

Исследование остаточных напряжений. Численное моделирование

А.К. Мозалевская^{1,a}, Р.С. Большаков^{1,b}, С.К. Каргапольцев^{2,c}

¹Иркутский государственный университет путей сообщения, ул. Чернышевского 15, Иркутск, Россия

²Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова 83, Иркутск, Россия

^a mozalevskaya@mail.ru, ^b bolshakov_rs@mail.ru, ^c kck6262@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-0590-176X>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-1187-5932>,

^c <https://orcid.org/0000-0002-4601-3099>

Статья поступила 07.04.2025, принята 17.05.2025

Цель данной статьи – изучение влияния механической обработки заготовок малой жесткости из алюминиевых сплавов при изменении их геометрических параметров на вид эпюры остаточных напряжений в теле исследуемой заготовки с учетом их перераспределения после фрезерования, а также оценка остаточных напряжений после снятия поверхностного слоя исследуемого образца из алюминиевого сплава. Проведение исследований основывалось на известных теоретических положениях об общем виде симметричной эпюры остаточных напряжений после термической обработки и на возможностях экспериментальных методов механической обработки, а также на применении специализированных пакетов прикладных программ на основе метода конечных элементов. В ходе выполнения численного эксперимента значение растягивающих остаточных напряжений у обеих поверхностей плиты из алюминиевого сплава принято 200 МПа с последующим последовательным уменьшением к границам области сжимающих остаточных напряжений до 50 МПа, в центре которой напряжение также условно принято в пределах 200 МПа с последовательным уменьшением до 100 МПа для сопряжения с растягивающими контурами напряжений. Показано изменение эпюры остаточных напряжений при моделировании снятия верхнего слоя заготовки с учетом остаточных деформаций, а также при одновременном удлинении верхнего и нижнего слоев исследуемого образца. Установлен уровень снижения остаточных напряжений в маложестких заготовках из алюминиевых сплавов после механической обработки фрезерованием. Проведен численный эксперимент с использованием конечно-элементной модели в пакете прикладных программ FEMAP, иллюстрирующей напряженно-деформированное состояние исследуемого образца. Дальнейшие исследования могут быть связаны с оценкой изменения эпюры остаточных напряжений при ее несимметричном характере.

Ключевые слова: остаточные напряжения; метод конечных элементов; механическая обработка; напряженно-деформированное состояние; маложесткие детали.

Investigation of residual stresses. Numerical modeling

A.K. Mozalevskaya^{1,a}, R.S. Bolshakov^{1,b}, S.K. Kargapoltsev^{2,b}

¹Irkutsk State Transport University; 15, Chernyshevsky St., Irkutsk, Russia

²Irkutsk National Research Technical University; 83, Lermontov St., Irkutsk, Russia

^a mozalevskaya@mail.ru, ^b bolshakov_rs@mail.ru, ^c kck6262@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-0590-176X>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-1187-5932>,

^c <https://orcid.org/0000-0002-4601-3099>

Received 07.04.2025, accepted 17.05.2025

The purpose of this paper is to study the influence of mechanical processing of aluminum alloy workpieces with a change in their geometric parameters on the type of final stress plot in the body of the studied workpiece, taking into account their redistribution after milling, as well as the assessment of the final stresses after removing the surface layer of the aluminum alloy sample. The research is based on known theoretical provisions on the general form of a symmetric residual stress diagram after heat treatment and on the capabilities of experimental mechanical treatment methods, as well as on the use of specialized application software packages based on the finite element method. During the numerical experiment, the value of tensile residual stresses at both surfaces of the aluminum plate is taken to be 200 MPa with a subsequent sequential decrease to the boundaries of the compressive residual stress region to 50 MPa, in the center of which the stress is also conditionally taken within 200 MPa with a sequential decrease to 100 MPa for conjugation with tensile stress contours. The change in the residual stress diagram is shown when simulating the removal of the