совпадают, что не выполняется для функций распределения вершин и впадин неровности профиля $\varphi_{nl}(u_l)$ и поверхности $\varphi_n(u)$, то в основу модели положена опорная кривая профиля.

В своих работах Н. Б. Демкин и И. В. Крагельский, при описании начальной части опорной кривой профиля параболой, для нахождения функции φ_n задавали ее вид $\varphi_n = C_n u^{\chi}$. Такой подход, как будет показано ниже, не совсем корректен.

Допустим, что функция $\eta_u(\varepsilon)$ монотонная и дважды дифференцируемая. Шероховатая поверхность представляет собой набор неровностей сферической формы радиусом r (рис. 1). Необходимо найти такую функцию $\varphi_n(u)$, чтобы распределение материала в шероховатом слое соответствовало кривой опорной поверхности.

Сечение *i*-й неровности на уровне ε

$$A_{ri} = 2\pi r R_{\max}(\varepsilon - u),$$

где u – относительное расстояние от уровня вершин до вершины; *i*- ой неровности.

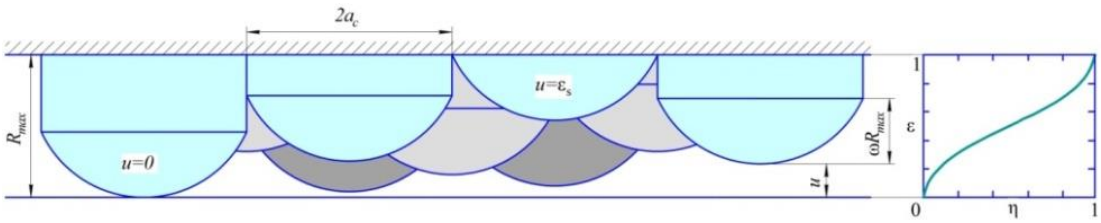


Рис. 1. Схема и опорная кривая шероховатой поверхности

Число вершин, находящихся в слое du и на расстоянии u, равно

$$dn_r = n_c \varphi_n'(u)\,du .$$

Тогда

$$A_u = A_r = 2\pi r R_{\max} n_c \int_0^{\varepsilon} \varphi_n'(u)(\varepsilon - u)\,du ;$$

$$\eta_u(\varepsilon) = \frac{A_r(\varepsilon)}{A_c} = C\int_0^{\varepsilon}(\varepsilon - u)\varphi_n'(u)\,du ,$$

где

$$C = \frac{2\pi r R_{\max} n_c}{A_c} .$$

Далее имеем

$$\eta(\varepsilon) = C\left(\varepsilon\int_0^{\varepsilon}\varphi_n'(u)\,du - \int_0^{\varepsilon} u\varphi_n'(u)\,du\right),$$

$$\eta(\varepsilon) = C\left(\varepsilon\varphi_n(\varepsilon) - u\varphi_n(u)\Big|_0^{\varepsilon} + \int_0^{\varepsilon}\varphi_n(u)du\right),$$

$$\eta(\varepsilon) = C\int_0^{\varepsilon}\varphi_n(u)du .$$

Дважды дифференцируя левую и правую часть поε, получим

$$\eta'(\varepsilon) = C\varphi_n(\varepsilon), \qquad \eta''(\varepsilon) = C\varphi_n'(\varepsilon);$$

$$\varphi_n(\varepsilon) = \frac{\eta'(\varepsilon)}{C}, \qquad \varphi_n'(\varepsilon) = \frac{\eta''(\varepsilon)}{C}.$$

Если опорную кривую профиля описывают уравнением (1) то

$$\eta'(u) = b\nu u^{\nu-1}, \qquad \varphi_n(u) = \frac{A_c b\nu u^{\nu-1}}{2\pi r R_{\max} n_c}.$$

Пусть ε_s – относительное сближение, при котором $\varphi_n(\varepsilon_s) = 1$, т. е. $n_u = n_c$. Тогда

$$n_c = \frac{A_c b\nu\varepsilon_s^{\nu-1}}{2\pi r R_{\max}}; \qquad C = b\nu\varepsilon_s^{\nu-1};$$

$$\varphi_n(u) = \left(\frac{u}{\varepsilon_s}\right)^{\nu-1}; \qquad \varphi_n'(u) = \frac{(\nu-1)\,u^{\nu-2}}{\varepsilon_s^{\nu-1}}. \qquad (4)$$

Таким образом, функция распределения неровностей является степенной только в том случае, если опорную кривую профиля описывают выражением (1). Для других случаев, как будет показано ниже, функция распределения неровностей принимает другой вид.

Описание усовершенствованных моделей шероховатых поверхностейприведено в работах [8]. Шероховатая поверхность в них представлена как совокупность структурно неорганизованных поверхностей отдельных неровностей самоподобной формы и случайных размеров, распределение вершин и впадин которых описывают функцией $\varphi_n(u,v)$. Расположение отдельной неровности в шероховатом слое определяется относительными

уровнями u и v (рис. 2), а распределение материала (индекс u) и свободного пространства (индекс v) описывают функциями:

$$\eta_{ui}(\varepsilon_i)=\frac{A_{ui}(h_{ui})}{A_i};$$

$$\eta_{vi}(\xi_i)=\frac{A_{vi}(h_{vi})}{A_i}=1-\eta_{ui}(1-\xi_i),$$

где

$$\varepsilon_i=\frac{h_{ui}}{H_i};\qquad \xi_i=\frac{h_{vi}}{H_i};$$

$$A_i=A_{ci}=A_{ui}+A_{vi}=\psi_c(\omega)A_{c\max};$$

$$\psi_c(\omega)\in[0,1];\ \omega=1-u-v;$$

A_{ci}– площадь, приходящаяся на одну неровность; $A_{c\max}$ – максимальная площадь, приходящаяся на одну неровность; ω – относительная высота i-й неровности.

Рис. 2. Схема шероховатой поверхности

Для описания всей шероховатой поверхности при известных функциях необходимо знать одну из двух функций:

$$\eta_u(\varepsilon)=\frac{A_u}{A_c}=1-\eta_v(\xi)\ \text{ или }\ \varphi_n(u,v)=\frac{n(u,v)}{n_c},$$

где $n_v(\xi)=A_v/A_c;\ \xi+\varepsilon=1;\ A_u$, A_v – площадь сечения материала и свободного полупространства на относительных уровнях ε и ξ; $n(u,v)$ – число неровностей, вершины которых расположены выше уровня u, а впадины – ниже уровня v; n_c – общее число неровностей. Тогда задача сводится к определению $\varphi_n(u,v)$.

Допустим, что функция $\eta_u(\varepsilon)$ монотонная и дважды дифференцируемая для $\varepsilon\in[0,1]$. Для описания опорной кривой поверхности используем распределение регуляризованной неполной бета-функции [6]:

$$\eta_u(\varepsilon)=I_\varepsilon(p,q)=\frac{\mathrm{B}_\varepsilon(p,q)}{\mathrm{B}(p,q)},\qquad \eta_v(\xi)=\frac{\mathrm{B}_\xi(p,q)}{\mathrm{B}(p,q)}.$$

Считая, что функции $\eta_{ui}(\varepsilon_i)$, $\psi_c(\omega)$, $\varphi_n(u,v)$ монотонны и непрерывны, получим следующие выражения:

$$\eta_u(\varepsilon)=\frac{1}{C_a}\int_0^{\min(\varepsilon,\varepsilon_s)}du\left[\int_0^{\min(\xi,\xi_s)}\eta_{ui}\left(\frac{\varepsilon-u}{\omega}\right)\psi_c(\omega)\varphi_n''(u,v)dv+\int_{\min(\xi,\xi_s)}^{\min(\xi_s,1-u)}\psi_c(\omega)\varphi_n''(u,v)dv\right];\tag{5}$$

$$\eta_v(\xi)=\frac{1}{C_a}\int_0^{\min(\xi,\xi_s)}dv\left[\int_0^{\min(\xi,\xi_s)}\eta_{vi}\left(\frac{\varepsilon-v}{\omega}\right)\psi_c(\omega)\varphi_n''(u,v)du+\int_{\min(\xi,\xi_s)}^{\min(\xi_s,1-v)}\psi_c(\omega)\varphi_n''(u,v)du\right];\tag{6}$$

где

$$C_a=\frac{A_{cm}}{A_{c\max}}=\int_0^{\varepsilon_s}du\int_0^{\min(\xi_s,1-u)}\psi_c(\omega)\varphi_n''(u,v)dv=\int_0^{\xi_s}dv\int_0^{\min(\varepsilon_s,1-u)}\psi_c(\omega)\varphi_n''(u,v)du;$$

ε_s, ξ_s – уровни насыщения вершин и впадин.

Решение уравнений (5), (6) относительно $\varphi_n(u,v)$ без наличия каких-либо гипотез, касающихся вида функции $\varphi_n(u,v)$ и соотношения параметров ε_s и ξ_s, даже при известных функциях $\eta_{ui}(\varepsilon_i)$ и $\eta_{vi}(\xi_i)$ представляет собой некорректную задачу. Поэтому сделаны следующие допущения:

1. Функцию $\varphi''_n(u,v)$ можно представить в виде

$$\varphi''_n(u,v) = f_u(u)\, f_v(v)\, f_\omega(\omega), \tag{7}$$

где функция $f_\omega(\omega) = \omega^{\alpha_1-1}(1-\omega)^{\beta_1-1}$ определяет спектр неровностей и служит мерой взаимозависимости функций распределения вершин и впадин.

2. $\varepsilon_s + \xi_s = 1$.

3. Вершины и впадины имеют одинаковую форму и их описывают параболоидом второго порядка. Тогда

$$\eta_{ui}(\varepsilon_i) = \varepsilon_i; \qquad \eta_{vi}(\xi_i) = \xi_i.$$

4. $\psi_c(\omega) = \omega^\gamma; \quad \gamma \in [0,1]$.

С учетом допущений из уравнений (5) и (6) получим систему парных уравнений Фрейгольма первого рода

$$\eta''_u(\varepsilon) = \frac{d^2\eta_u(\varepsilon)}{d\varepsilon^2} = \frac{1}{C_a} f_u(\varepsilon) \int_0^{\xi_s} (1-\varepsilon-v)^{\alpha_1+\gamma-1} (\varepsilon+v)^{\beta_1-1} f_v(v)\, dv; \tag{8}$$

$$\eta''_u(\xi) = \frac{d^2\eta_u(\xi)}{d\xi^2} = \frac{1}{C_a} f_v(\xi) \int_0^{\varepsilon_s} (1-\xi-u)^{\alpha_1+\gamma-1} (\xi+v)^{\beta_1-1} f_u(u)\, du, \tag{9}$$

которая, по крайней мере, при $\alpha_1 + \gamma - 1 = n$, $\beta_1 = m$, где n, m – целые числа, имеет аналитические решения.

Рассмотрим два случая.

Случай 1. Функции распределения вершин и впадин взаимонезависимы ($\alpha_1 = 1$, $\beta_1 = 1$); площадь, приходящаяся на отдельную неровность, пропорциональна ее высоте ($\gamma=1$), при этом радиус кривизны неровностей $r(\omega)$ = const. Тогда из выражения (7) с учетом решения системы уравнений (8) и (9) получим

$$\varphi''_n(u,v) = \frac{\eta''_u(u)}{\eta'_u(\varepsilon_s)} \frac{\eta''_v(v)}{\eta'_v(\xi_s)}, \quad \varphi_n(u,v) = \frac{\eta'_u(u)}{\eta'_u(\varepsilon_s)} \frac{\eta'_v(v)}{\eta'_v(\xi_s)}, \quad C_a = \frac{1}{\eta'_u(\varepsilon_s)}. \tag{10}$$

Случай 2. Функции распределения вершин и впадин взаимозависисмы ($\alpha_1 = 2$, $\beta_1 = 1$); площадь, приходящаяся на отдельную неровность, является постоянной ($\gamma = 0$), при этом $r(\omega) \sim \omega^{-1}$. Тогда

$$\varphi''_n(u,v) = \frac{\eta''_u(u)}{\eta'_u(\varepsilon_s)} \eta''_v(v) \cdot (1-u-v),$$

$$\varphi_n(u,v) = \frac{\eta'_u(u)}{\eta'_u(\varepsilon_s)} \eta'_v(v) \left[1-v-u+\frac{\eta_u(u)}{\eta'_u(u)} + \frac{\eta_v(v)}{\eta'_v(v)} \right], \quad C_a = 1. \tag{11}$$

С учетом (2) для $\varphi''_n(u,v)$ и C_a получим:

для случая 1

$$\varphi''_n(u,v) = \frac{\mathrm{B}''_u(p,q)}{\mathrm{B}'_{\varepsilon_s}(p,q)} \cdot \frac{\mathrm{B}''_v(q,p)}{\mathrm{B}'_{\xi_s}(q,p)}, C_a = \frac{\mathrm{B}(p,q)}{\mathrm{B}'_{\varepsilon_s}(p,q)};$$

для случая 2

$$\varphi''_n(u,v) = \frac{\mathrm{B}''_u(p,q)}{\mathrm{B}'_{\varepsilon_s}(p,q)} \cdot \frac{\mathrm{B}''_v(q,p)}{\mathrm{B}(q,p)} \cdot (1-u-v),$$

где

$$\varepsilon_s = \frac{p-1}{p+q-2}, \qquad \xi_s = \frac{q-1}{p+q-2}.$$

Для случая 1 из выражения (10) с учетом (2) получим

$$\begin{aligned} \varphi_{n1}(u) &= \varphi_n(u,\xi_s) = \frac{\eta'_u(u)}{\eta'_u(\varepsilon_s)} = \frac{u^{p-1}(1-u)^{q-1}}{\varepsilon_s^{p-1}(1-\varepsilon_s)^{q-1}}; \\ \varphi'_{n1}(u) &= \frac{u^{p-2}(1-u)^{q-2}\left[(p-1)(1-u)-(q-1)u\right]}{\varepsilon_s^{p-1}(1-\varepsilon_s)^{q-1}}. \end{aligned} \tag{12}$$

Аналогично для случая 2 из выражения (10) имеем

$$\begin{aligned} &\varphi_{n2}(u) = \varphi_n(u,\xi_s) = \\ &= \frac{1}{\mathrm{B}(p,q)}\left[(\varepsilon_s - u)\mathrm{B}'_u(p,q) + \mathrm{B}_u(p,q) + \frac{\mathrm{B}'_u(p,q)\mathrm{B}_{\xi_s}(q,p)}{\mathrm{B}'_{\varepsilon_s}(p,q)}\right], \\ &\varphi'_{n2}(u) = \frac{1}{\mathrm{B}(p,q)}\left\{u^{p-2}(1-u)^{q-2}\left[(p-1)(1-u)-(q-1)u\right]\right\}\times \\ &\times\left(\varepsilon_s - u + \frac{\mathrm{B}_{\xi_s}(q,p)}{\varepsilon_s^{p-1}(1-\varepsilon_s)^{q-1}}\right). \end{aligned} \tag{13}$$

Полученные модели можно упростить, если предположить, что высота отдельной неровности ωR_{max}, площадь, приходящаяся на отдельную неровность A_c и радиус неровности $R = a_c^2/(2\omega R_{\max})$ являются постоянными величинами, причем $A_c = \pi a_c^2$.

Допустим, что опорную кривую профиля можно описать выражением (2). Тогда аналогично вышеприведенной методике при использовании выражения (1) имеем

$$\eta'(u) = \frac{1}{\mathrm{B}(p,q)}u^{p-1}(1-u)^{q-1};$$

$$\eta''(u) = \frac{1}{\mathrm{B}(\alpha,\beta)}\left[u^{p-2}(1-u)^{q-2}\left((p-1)(1-u)-(q-1)u\right)\right];$$

$$\varphi_n(u) = \frac{A_c u^{p-1}(1-u)^{q-1}}{2\pi r R_{\max} n_c \mathrm{B}(p,q)}.$$

Учитывая, что $\varphi_n(\varepsilon_s) = 1$, получим

$$n_c = \frac{A_c \varepsilon_s^{p-1}(1-\varepsilon_s)^{q-1}}{2\pi r R_{\max}\mathrm{B}(p,q)};$$

$$\varphi_n(u) = \frac{\eta'_u(u)}{C} = \frac{u^{p-1}(1-u)^{q-1}}{\varepsilon_s{}^{p-1}(1-\varepsilon_s)^{q-1}};$$

$$\varphi'_n(u) = \frac{\eta''_u(u)}{C} = \frac{u^{p-2}(1-u)^{q-2}\left[p(\alpha-1)(1-u)-(q-1)u\right]}{\varepsilon_s^{p-1}(1-\varepsilon_s)^{q-1}}, \tag{14}$$

при этом $\omega = 1-\varepsilon_s$.

Таким образом, в данном случае получены выражения, тождественные выражениям (12).

Для фрактальной модели шероховатости относительная высота отдельной неровности ωнаходися в пределах 0.15…0.25.Если принять, что высота отдельной неровности $\omega R_{\max}$ является постоянной величиной, то распределение выступов неровностей для такой фрактально-дискретной модели шероховатостиопределяется выражениями [10]:

$$\varphi_{n3}(u) = \omega\sum_{k=0}^{n}\eta'(u-k\omega), \tag{15}$$

$$\varphi'_{n3}(u)=\frac{\omega}{\mathrm{B}(p,q)}\sum_{k=0}^{n}(p-1)(u-k\omega)^{p-2}(q-1)(1-u+k\omega)^{q-1}-$$

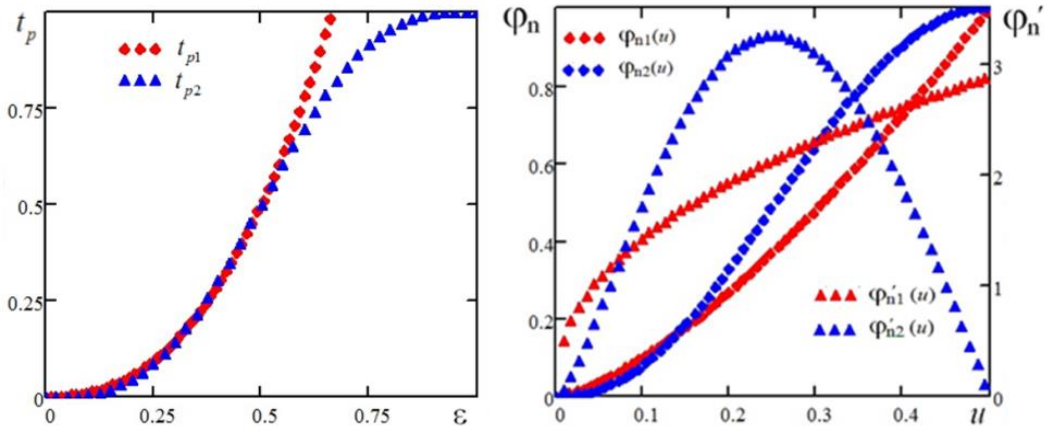
$$-(q-1)(u-k\omega)^{p-1}(p-1)(1-u+k\omega)^{q-2}, \qquad (16)$$

где

$$n=\mathrm{int}\left(\frac{u}{\omega}\right), \qquad \omega=\left[\mathrm{B}(p,q)\Big/\sum_{k=1}^{m}(1-k\omega)^{p-1}k^{q-1}\right]^{1/q}, \qquad (17)$$

Решение уравнения (17) дает несколько значений ω, из них выбирают то, при котором распределение вершин неровностей максимально соответствует реальной поверхности.

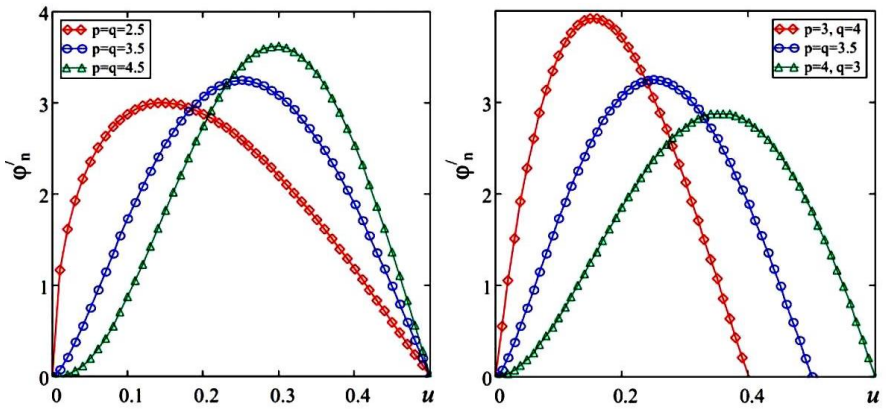
На рис.3*а* показаны опорные кривые, описываемые выражениями (1) и (2). На рис. 3*б* представлены функции $\varphi_{n1}(u)$, $\varphi_{n2}(u)$ и плотности $\varphi'_{n1}(u)$, $\varphi'_{n2}(u)$ распределения неровностей по высоте шероховатого слоя, рассчитанные для эквивалентной шероховатой поверхности, определяющей контакт двух одинаковых изотропных шероховатых поверхностей со следующими параметрами: $R_{\max}=1$ мкм, $R_a=0{,}2$ мкм, $R_q=0{,}25$ мкм, $R_p=0{,}5$ мкм, $S=100$ мкм, $S_m=120$ мкм. При использовании регуляризованной неполной бета-функции: $p=3{,}5$; $q=3{,}5$. При описании опорной кривой параболой $\eta=b\varepsilon^{v}$: $b=2{,}7059$, $v=2{,}4361$.



а) *б*)

Рис. 3. Опорные кривые профиля поверхности (*а*), функции и плотности распределения неровностей (*б*)

Как следует из рис. 3*а*, плотность распределения неровностей, находящихся выше уровня $u=0{,}20\ldots0{,}25$; для кривой $\varphi'_{n2}(u)$ примерно в 1,5 раза больше, чем для кривой $\varphi'_{n1}(u)$, что значительно сказывается при определении характеристик контакта шероховатых поверхностей. Модель, соответствующая функции $\varphi'_{nd}(u)$, следует использовать для u < (0,1…0,15). Совпадение значений, определенных с помощью выражений (12) и (14), для функций $\varphi_n(u)$ и $\varphi'_n(u)$ свидетельствует о качественном описании шероховатости с помощью упрощенной модели. Причем при определении контактных характеристик будет использоваться одномерная функция распределения неровностей, что значительно упростит расчеты. Модель, соответствующая функции $\varphi'_{n2}(u)$, применима в случаях, когда важное значение имеет распределение радиусов кривизны неровностей.



а) *б*)

Рис. 4. Плотности распределения неровностей при разных значениях параметров p и q регуляризованной неполной бета-функции

На рис. 4 представлены плотности распределения неровностей при разных значениях параметров p и q регуляризованной неполной бета-функции. Приведенные зависимости свидетельствуют об универсальности регуляризованной неполной бета-функции и широких возможностях ее применения для описания шероховатости уплотнительных поверхностей.

Связь параметров модели шероховатой поверхности со стандартными параметрами шероховатости.

Поскольку шероховатость поверхности оценивается по характеристикам ее профилей, тогда как эксплуатационные свойства определяются топографией, то возникает задача о связи топографических характеристик поверхности с профильными, что позволит определить параметры модели.

Считаем, что все неровности поверхности одинаково ориентированы и равномерно размещены по площади. Для определения связи параметров модели со стандартными параметрами шероховатости необходимо использовать модель единичной неровности, которую можно математически описать.

Поверхность представленной на рис. 5 неровности описывается выражением

$$z(x,y)=\nu+\omega\left(f(x)+f(y)\right), \tag{18}$$

где

$$\begin{gathered} x=2X/S_{xi};\quad y=2Y/S_{yi};\quad z=Z/R_{\max};\\ S_{xi}=\sqrt{A_{ci}K_s};\quad S_{yi}=\sqrt{A_{ci}/K_s};\quad K_s=S_{xi}/S_{yi};\\ f(t)=\begin{cases}0{,}5-t, & |t|\le 0{,}5;\\ \left(1-|t|\right)^2, & 0{,}5\le|t|\le 1.\end{cases} \end{gathered} \tag{19}$$

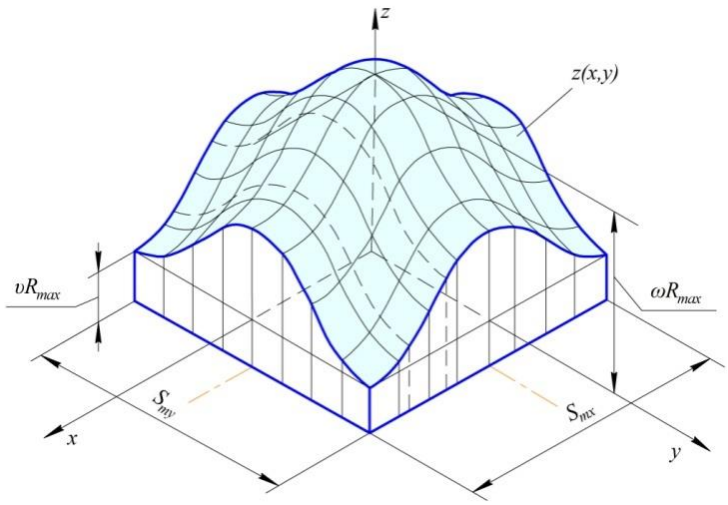


Рис. 5. Модель отдельной неровности

Связь параметров усовершенствованной модели шероховатой поверхности со стандартными параметрами шероховатости описана в работе [2].

Параметры эквивалентной шероховатой поверхности.

Контакт двух шероховатых поверхностей $z_i(x,y), i=1;2,$ можно представить как контакт эквивалентной шероховатой поверхности $z(x,y)=\sum_{i=1}^{2} z_i(x,y)$ и главной поверхности.

Исходными данными для определения параметров микрогеометрии эквивалентной поверхности являются следующие параметры микрогеометрии каждой из контактирующих поверхностей:

$$R_{\max}, R_{qi}, R_{pi}, S_i, S_{mi}, t_{pi}, \Delta_{ai}, \Delta_{qi}.$$

Рассматривая шероховатые поверхности как случайные стационарные поля, из теоремы о сумме средних значений и дисперсий независимых случайных процессов имеем

$$\begin{gathered} R_{\max}=\sum_{i=1}^{2} R_{\max i};\quad R_p=\sum_{i=1}^{2} R_{pi};\quad R_q^2=\sum_{i=1}^{2} R_{qi}^2; \\ \Delta_a=\sum_{i=1}^{2}\Delta_{ai};\quad \Delta_q^2=\sum_{i=1}^{2}\Delta_{qi}^2. \end{gathered} \tag{20}$$

Для определения эквивалентных значений S и S_m используем выражение эквивалентного числа нулей и максимумов [13]

$$\frac{1}{S}=\left[\sum_{i=1}^{2}\left(\frac{R_{qi}}{R_q S_i}\right)^2\right]^{0,5};\quad \frac{1}{S_m}=\left[\sum_{i=1}^{2}\left(\frac{R_{qi}}{R_q S_{mi}}\right)^2\right]^{0,5}. \tag{21}$$

Параметры эквивалентной опорной кривой при ее аппроксимации отношением неполной бета-функции определяются выражением (1) через параметры $R_p, R_q, R_{\max}$ эквивалентной поверхности.

Выводы:

1. Рассмотрены разные подходы для разработки дискретной модели шероховатости, при которых функции распределения вершин неровностей определены из выражений для опорных кривых профиля.

2. При описании опорной кривой бета-функцией плотности распределения вершин неровностей имеют характерный максимум, что не наблюдается при описании опорной кривой параболой, когда функция плотности распределения вершин неровностей является монотонно возрастающей. Наличие максимума является основной особенностью при моделировании шероховатых поверхностей для задач герметологии.

3.Влияние использование разных моделей шероховатости при определении относительной площади контакта предполагается исследовать в дальнейшем.

Литература:

1. Григорьев А.Я., Мышкин Н.К., Холодилов О.В. Методы анализа микрогеометрии поверхностей // Трение и износ. 1989. Т. 10, №1. С. 138–155.

2. Огар П.М., Горохов Д.Б., Турченко А.В. Механика контактирования шероховатых поверхностей. Братск: Изд-во БрГУ, 2016. 282 с.

3. Крагельский И.В., Добычин Н.М., Комбалов В.С. Основы расчета на трение и износ. М.: Машиностроение, 1974. 526 с

4. Кузнецов Е.А., Гороховский Г.А. Фрикционное взаимодействие шероховатых тел с позиции механики твердого тела // Трение и износ. 1980. Т. 1. № 4. С. 638-648.

5. Ложкин В.Д. Геометрические характеристики контакта соприкосающихся шлифованных деталей / Вероятностно-статистические основы процессов шлифования и полирования. Л.: СЗПИ, 1974. С. 112-122.

6. Демкин Н.Б. Выражение опорной кривой с помощью бэта-функции / Контактное взаимодействие твердых тел. Калинин: КГУ, 1982. С. 3–9.

7. Огар П.М., Горохов Д.Б. Соотношение между параметрами опорных кривых профиля при

описании их параболой и отношением бета-функции // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2013. Т. 1. С. 161-164.

8. Долотов А.М., Огар П.М, Чегодаев Д.Е. Основы теории и проектирование уплотнений пневмогидроарматуры летательных аппаратов. М.: Изд-во МАИ, 2000. 296 с.

9. Огар П.М., Шеремета Р.Н., Лханаг Д. Герметичность металлополимерных стыков шероховатых поверхностей. Братск: Изд-во БрГУ, 2006. 159 с.

10. Огар П.М., Горохов Д.Б. Контактирование шероховатых поверхностей: фрактальный подход. Братск: Изд-во БрГУ. 2007. 171 с

11. Огар П.М., Горохов Д.Б. Контактное взаимодействие фрактальных шероховатых поверхностей деталей машин // Механики XXI веку. 2007. № 6. С. 309-313.

12. Огар П.М., Горохов Д.Б. Контактное взаимодействие шероховатых поверхностей: фрактальный подход // Системы. Методы. Технологии. 2010. № 6. С. 30-38.

13. Айнбиндер С.В., Тюнина Э.Л. Введение в теорию трения полимеров. Рига.: Зинатне, 1978. 224с.

Features of rough surface modeling for hermetic problems

Ogar P.M.[1,a], Sampetova M.V.[1,b], Sangzoda A.A.[1,c], Ugryumova E.V.[1,d], Margaryan D.E[1,e]
[1]Bratsk State University, Makarenko, 40, Bratsk, Russia
[a] ogar@brstu.ru, [b] sampetovamv @mail.ru, [c] adamjonsaidov4@gmail.ru, [d] hellensh@yandex.ru, [e] jerocko72@gmail.ru

Keywords: rough surface, support surface curve, parabola, beta function, height distribution of irregularities, contact characteristics.

The main problem is the need for a high-precision description of the microgeometry of sealing surfaces to ensure the tightness of joints. This paper considers a discrete model of a rough surface using support surface curves. An improved discrete model of roughness has been developed, which allows for the calculation of the distribution functions of the peaks and valleys of irregularities based on the parameters of the support curve.

УДК 620.17

Повышение точности определения нормального модуля упругости при кинетическом индентировании

Обухов З.Д. [1,a]
[1]Братский государственный университет, уд. Макаренко, 40, Братск,
[a]Obuxov.99@mail.ru

Ключевые слова: основное уравнение вдавливания, сферический индентор, упругопластическое полупространство, кривая нагружения, кривая разгрузки.

В статье рассмотрены вопросы инструментального вдавливания сферы. Указывается на определенную неудовлетворенность результатами разных исследований при определении модуля упругости или радиуса площадки контакта из-за необходимости введения различных корректирующих и поправочных коэффициентов и параметров. Показано, что распределение контактного давления определяется экспонентой кривой нагружения. Получено достаточно точное уравнение для определения модуля упругости, учитывающее распределение контактного давления, и новое уравнение для жесткости в начальной части кривой разгрузки, которое является модифицированным уравнением

Булычева – Алехина – Шоршорова (equiation BASh). Показан пример использования основного уравнение индентирования для решения задач механики контактного взаимодействия. Указано, что процесс восстановления отпечатка упругий и должен описываться уравнениями теории упругости.

Введение.

Испытания на вдавливание сферы являются одним из самых ранних методов определения механических свойств материалов. Исторически испытания материалов более века назад использовались для определения их твердости [1]. Твердость является важным свойством для оценки деформационного поведения материалов, сопротивления их упругопластическому деформированию и служит надежным средством контроля качества для многих технологических процессов, особенно при термической обработке металлов, старении материала конструкций при наработке технологического оборудования на ресурс. Главными преимуществами метода являются неразрушающее действие, простота выполнения и возможность оценки локальных механических свойств материалов конструкции. Изначально тест на вдавливание сферы использовался для определения твердости материала [2] по Мартенсу (1898)

$$HM = \frac{P}{2\pi Rt}, \tag{1}$$

по Бринеллю [3] *HBW* (1900)

$$HBW = \frac{2P}{\pi D^2\left(1-\sqrt{1-(d/D)^2}\right)}, \tag{2}$$

по Майеру [4] (1908)

$$H_M = \frac{4P}{\pi d^2}, \tag{3}$$

В уравнениях (1) – (3): $D = 2R$ – диаметр индентора; t – глубина внедрения индентора; d – диаметр хорды оставшегося отпечатка.

Для описания зависимости между нагрузкой P и диаметром d E. Mayer [4] предложил следующее выражение

$$P = Ad^m, \tag{4}$$

где A – константа, m – индекс Майера, который определяется как тангенс угла наклона зависимости $P(d)$ в логарифмических координатах, или через две точки этой зависимости

$$m = \frac{\ln(P_2/P_1)}{\ln(d_2/d_1)}. \tag{5}$$

Из уравнений (3) и (4) имеем

$$H_M = A^*\left(\frac{d}{D}\right)^{m-2}, \tag{6}$$

Очевидно, на появление этих работ оказало влияние понятие абсолютной твердости Г. Герца, решившего в 1881 г. задачу об упругом контакте шара и плоскости. С середины прошлого века с появлением вдавливания с измерением глубины начали появляться исследования по определению модуля упругости и других механических свойств [5-10], которые привели к появлению метода кинетического (инструментального) индентирования. Методика определения модуля упругости основана на уравнении Булычева – Алехина – Шоршорова (в зарубежной литературе – equation BASh) для жесткости начальной части кривой разгрузки, которое имеет вид

$$S = \left.\frac{dP_e}{dh_e}\right|_{h_e=h_m} = \frac{2\sqrt{A}}{\sqrt{\pi}} \cdot E^*, \tag{7}$$

где A – проекция площади контакта индентора с материалом, E^* – приведенный модуль упругости;

$$E^* = \left(\frac{1-\nu^2}{E} + \frac{1-\nu_i^2}{E_i} \right)^{-1}, \quad (8)$$

ν, ν_i и E, E_i – коэффициенты Пуассона и модули упругости материала и индентора.

Подробный анализ упругого вдавливания осесимметричных инденторов изложен авторами [11]. Из выражения (7) для жесткости начальной части кривой разгрузки получено

$$S = 2E^* a_s, \quad (9)$$

где a_s – радиус площадки контакта.

Однако ввиду определенной неудовлетворенности при определении модуля упругости и радиуса площадки контакта в уравнение (9) вводятся различные корректирующие и поправочные коэффициенты и параметры [12-18], например в работе [12]

$$S = f_c 2E^* \alpha \quad (10)$$

где f_c – корректирующий фактор.

Целью настоящих исследований является повышение точности определения модуля упругости путем уточнения выражения для начальной жесткости разгрузки, описания новых закономерностей между параметрами индентирования и геометрическими характеристиками восстановленной и невосстановленной лунки.

При определении диаграммы “напряжения – деформации” согласно нормативному документу [19] методом индентирования сферы производится одновременное измерение нагрузок вдавливания P и разгрузки P_e и глубин проникновения h сферы в образец и разгружения h_e, которые представляют собой диаграмму инструментального вдавливания и являются исходными данными для решения поставленной задачи. При этом надо четко представлять, для чего проводится индентирование и в какой части полной диаграммы вдавливания его проводить [20, 21], будет ли при этом изменение модуля упругости материала [21, 22].

Параметры диаграммы инструментального вдавливания. **Основное уравнение индентирования.**

Построению диаграммы инструментального вдавливания предшествует предварительная обработка (очищение) измеренных результатов испытаний с целью исключения влияния деформации индентора и других элементов установки, а также влияния тангенциальных сил. Важное условие состоит в необходимости точного учета упругой податливости испытательного оборудованя [23, 24]. Небольшая погрешность в расчете упругой податливости может привести к значительной погрешности определения глубины индентирования, параметра деформационного упрочнения и особенно – модуля нормальной упругости [24]. На взгляд авторов настоящей статьи для уменьшения зависимости от упругой податливости испытательного оборудованя необходимо изменить схему измерения величины вдавливания индентора, как это используется в работах [25, с. 49; 27]. При этом необходимо из измерений вычесть упругую деформацию полусферы.

На рис. 1 представлена типовая “очищенная” диаграмма инструментального вдавливания, состоящая из ветвей нагружения и разгрузки индентора. Имеются пять параметров, которые используются в дальнейших расчетах. Из ветви нагружения это максимальная нагрузка P_m, максимальное внедрение h_m, экспонента α зависимости $P(h_i)$. Из ветви разгрузки – контактная жесткость на начальном участке ветви разгружения $S = dP_e/dh_e$ и остаточная глубина h_r после разгрузки индентора. Кривую нагружения обычно описывают уравнением

$$P = C_l h^{\alpha}, \quad (11)$$

а кривую разгрузки согласно [12]

$$P_e = P_m\left(\frac{h_e - h_r}{h_m - h_r}\right)^{\gamma}, \tag{12}$$

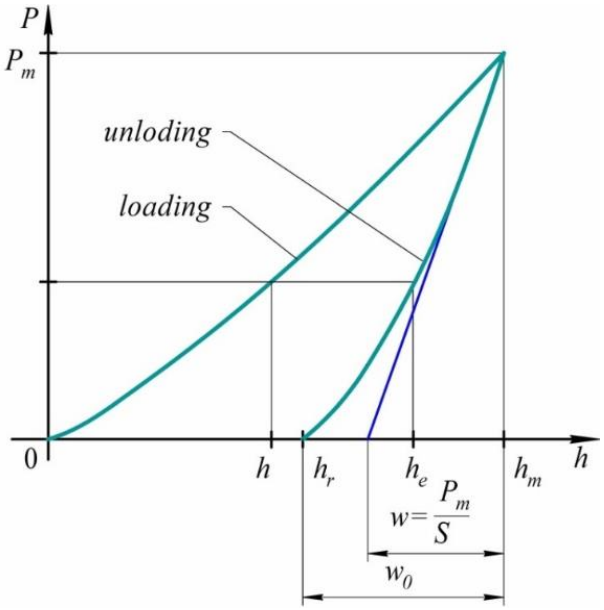


Рис.1. Типовая диаграмма инструментального вдавливания

где C_l – константа; α, γ – показатели степени.

Из уравнения (7) для контактной жесткости на начальном участке кривой разгрузки

$$S = \left.\frac{dP_e}{dh_e}\right|_{h_e=h_m} = \frac{P_m \cdot \gamma}{h_m - h_r}\ . \tag{13}$$

Учитывая, что $w_0 = h_m - h_r$, из геометрических соображений (рис.1) следует:

$$w = \frac{P_m}{S} = \frac{w_0}{\gamma}, \qquad \gamma = \frac{w_0}{w}\ . \tag{14}$$

В работе [27] при разгрузке индентора параметр γ определен расчетным путем:

$$\gamma = \frac{3 - 2\bar{h}_c}{2 - \bar{h}_c}, \tag{15}$$

где $\bar{h}_c = h_c/R$, R – радиус сферы; h_c – глубина, на которой происходит контакт индентора с образцом под нагрузкой P_m.

Так как из геометрических соотношений следует:

$$h_c = R - \sqrt{R^2 - a^2}\ , \text{или } \bar{h}_c = 1 - \sqrt{1 - \bar{a}^2}\ . \tag{16}$$

то из уравнение (16) в (15) получим

$$\gamma = \frac{1 + 2\sqrt{1 - \bar{a}^2}}{1 + \sqrt{1 - \bar{a}^2}}\ . \tag{17}$$

здесь $\bar{a} = a/R$, a – радиус площадки контакта при нагрузке.

Уравнение для распределение контактного давления при упругопластическом внедрении сферы впервые получено в работе [27]. Авторами показано, что если ветвь нагружения диаграмма вдавливания сферы описывается уравнением (11), тогда распределение давления в месте контакта описывается выражением

$$p(r) = p_0\left(1 - r^2/a^2\right)^{\beta}, \tag{18}$$

где $\beta = \alpha - 1$, $p_0 = p_m(\beta + 1)$, $p_m = P/\left(\pi a^2\right)$ – среднее давление в контакте.

Напряженно-деформированное состояние от действия на упругое полупространство нагрузки вида (18) рассмотрено в работе [20]. Перемещения в центре площадки контакта описываются уравнением

$$u_z(r)=\frac{p_m}{E^*}a2^{2\beta+1}(1+\beta)\mathrm{B}(\beta+1,\beta+1)\cdot \tag{19}$$

Учитывая принятые обозначения и то, что $K_\beta(\beta)=2^{2\beta+1}(1+\beta)\mathrm{B}(\beta+1,\beta+1)$, где $\mathrm{B}(\alpha_1,\alpha_2)$ – бета- функция, получим

$$P=\frac{\pi}{K_\beta}\cdot E^*(h-h_r)\sqrt{R(h+h_r)}\,. \tag{20}$$

Из уравнения (20) можно получить более точное уравнение, чем полученное в [25, с. 23] для «герцевского» распределения давления, т.е. для $\beta=0.5$. Уравнение (21) следует применять для определения модуля упругости материала при отсутствии наплыва при индентировании

$$E=\frac{1-\nu^2}{\frac{\pi(h-h_r)\sqrt{R(h+h_r)}}{K_\beta P}-\frac{1-\nu_i^2}{E_i}}\,. \tag{21}$$

Разгрузка сферы рассмотрена в работе [30], где указано, что контактная глубина при разгрузке описывается выражением

$$h_{ce}=h_c\frac{h_e-h_r}{h_m-h_r},\quad h_r\le h_e\le h_m, \tag{22}$$

где h_c – контактная глубина при упругопластическом нагружении.

Для радиуса площадки контакта при разгрузке

$$a_{ce}=\left(2Rh_{ce}-h_{ce}^2\right)^{0.5}. \tag{23}$$

Из выражения (19) с учетом (22), (23) и принятых обозначений следует:

$$P_e=\frac{\pi E^*}{K_\beta}\left(2Rh_{ce}-h_{ce}^2\right)^{0.5}(h_e-h_r), \tag{24}$$

а начальная жесткость разгрузки

$$S=\left.\frac{dP_e}{dh_e}\right|_{h_e=h_m}=\frac{\pi E^*}{K_\beta}\cdot\frac{3Rh_c-2h_c^2}{\left(2Rh_c-h_c^2\right)^{0.5}}. \tag{25}$$

После преобразования с учетом уравнения (16) получим

$$S=\frac{\pi E^*}{K_\beta}\cdot\frac{3-2\bar{h}_c}{2-\bar{h}_c}\cdot\left(2Rh_c-h_c^2\right)^{0.5}=\frac{\pi\gamma}{K_\beta}E^*a\,. \tag{26}$$

Из равенства уравнений (13) и (26) получим

$$a=\frac{K_\beta}{\pi}\cdot\frac{P_m}{(h_m-h_r)E^*}\,. \tag{27}$$

Как следует из анализа уравнения (27), в него входят параметры инструментального вдавливания, перечисленные в начале раздела. Поэтому предлагается его назвать *основным уравнением индентирования*.

В относительных величинах имеем

$$\bar{a}=\frac{K_\beta}{\pi}\cdot\frac{\bar{P}_m}{(\bar{h}_m-\bar{h}_r)}\,, \tag{28}$$

где – $\bar{P}_m=\dfrac{P}{E^*R^2}$.

Описание контактного взаимодействия сферы с упругопластическим полупространством.

Представленное выше *основным уравнением индентирования* (28) является модифицированным уравнением Булычева – Алехина – Шоршорова (equation BASh). Ининдентирование материалов с целью определения их механических свойств (*прямая задача*) впервые было предложено С.И. Булычевым с соавторами [8, 9]. В дальнейшем метод был адаптирован для определения характеристик на микро- и наноуровне [12]. Если известны механические свойства материалов, то математическое описание

инструментального индентирования можно использовать для арасчетов контактного взаимодействия сферы с упругопластическим пространством (*обратная задача*) [31].

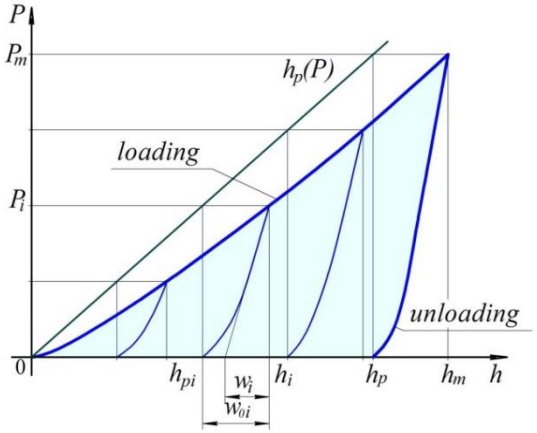


Рис. 2. Ступенчатая диаграмма индентирования и зависимость Мартенса

На рис. 2 представлены ступенчатая диаграмма индентирования и линейная зависимость Мартенса $h_{pi}(P_i)$. При приложении к индентору нагрузки P_i фиксировались значения h_i и h_{pi} и затем точка Мартенса в пересечении h_{pi} - P_i. Текущее значение глубины восстановленного отпечатка

$$h_{pi} = P_i / (qR) , \tag{29}$$

где $q = P_m / (h_m R)$ - коэффициент деформационного упрочнения [24, 31].

Рассмотрим простейшее применение *основного уравнения индентирования* вида (28) в механике контактного взаимодействия. Допустим, что приближенно $a = \sqrt{2Rh_c} = \sqrt{R(h+h_r)}$. Тогда из (28) имеем

$$(h+h_r)^{0.5}(h-h_r) = \frac{K_\beta P}{\pi R^{0.5} E^*} , \tag{30}$$

$$(\frac{h}{h_r}+1)^{0.5}(\frac{h}{h_r}-1) = \frac{K_\beta P}{\pi h_r^{1.5} R^{0.5} E^*} . \tag{31}$$

Обозначим $\frac{h}{h_r}+1 = y^2$, тогда $\frac{h}{h_r} = y^2 - 1$, $\frac{h}{h_r} - 1 = y^2 - 2$. Выражение (32) представим в виде

$$y^3 - 2y^2 - \frac{K_\beta P}{\pi h_r^{1.5} R^{0.5} E^*} = 0 . \tag{32}$$

Кубическое уравнение (32) удобно решать используя формулу Кардано. Если y_k – корень уравнения (32), то

$$h = h_r (y_k^2 - 1) , \tag{33}$$

$$h_r = h_p = P / (qR) . \tag{34}$$

В работе [32] для определения h_p использовалось понятие «пластическая твердость».

Выражения (32) - (34) рекомендуется использовать при уточнении (аппроксимации) зависимости (12).

Заключение.

1. Имеется определенная неудовлетворенность результатами исследований [12–18] при определении модуля упругости и радиуса площадки контакта, так как в уравнение (9) для улучшения полученных результатов вводятся различные корректирующие и поправочные коэффициенты и параметры.

2. Установлено, что, если ветвь нагружения диаграммы вдавливания сферы описывается уравнением (11), тогда распределение давления в месте контакта описывается

выражением (18). Это позволило ввести параметр $\beta = \alpha - 1$ в более точное уравнение для определения модуля упругости, чем полученное в [25, с. 23] для «герцевского» распределения давления, т.е. для $\beta = 0.5$.

3. В результате выявления новых закономерностей между параметрами индентирования получено новое выражение (26) для жесткости в начальной части кривой разгрузки. Использование выражений (26) и (13) позволило сформировать выражение (27), в правой части которого находятся параметры, снимаемые при инструментальном вдавливании. Поэтому предложено его представить как “основное уравнение индентирования”.

4. Показан пример использования основного уравнения индентирования для решения задач механики контактного взаимодействия. Этот подход рекомендуется использовать при уточнении (аппроксимации) зависимости (11).

5. Показано влияние вертикальных и горизонтальных перемещений при действии на пятно контакта нагрузки вида (18) и определение его радиуса через параметры основного уравнения индентирования.

Литература:

1. Tabor D. The hardness of metals. Oxford: University press. Great Britain. 1951.
2. Martens A. Handbuch der Materialienkunde für den Maschinenbau. 1898. Berlin. Springer
3. Brinell I.A. Ein Verfahrenzur Hartebestimmung nepst einingen anwendungen desselben // Baumaterialkunde. 1900. Bd. 5. S. 18-26.
4. Meyer E. Zeitschrift des Vereins Deutschen Ingenieure. 1908. 52. 645-654.
5. Galin L.A. Spatial contact problems of the theory of elasticity for punches of circular shape in planar projection // J. Appl. Math. Mech. (PMM), 1946. 10. P. 425-448.
6. Sneddon I.N. The reltion between load and penetration in the axisymmetric Boussinesq problem for a punch of arbitrary profile, International journal of engineering science 3 (1965), No.1, pp. 47-57
7. Lukin V. V., Savitsky F. S. Evaluation of Young’s modulus by indentation a spherical indenter. Research in the field of hardness measurement // Tr. Metrol. Inst. SSSR. 1967. N 91. P. 91 – 92
8. Bulychev S.I., Alekhin V.P., Shorshorov M.Kh., Ternovskii A.P., Shnyrev G.D. Determining Young's modulus from the indenter penetration diagram // Industrial Laboratory. 1975. 41. P. 1137.
9. Bulychev S.I., Alekhin V.P., Shorshorov M.K., Ternovskii A.P. Mechanical properties of materials studied from kinetic diagrams of load versus depth of impression during microimpression // Stren. Mater. 1976. V. 8. P. 1084.
10. Galanov B.A., Grigor'ev O.N., Mil'man Y.V., Ragozin I.P., Trefilov V.I. Determination of the hardness and Young's modulus with elastoplastic penetration of indentors into materials // Sov. Phys. Dokl. 1984. 29. P. 146-147.
11. Borodich F.M., Keer L.M. Contact problems and depth-sensing nanoindentation for frictionless and frictional boundary conditions // Int. J. Solids Struct. 2004. 41. P. 2479-2499.
12. Oliver W.C., Pharr G.M. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology // Journal of Materials research society. 2004. V. 19. No. 1. P. 3-20.
13. Lee H.,, U.S. Patent No. 6,778,916 (17 Aug. 2004)
14. Lee H., Lee J.H., Pharr G.M. A numerical approach to spherical indentation techniques for materical property evaluation // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 2005. Vol. 53. P. 2037-2069.
15. Lee J.H., Kim T., Lee H. A study on robust indentation techniques to evaluate elastic–plastic properties of metals. Int.J. Solids and Structures 47 (2010) 647–664.
16. Hay J.L., Wolff P.J. Small correction required when applying the Hertzian contact model to instrumented indentation data. J. Mater. Res., Vol. 16, No. 5, May 2001. 1280-1286.
17. Collin J.-M., Mauvoisin G., El Abdi R. An experimental method to determine the contact radius changes during a spherical instrumented indentation // Mechanics of Materials 40 (2008) 401–406
18. Collin J.-M. Correction factor for contact radius in spherical indentation measurements // Mechanics of Materials 50 (2012) 47–52.

19. ГОСТ Р 56232-2014. Определение диаграммы “напряжение - деформация методом инструментального индентирования шара. М.: Стандартинформ, 2015.

20. Matyunin V. M., Marchenkov A. Yu., Abusaif N., Volkov P. V., Zhgut D. A. Regularities and properties of instrumented indentation diagrams obtained by ball-shaped indenter / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2020. Vol. 86. N 5. P. 43-51.

21. Zou, B., Guan, K. S., & Wu, S. B. (2016). Determination of area reduction rate by continuous ball indentation test. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 139-140, 220–227.

22. Yu F.,Fang J. ,Omacht D., Sun M.,Li Y. A new instrumented spherical indentation test methodology to determine fracture toughness of high strength steels // Theoretical and Applied Fracture Mechanics.2023. V. 124. 103744

23. Matyunin V. M., Marchenkov A. Yu., Abusaif N., Stasenko N. A. Evaluation of hardness tester elastic compliance

for ball instrumented indentation // Inorganic Materials, 2020, Vol. 56, No. 15, pp. 1492–1498.

24. Матюнин В.М., Марченков А.Ю., Волков П.В., Каримбеков М.А., Жгут Д.А., Петрова М.П., Веремеева Н.О. Преобразование кинетических диаграмм вдавливания сферического индентора в диаграммы растяжения для металлических конструкционных материалов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2022. Т. 88. № 2. С. 54-63.

25. Матлин М. М., Мозгунова А.И., Казанкина Е.Н., Казанкин В.А. Методы неразрушающего контроля прочностных свойств деталей машин М.: Инновационное машиностроение, 2019. 247 с.

26. Автономов Н. Н., Тололо А. В. Влияние осевой деформации шара на величину измеряемой глубины вдавливания шара по перемещению верхней точки шара // Вестник СибГАУ. 2015. Т. 16, № 3. С. 638–644.

27. Ogar P.M., Tarasov V.A. Kinetic Indentation Application to Determine Contact Characteristics of Sphere and Elastoplastic Half-Space // Advanced Materials Research Vol. 664 (2013) pp. 625-631.

28. Ogar P.M., Shilin V.A., Fedorov V.S., Kar'yalajnen N.V. On the contact pressure distribution during the sphere indentation into an elastic-plastic half-space // Systems. Methods. Technoloies.2022. № (53). P. 7-11.

29. Ogar P., Gorokhov D., Mamaev L., Kushnarev V. Influence of the form of axisymmetric load on the stress-strain state of an elastoplastic half-space // MATEC Web of Conferences. 2019. 298. 00094

30. Ogar P., Gorokhov D.* Ugryumova E. Mechanics of unloading of a rough surfaces pre-loaded joint // MATEC Web of Conferences. 2017. 129. 06016.

31. Огар П.М., Горохов Д.Б. Контактные задачи в герметологии неподвижных соединений. Москва: Вологда: ИнфраИнженерия, 2023. 248 с.

32. Matyunin V. M., Marchenkov A. Yu., Abusaif N., Goryachkina M. V., Rodyakina R. V., Karimbekov M. A., Zhgut D. A. Evaluation of Young’s mod lus of construction materials by instrumented indenttion using a ball indenter / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2021. Vol. 87. N 8. P. 64 – 68.

33. Ogar P.M., Shilin V.A., Gorokhov D.B., Fedorov V.S. The effect

of vertical and radial displacements on the parameters of the restored surface after the sphere is indented // AIP Conference Proceedings, 2022. V. 2503, 060003.

Improving the accuracy of determining the normal modulus of elasticity during kinetic indentation

Z.D. Obukhov[1,a]

[1]Bratsk State University, 40 Makarenko st., Bratsk, 665709, Russian Federation

[a]Obuxov.99@mail.ru

Keywords: basic indentation equation, spherical indenter, elastoplastic half-space, loading curve, unloading curve.

The article discusses the issues of sphere tool indentation. It points out that there is a certain dissatisfaction with the results of various studies when determining the modulus of elasticity or the radius of the contact area due to the need to introduce various correction factors and parameters. It

is shown that the distribution of contact pressure is determined by the exponential loading curve. A sufficiently accurate equation for determining the modulus of elasticity has been obtained, taking into account the distribution of contact pressure, and a new equation for the stiffness in the initial part of the unloading curve, which is a modified equation of Bulychev – Alekhin – Shorshorov (equiation BASh). An example of using the basic equation of indentation for solving problems in contact mechanics is shown. It is indicated that the process of restoring the imprint is elastic and should be described by the equations of elasticity theory.

УДК 620.178

Комплексный анализ влияния структуры и вязкости смазочных композиций на износостойкость контактных поверхностей подшипников

Ващишин С.П.[1], Ксенофонтов К.А.[1]

[1]ФГБОУ ВО Брянский государственный технический университет, БГТУ
vashhi.anya@yandex.ru

Ключевые слова: трение, износ, смазочные масла, коэффициент трения, вязкость.

Смазочные материалы представляют собой сложные композиции углеводородной матрицы и многофункциональных присадок, формирующих на поверхности трения тонкие адсорбционно-реакционные слои. Их структура и состав определяют реологию, термостабильность, антифрикционные и противоизносные свойства, а также кинетику образования защитной трибоплёнки. В условиях высоких удельных нагрузок и температурных градиентов именно физико-химические процессы в масляной фазе и на границе «металл—смазка» определяют несущую способность и долговечность узлов. Настоящая работа фокусируется на комплексной химико-аналитической оценке смазок и масел различной природы с целью выявления связей «состав–структура–свойство».

Введение. Ужесточение эксплуатационных режимов и экологических требований стимулирует переход к синтетическим и наномодифицированным композициям с предсказуемыми свойствами. При этом недостаточность сопоставимых данных о взаимосвязи молекулярной архитектуры базовых масел, типологии присадок (ZnDTP, MoDTC, борсодержащие, ПАО) и параметров триботехнологической плёнки приводит к эмпирическому выбору смазок. Систематизация физико-химических характеристик (вязкостно-температурные зависимости, индекс вязкости, оксидативная устойчивость) совместно с поверхностной аналитикой непосредственно повышает точность рецептуринга и ускоряет вывод композиций на практику [1,2].

Выполнен комплексный анализ взаимосвязи между вязкостью, микроструктурой и трибологическими характеристиками смазочных композиций. Определено влияние структурной неоднородности и термостабильности масел на формирование защитной плёнки и несущую способность масляного слоя. Установлены критерии оптимальной вязкости, обеспечивающие минимизацию трения при сохранении устойчивости гидродинамической плёнки. Проведены атомно-силовые исследования поверхности и выявлены особенности самоорганизации компонентов смазки при высоких температурах.

Цель исследования - установить закономерности влияния молекулярного состава и структурно-реологических характеристик смазочных композиций на формирование

защитных трибоплёнок и результирующие триботехнические свойства (коэффициент трения, износ, несущая способность).

Результаты исследования позволяют осуществлять рациональный выбор смазочных материалов с учётом вязкости, температуры и зазора в подшипнике, что обеспечивает снижение трения и повышение ресурса машин. Данные могут быть использованы при проектировании энергетического и транспортного оборудования, разработке синтетических композиций с прогнозируемыми свойствами и создании методик расчёта несущей способности масляной плёнки. Практическое внедрение рекомендаций способно увеличить долговечность подшипниковых узлов на 20–30 %, снизить энергопотери и улучшить экологические показатели эксплуатации машин.

Экспериментальные исследования. Определение вязкости смазочного материала**.** Эффективность и реологические свойства смазочного материала (СМ) с различными присадками и загустителями проявляются по-разному. Определение вязкостных свойств смазочного материала осуществлялось на установке Vero Viscosimeter SV-100 стационарный лабораторный [3, 4].

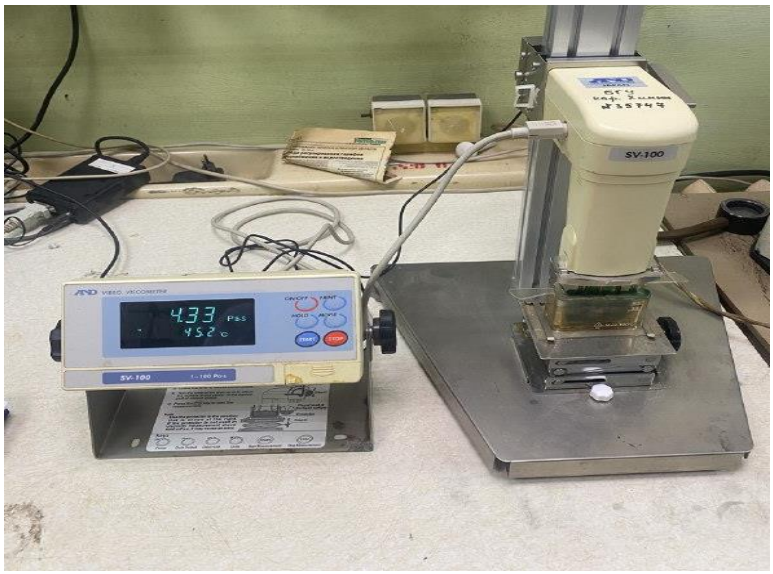


Рис.1. Автоматический вискозиметр Vero Viscosimeter SV-100.

Исследовались следующие масла: Mobil 1 ESP 5W-30, Shell Helix Ultra 5W-40, Liqui Moly Molygen 5W-30. Масла предварительно термостатировались в течение 20 минут при температурах 40 °C, 60 °C, 80 °C и 100 °C.

Таблица 1

Динамическая вязкость масел при разных температурах

Масло	40 °C, мПа·с	60 °C, мПа·с	80 °C, мПа·с	100 °C, мПа·с
Mobil 1 ESP 5W-30	63.5	42.1	27.3	17.5
Shell Helix Ultra 5W-40	82.0	53.7	34.5	21.6
Liqui Moly Molygen 5W-30	91.4	61.2	40.8	26.1

Микроструктурный анализ поверхности подшипников**.** Анализ структуры поверхности образцов после изнашивания проводился с использованием оптического микроскопа Leica DM при увеличении ×50 и ×500. До испытаний структура была равномерной и зернистой. После 60 минут испытаний обнаружены микрозадиры, участки выкрашивания и пластической деформации, особенно по краям зоны контакта.

Рис. 2. а) Микроструктура подшипника до испытаний б) микроструктура после 60 минут трения

Определение коэффициента трения. Испытания проводились на машине трения ЧШМТ при нагрузке 200 Н, скорости скольжения 0.5 м/с и температуре 100 °С. В качестве шаров использовалась сталь 45, а в качестве цилиндра – образцы из сплава АК4-1. Масло подавалось капельно. Испытания длились по 10 минут, значения коэффициента трения пересчитывались по среднему значению после серии из 10 испытаний каждого образца.

Таблица 2

Средние значения коэффициента трения

Масло	Коэффициент трения
Mobil 1 ESP 5W-30	0.083
Shell Helix Ultra 5W-40	0.091
Liqui Moly Molygen	0.075

Скорость расхода масла является важным фактором, отработанное масло следует периодически доливать. Неизбежным следствием расхода масла является то, что преобладающие концентрации загрязняющих веществ будут увеличиваться, даже если реальная скорость износа могла оставаться постоянной. С другой стороны, если для поддержания оптимального уровня в масляном поддоне добавляется свежее масло, разбавление снижает концентрацию загрязняющих частиц.

Определение шероховатости поверхности**.** Получены профили шероховатости изношенных подшипников после реальной эксплуатации из разных зон. На рисунке 3 и 4 показаны зоны повреждения металлов шатуна, которые были слегка затронуты контактом с шейками шатунного подшипника коленчатого вала. Предполагается, что в этом конкретном случае слой свинца и олова не был полностью отделен, и подшипник только подвергся нормальному износу из-за трения, приложенной нагрузки, скорости контакта, температуры контакта и мелкого абразивного износа мелкими посторонними частицами, которые могли быть тем же маслом или вставленным мусором. В подшипнике можно заметить, что слой свинца и олова был полностью оторван в центральной части, и был отчетливо виден темный цвет, который был вызван окислительным износом, который произошел в стальном слое, который является базовым слоем подшипника. Кроме того, подшипник справа показал выраженный износ, хотя в этом случае красновато-оранжевый медный слой был четко расположен. Здесь можно выявить такие механизмы износа, как износ скольжения, который перешел в сильное абразивное повреждение при высоких нагрузках, усталостный износ из-за постоянного контакта с посторонними частицами и высокой температурой.

Рис.3. Зоны повреждений

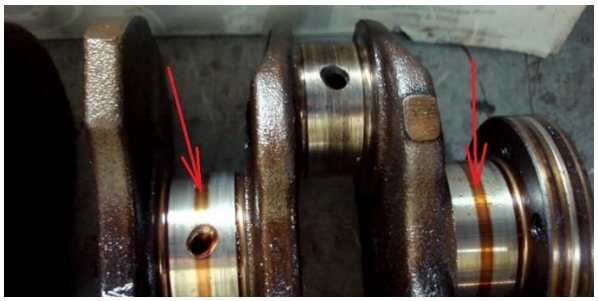
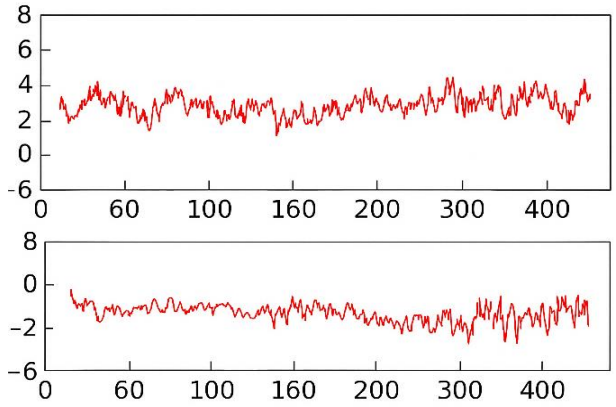
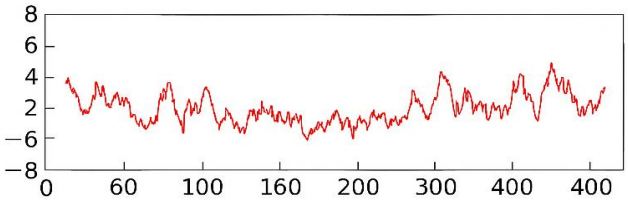


Рис. 4. Коленчатый вал исследуемого образца

Анализ шероховатости был проведен в различных зонах износа шатунных подшипников. Рисунок 3-4 показывает, как поверхность поврежденной области изменяется последовательным образом в центральной части. Износ скольжения будет намного меньше по сравнению с рисунком, где износ был более интенсивным, с высоким отслоением внешних слоев, показывая области большей глубины из-за интенсивности износа



а)



б)

Рис.5. Результаты определения шероховатости различных зон подшипника

а) б)

Рис.6. Исследуемые зоны при определении шероховатости

Определение твердости материала. Испытания твердости проводились с использованием наноиндентометра. Для каждого сечения были рассчитаны десять данных твердости из трех различных областей поперечного сечения подшипника, и было получено среднее значение. Проанализированные сечения показаны на рисунке 7. Приложенная нагрузка составляла 100 мН, скорость нагрузки и разгрузки составляла 200 мН/мин, а продолжительность измерения составляла 10 сек. Был также посчитан модуль Юнга трех различных областей подшипника. Результаты микротвердости представлены в таблице 4 и рисунке 6; наибольшее значение соответствует внешнему слою стали, который непосредственно контактирует с телом стержня. Внутренний слой, который имеет наименьшее значение твердости, непосредственно контактирует с шейками шатунных подшипников со стороны коленчатого вала. Результаты модуля Юнга или модуля упругости (E) показаны в таблице 5 и на рисунке 8. На рисунке 8 показаны следы пирамидального индентора на поверхности подшипника.

Таблица 4

Средняя микротвердость различных областей подшипника

Область	Средняя твердость (HV)	Отклонение (±HV)
Внешний слой	235.4	5.1
Центральная часть	226.8	4.3
Внутренний слой (баббит)	58.7	2.5

Таблица 5

Средний модуль Юнга (модуль упругости) по областям (в GPa):

Область	Модуль Юнга (GPa)	Отклонение (±GPa)
Внешний слой	205.2	3.4
Центральная часть	190.5	2.9
Внутренний слой (баббит)	45.8	1.7

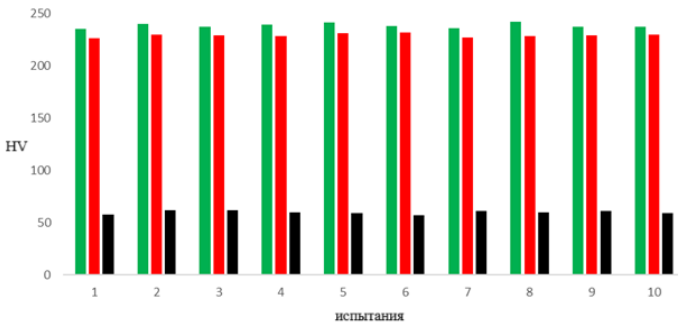


Рис. 7. Результаты микротвердости 10 испытаний

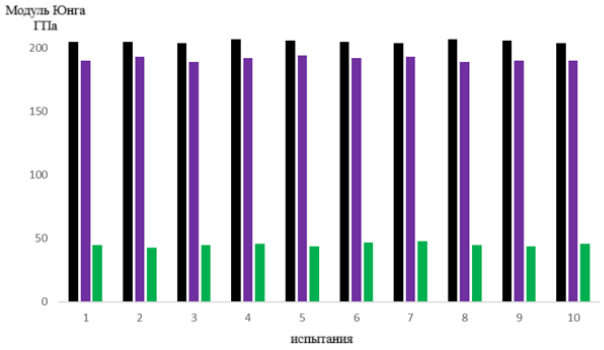


Рис. 8. Результаты расчета модуля Юнга

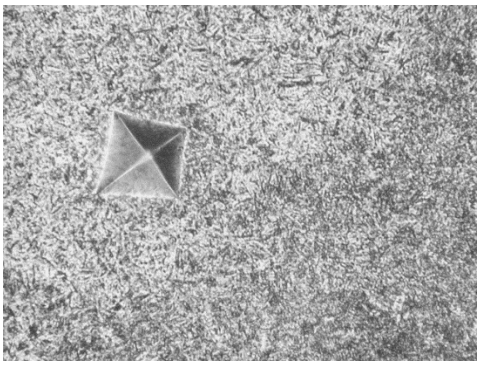


Рис.9. Изображение отпечатка индентора на поверхности образца

Выводы:

1. Установлено, что вязкость исследуемых масел (Mobil 1, Shell Helix, Liqui Moly) существенно зависит от температуры эксплуатации, что определяет характер формирования масляной плёнки при различных режимах работы.
2. Микроструктурный анализ показал наличие типичных признаков износа: микрозадиры, выкрашивание и пластическая деформация на краях зоны контакта.
3. Минимальный коэффициент трения (0,075) зарегистрирован для масла Liqui Moly Molygen 5W-30, что подтверждает высокую эффективность пакета присадок в масле.
4. Использование синтетических масел способствует увеличению микротвёрдости поверхностных слоёв и снижению износа.

Литература

1. Суслов А.Г., Тихомиров В.П., Шалыгин М.Г., Измеров М.А., Ващишина А.П. Моделирование контактного взаимодействия и изнашивания поверхностей трения. Наукоемкие технологии в машиностроении. 2025. № 12 (174). С. 35-45.
2. Ващишина А.П., Ващишин С.П Трибологические свойства ионогенных и неионогенных поверхносто-активных веществ смазочных материалов в узлах трения. В сборнике: Интеллектуальная трибология в машиностроении: BALT TRIBO 2025. сборник статей Всероссийской с международным участием научной конференции. Санкт - Петербург, 2025. С. 45-49.
3. Шалыгин М.Г., Ващишина А.П. Прогнозирование межремонтного пробега колесной пары на основании модели изнашивания гребня бандажа локомотива. Вестник машиностроения. 2025. Т. 104. № 4. С. 267-269.
4. Ващишина А.П., Шалыгин М.Г., Ващишин С.П. Исследование физико-химических характеристик пластичного смазочного материала различной концентрации. В сборнике: Трибология - машиностроению. Труды XV Международной научно-технической конференции. Москва, 2024. С. 32-34.

A comprehensive analysis of the influence of the structure and viscosity of lubricant compositions on the wear resistance of bearing contact surfaces

Vashishin S.P.[1], Ksenofontov K.A.[1]

[1] Bryansk State Technical University, BSTU

vashhi.anya@yandex.ru

Keywords: friction, wear, lubricating oils, friction coefficient, viscosity.

Lubricants are complex compositions of a hydrocarbon matrix and multifunctional additives that form thin adsorption-reaction layers on the friction surface. Their structure and composition determine rheology, thermal stability, antifriction and antiwear properties, as well as the kinetics of protective tribofilm formation. Under conditions of high specific loads and temperature gradients, it is the physicochemical processes in the oil phase and at the metal-lubricant interface that determine the load-bearing capacity and durability of components. This study focuses on a comprehensive chemical-analytical evaluation of lubricants and oils of various types to identify composition-structure-property relationships.

УДК 004.942

Моделирование и анализ гидравлических процессов и износа оборудования в трубопроводах для транспортировки нефти

Ксенофонтов К.А. [1,a], Кленичева А.Ю. [1,b]
[1] Брянский государственный технический университет, бульвар 50 Октября, д. 7, г. Брянск, Россия
[a] warfraim12@mail.ru, [b] klenicheva.anastasia@yandex.ru

Ключевые слова: нефтепровод, кавитация, эрозионный износ, кавитационное число, CFD-моделирование, запорная арматура.

В статье представлены результаты численного моделирования гидравлических процессов в магистральном нефтепроводе с анализом механизмов износа запорной арматуры. Показано, что применение методов вычислительной гидродинамики (CFD) позволяет прогнозировать зоны повышенного износа и обосновывать инженерные решения по повышению надёжности трубопроводных систем. Надёжность магистральных нефтепроводов определяется ресурсом запорной арматуры, подвергающейся интенсивному износу в зонах локальных сужений. При скоростях течения нефти свыше 2,0 м/с в горловине задвижек возникают кавитационные каверны, схлопывание которых приводит к точечному разрушению металлических поверхностей [1]. До 37 % отказов запорной арматуры магистральных нефтепроводов обусловлены кавитационно-эрозионным износом в условиях частичного перекрытия потока [5]. Актуальность работы связана с отсутствием унифицированных методик прогнозирования износа на этапе проектирования.

Теоретические основы кавитационного износа

Кавитация возникает при снижении локального давления p ниже давления насыщенных паров нефти p_v. Для нефти марки «Сургут» зависимость p_v от температуры описывается уравнением [5]:

$$p_v = 0{,}124 \cdot e^{0{,}098t}, \text{ кПА}$$

где t – температура нефти, °С. При t = 40 °С p_v = 18,7 кПа.

Критерий возникновения кавитации определяется кавитационным числом [2]:

$$\sigma = \frac{\rho - \rho v}{0{,}5\rho v^2},$$

где ρ = 860 кг/м³ - плотность нефти; v - скорость потока, м/с. При σ < 1,2 наблюдается интенсивное кавитационное разрушение поверхностей [4].

Эрозионный износ при наличии твёрдых частиц описывается зависимостью:

$$E = K \cdot C \cdot v^{2,6} \cdot sin^{1,8}\alpha,$$

где $K = 2{,}4 \cdot 10^{-9}$ – коэффициент материала (сталь 20); C – концентрация частиц, мг/л; α – угол атаки.

Методика численного моделирования

Расчётная область – участок нефтепровода D = 1420 мм, L = 20 м с клиновой задвижкой в центре. Моделирование выполнено в ANSYS Fluent 2023 R1 с применением модели турбулентности k-ω SST и кавитационной модели. Количество ячеек – 2,1 млн.

Граничные условия: вход: Q = 3,0 м³/с ($v_{ср.}$ = 1,9 м/с); выход: p = 0,8 МПа (абс.); стенки: условие прилипания, шероховатость k_s = 0,045 мм.

Результаты моделирования и анализ износа

При степени открытия задвижки 70 % минимальное давление в горловине P_{min} = 3,1 кПа < p_v = 18,7 кПа (t = 40 °С), что подтверждает возникновение кавитации (σ = 0,24). Перепад давления на задвижке Δp = 42,3 кПа превышает расчётное значение по формуле Дарси-Вейсбаха на 28 % из-за энергии, затрачиваемой на формирование и коллапс каверн [5].

Таблица 1

Гидравлические параметры и интенсивность износа задвижки

Степень открытия	P_{min}, кПа	σ	ΔP, кПа	Износ, мм/год
100 %	102,4	52,1	8,7	0,02
85 %	18,9	1,3	24,6	0,09
70 %	3,1	0,24	42,3	0,16

Таблица 2

Пространственное распределение кавитационных процессов при 70 %

Зона потока	S	α	ΔP, кПа	Характер процесса
Горловина задвижки (сужение)	0…40	0,05…0,12	3,1…8,4	Зарождение кавитационных пузырьков
Зона максимальной концентрации	40…90	0,28…0,38	4,2…6,8	Развитие каверн, объём пара максимален
Зона коллапса каверн	120…180	0,15…0,02	12,5…28,7	Схлопывание пузырьков, микрогидроудары до 1,2 ГПа
Восстановление сплошности потока	> 180	< 0,001	> 45,0	Рекомбинация фаз, стабилизация потока

Зона максимального износа локализована на расстоянии 120…180 мм ниже запорного элемента (рис. 1), где происходит схлопывание каверн с образованием микрогидравлических ударов давлением до 1,2 ГПа [4]. Расчётный срок службы задвижки при 70 % открытии составляет 2,8 года против проектных 10 лет.

При содержании твёрдых частиц C = 65 мг/л (предел по СТО 084-01-2019) и скорости v = 2,5 м/с скорость эрозионного износа в зоне отрыва потока достигает 0,34 мм/год, что в 4,2 раза превышает допустимое значение 0,08 мм/год по ГОСТ 32569-2013 [3].

Инженерные решения по снижению износа

Оптимизация геометрии запорного элемента с радиусом скругления R = 0,35D снижает пиковую скорость в горловине на 22 % и повышает p_v > до 14,8 кПа (σ = 0,95), исключая кавитацию при t ≤ 35 °C [5]. Установка фильтров грубой очистки (порог 40 мкм) снижает концентрацию частиц до C = 28 мг/л, уменьшая скорость эрозии до 0,11 мм/год.

Комплексное применение оптимизированной геометрии и предварительной очистки нефти увеличивает расчётный срок службы задвижки с 2,8 до 8,5 лет при сохранении эксплуатационных расходов, что подтверждает экономическую эффективность предложенных решений.

Выводы. Численное моделирование гидравлических процессов методом CFD позволяет количественно оценить интенсивность кавитационно-эрозионного износа запорной арматуры. Установлено, что при скорости потока 2,5 м/с и степени открытия задвижки 70 % кавитационный износ превышает допустимые значения в 2,0 раза, а эрозионный – в 4,2 раза. Оптимизация геометрии запорных элементов с радиусом скругления $R \geq 0{,}3D$ повышает ресурс арматуры. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и эксплуатации магистральных нефтепроводов для повышения надёжности трубопроводной системы.

Литература

1. Басниев К.С., Дмитриев Н.М., Рябчиков А.М. Механика пластовых систем. М.: Недра, 2017. 487 с.

2. Крапивский Е.И., Крапивский Е.А. Исследование влияния ультразвуковой кавитации на состояние нефтепровода // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2011. № 9. С. 215–223.

3. ГОСТ 32569-2013. Трубопроводы технологические стальные. Требования к устройству и эксплуатации на взрывопожароопасных и химически опасных производствах. М.: Стандартинформ, 2014.

4. Петров В.Н., Сидоров Д.В. Влияние гидродинамического удара и кавитации на образование попутного нефтяного газа // Нефтепромысловое дело. 2019. № 7. С. 34–41.

5. Шалыгин М.Г., Лукашова Е.В. Гидравлические процессы в трубопроводных системах транспорта углеводородов. Брянск: БГТУ, 2024. 218 с.

Simulation and analysis of hydraulic processes and equipment wear in oil transportation pipelines

K.A. Ksenofontov [1], A.Yu. Klenicheva [2]

[1, 2] Bryansk State Technical University, blvd. 50 Oktyabrya, 7, Bryansk, Russia

[1] warfraim12@mail.ru

[2] klenicheva.anastasia@yandex.ru

Keywords: oil pipeline, cavitation, erosion wear, cavitation number, CFD-modeling, shutoff valves.

The paper presents the results of numerical modeling of hydraulic processes in the oil export pipeline with an analysis of the mechanisms of valve wear. It has been shown that the use of computational fluid dynamics (CFD) methods makes it possible to predict zones of increased wear and justify engineering solutions to increase the reliability of pipeline systems. Reliability of trunk oil pipelines is determined by the resource of shutoff valves subjected to intensive wear in the zones of local constrictions. At oil flow velocities above 2,0 m/s, cavitation cavities appear in the valve neck, the collapse of which leads to point destruction of metal surfaces [1]. Up to 37 % of main oil pipeline valve failures are caused by cavitation-erosion wear in conditions of partial flow shut-off [5]. The relevance of the work is due to the lack of unified methods for predicting wear at the design stage.

Содержание

ЭКСПЛУАТАЦИЯ И РЕМОНТ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ

Коголь Н.Н., Герасимов С.Н., Кашуба В.Б., Аскеров Р.Т. Фрикционные автоколебания в дисковых рабочих органах бетоноотделочных машин: актуальность, проблемы и перспективы исследований 4

Чебан А.Ю. Выемочная машина для доработки прибортовых запасов ценного минерального сырья 7

Чебан А.Ю. Расширение функциональности специального агрегата для формирования штабелей некондиционных руд 10

Садовникова Я.С., Мандровский К.П. Способы повышения эффективности работы дорожных и строительных машин с помощью технологий искусственного интеллекта 14

Чуланов А.А., Мамаев Л.А., Федоров В.С., Федорова К.В. Интеллектуальные бетоноотделочные машины: как адаптивное управление меняет строительство 21

Иванов В.С. Технико-технологическое обоснование процедуры турбонаддува атмосферного дизельного двигателя OM662: на примере силового агрегата автомобиля SsangYongIstana 27

Соловьев К.А., Федоров В.С., Федорова К.В., Орлов В.А., Усов Е.Э. Адаптивные системы управления технологическим оборудованием смесительных установок: оборудование, технологии, история и перспективы 31

Карагодин В.И., Шилимов М.В., Кубышев В.Л. Формирование критерия гарантированной безопасности при обосновании эксплуатационных свойств транспортных средств 39

Карагодин В.И., Чан Ван Доан Обоснование размеров оборотного фонда гидромолотов с учетом их взаимозаменяемости 45

Фёдоров В.С., Нестер А.С., Бузурный Д.В. Влияние магнитных полей на реологию бетонных смесей для строительных 3D-принтеров 51

Емцов В.А., Зедгенизов В.Г. Перспективы применения двухмассных резонансных систем в современных технологических процессах грохочения 55

Мамаев Л.А., Герасимов С.Н., Кашуба В.Б., Востоков Н.В. Мощность привода бетоноотделочной машины с ленточно-валковым рабочим органом 63

Мамаев Л.А., Кашуба В.Б., Востоков Н.В. Условия бездефектной обработки незатвердевшей бетонной поверхности ленточно-валкового рабочего органа 67

Быценко М.В., Любимый Н.С., Клименко М.А., Вычик В.П. Разработка облегченной передвижной инструментальной тележки для выполнения ремонтных работ 71

Корнеева В.К., Капцевич В.М., Цымбалюк А.И., Пернач Е.Е., Селицкий Е.И. Анализ цифровых изображений хроматограмм моторного масла Shell Rimula 10W-40 в программе ImageJ с использованием инструмента Plot Profile 75

Архипов А.Б. Селективная выемка полезных ископаемых. Поэтапность процессов отработки месторождений 81

Жмуров В.В., Герасимов С.В., Кобзов А.Ю., Жук Е.А., Брагин С.Н. Расчёт прогиба гидроцилиндра в результате его продольно нагружения 86

Виноградов Е.Д., Зеньков С.А., Дрюпин П.Ю., Герляин И.А., Быков П.Д., Ревин Д.В. Обзор методов создания промежуточного слоя на границе контакта грунтов и рабочих органов землеройных машин 92

Зеньков С.А., Дрюпин П.Ю., Бондалет И.С., Минеев Д.А., Медведев С.Н. Лабораторное оборудование для измерения силы адгезии грунтов для определения эффективности методов борьбы с ней 96

Зеньков С.А., Дрюпин П.Ю., Герляин И.А., Виноградов Е.Д., Быков П.Д., Ревин Д.В. Обзор жидкостей для создания промежуточного слоя при борьбе с адгезией грунтов к рабочим органам землеройных машин 101
Зеньков С.А., Минеев Д.А., Дрюпин П.Ю., Бондалет И.С., Медведев С.Н. Перспективы применения пьезокерамических преобразователей для снижения адгезии грунтов к машинам 105
Минин В.В., Петров А.И., Юдаков К.С. Сравнительный анализ применения универсальных малогабаритных погрузчиков в условиях Красноярского края 110
Федоров В.С., Тобоков Р.В., Кашуба В.Б. Методы математического моделирования динамических процессов гидроприводов в системах автоматического управления 115
Шаура А.С., Фёдоров В.С., Портнягина А.В., Аскеров Р.Т. Определение мощности привода бетоносмесителя с дополнительным магнитным активатором 120
Лоншаков В.А., Шатило Д.С., Калугин А.В. Специализированная площадка для грузовых испытаний кранов, как фактор повышения достоверности экспертизы промышленной безопасности 124
Перминов А.В., Масленников В.Г., Калугин А.В. Определение соответствия параметров крана-манипулятора требованиям Ростехнадзора в процессе экспертизы промышленной безопасности 130

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Белоголов Ю.И. Моделирование затвора клапана, содержащего тонкостенное уплотнение, нагруженное усилием привода и давлением рабочей среды 144
Тихонов Н. А., Шамахов Л. М. Современные подходы к снижению энергоемкости процесса резания песчаных грунтов: анализ исследований и патентных решений 150
Литовка О. В., Левко В.А., Желудов Е. В., Нефедьев К. А. Современный уровень передовых методов финишной обработки 155
Свинин В.М., Иринчеев А.А., Владимиров Л.М., Инак С.В., Амененко Т.П. Экспериментальная установка вибрационного контроля вращающихся металлорежущих инструментов 160
Исаченко А.С., Гарбуза А.С., Старновская В.В. Применение стереозрения в машиностроении для бесконтактного измерения деталей 165
Матлыгин Г.В., Гарбуза А.С., Старновская В.В. Разработка программного обеспечения для оптимизации наладки резьбошлифовальных станков 171
Марков А. Н., Марков В. А., Войнаш С. А., Наседкин И.В., Вохмянин Н.А. Исследование режимов электромеханического упрочнения на физико-механические свойства и качество поверхностей деталей 174
Холов Б.А., Архипов П.В., Чуев В.Д., Тосенко Д.С., Елистратов А.М. Гибридные технологии при обработке высокопрочных материалов: анализ эффективности и перспективы внедрения 179
Тосенко Д.С., Архипов П.В., Елистратов А.М., Холов Б.А., Чуев В.Д. Технологические особенности и области применения комбинированных методов обработки высокопрочных материалов 184
Елистратов А.М., Архипов П.В., Тосенко Д.С., Холов Б.А., Чуев В.Д. Аддитивные технологии при изготовлении изделий из высокопрочных материалов 190

Содержание

Ерошков В.Ю., Шеховцева Е.В., Шеховцева Т.В. Вопросы расчета, конструирования и технологии монтажа редукторных и трансмиссионных узлов газотурбинных двигателей и агрегатов на их основе 196
Лобанов П.О., Рычков Д.А. Повышение качества сварки профильного проката путём рационализации режимов на основе численного моделирования и экспериментальных исследований 210
Сәрсенқызы А., Кокаева Г.А.,Рамазанова Ж.М., Рыспек С.А., Ілес Ж.Т. Сверхзвуковое дуговое распыление и методы напыления 213
Долгов А.Б., Никифоров А.А. , Бочкарев П.Ю. Методология цифрового описания деталей и технологических возможностей оборудования в системе ТПП машиностроительного предприятия 216
Лосев Е.Д. , Климов Н.Н., Чуев В.Д. Проблемы и перспективы обработки новых труднообрабатываемых материалов с применением комбинированного электроалмазного способа по методу двойного травления 220
Мохначев В.А., Попов В.Ю., Рычков Д.А. Использование технологии компьютерного зрения с искусственным интеллектом на производствах мехатроники и робототехники 225
Лобанов П.О., Попов В.Ю., Рычков Д.А. Применение технологий искусственного интеллекта для автоматизации подготовки технологической документации на предприятиях мехатроники и робототехники 230
Казаков Е.Г., Попов В.Ю. Применение методов машинного обучения в задачах резания материалов на производствах мехатроники и робототехники 234
Бацкалёв Э.В., Попов В.Ю., Рычков Д.А. Применение технологий искусственного интеллекта в расчетах на прочность конструкций на предприятиях мехатроники и робототехники 239
Степаняк М.Д., Рычков Д.А. Увеличение межремонтного периода воздухоподогревателей котлов и новые методы ремонта 245

КОНСТРУКЦИИ, ТЕХНИЧЕСКИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Семыкина А.С., Цой Е.А., Орлов Л.В., Лежнева В.А., Артыков М. Зимние шины: виды, характеристики и их влияние на безопасность 250
Камнев А. В., Толстошеев Э. В., Рябинин И. А., Усов Д. А. Исследование радиуса качения колеса в ведомом режиме при его движении по двум роликам диагностического стенда 253
Иванов В.С. История развития сельскохозяйственных машин и техники в Индии 258
Иванов В.С. Эволюция и современное состояние тракторостроения на Минском тракторном заводе 261
Петракова А. Г., Минжасаров М. Х. Влияние адаптивных систем буксового узла на динамические характеристики грузовых вагонов 265
Доценко А.И., Большаков И.Д. Виброраскатчик для бестраншейной прокладки инженерных коммуникаций в несвязных и малосвязных грунтах 275
Лукашов Н.А, Антипин Д.Я., Лукашова Е. В. Повышение точности прогнозирования продольной динамики пассажирских вагонов с применением гибридного моделирования и полимерных поглощающих аппаратов 281
Кукушкин Е. В. Конструкция карданного шарнира со сменными шипами крестовины 285
Матвиенко С.А., Стрельник Ю.Н. Методология многокритериальной оценки технического состояния автотранспортных средств 289

Демидов Н.Н., Добрецов Р.Ю., Войнаш С.А., Соколова В.А., Ерыгин В.В. Анализ влияния модульного гусеничного движителя на плодородие почв и тягово-сцепные возможности машины 294
Кривцов С.Н., Данилов В.А. Результаты экспериментального исследования по определению возможности использования датчика детонации для диагностирования двигателей 298
Клименко М.А., Любимый Н.С., Быценко М.В., Вычик В.П. Разработка виброгасящей подвески для стабилизации груза при транспортировке дроном 306

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, ДИНАМИКА И ПРОЧНОСТЬ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ

Зюзин Д.И., Маркидонов А.В. Исследование взаимодействия примесных атомов водорода с вакансией 311
Маркидонов А.В. О возможности изучения дислокационных структур в конструкционных материалах при помощи метода компьютерного моделирования 316
Камнев А. В., Толстошеев Э. В., Усов Д. А. Сравнительный анализ влияния шаблонов заполнения и геометрии оболочки на прочность FDM-изделий 320
Кленичева А.Ю., Корзиков Е.А. Анализ воздействия потока жидкости в торцевом уплотнении на износ деталей магистрального насоса для транспортировки нефти 325
Марков А.Н., Марков В.А., Соколова В.А., Войнаш С.А., Наседкин И.В. О новых возможностях применения композиционных материалов в машиностроении и ремонте 329
Горунович С. Б. Использование самонесущей способности парных технологических трубопроводов для снижения количества опор 335
Евтух Е.С., Евтух Г.Е. Оценка возможности применения антифрикционного покрытия на основе графена для лепестков газодинамических подшипников 342
Шалыгин М.Г., Евтух Г.Е., Евтух Е.С. Анализ влияния вибрации на износ подшипника компрессора газотурбинного агрегата методом трибодиагностики 346
Гиннэ С.В., Колосова Е.Р. О применении металлокерамических композиционных материалов для изготовления деталей механизмов, машин и оборудования 351
Хряпенко К.Д., Григорьева А.Л. Двойная сверточная архитектура для мультимодального прогнозирования трещинообразования в металлических пластинах при одноосном растяжении 355
Канашин И. В., Григорьева А. Л., Григорьев Я. Ю. Расчёт деформаций в задаче о вдавливании клина с ограниченной поверхностью контакта в выпуклую заготовку 361
Веремейчик А.И. Численное решение краевой задачи термоупругости для непрерывно-неоднородных тел с переменным коэффициентом линейного расширения 367
Огар П.М., Сампетова М.В., Сангзода А.А., Угрюмова Е.В., Маргарян Д.Э. Особенности моделирования шероховатых поверхностей для задач герметологии 375
Обухов З.Д. Повышение точности определения нормального модуля упругости при кинетическом индентировании 386
Ващишин С.П., Ксенофонтов К.А. Комплексный анализ влияния структуры и вязкости смазочных композиций на износостойкость контактных поверхностей подшипников 394
Ксенофонтов К.А., Кленичева А.Ю. Моделирование и анализ гидравлических процессов и износа оборудования в трубопроводах для транспортировки нефти 400

Опубликовано в авторской редакции

Подписано в печать16.04.2026

Формат 84×108 1/16
Уч.-изд.л 33,25 Усл.печ.л. 33,25.
Заказ 34

Электронная версия издания размещена
в локальной сети ФГБОУ ВО «БрГУ» в разделе «Библиотека»
665709, г. Братск Иркутской области, ул. Макаренко 40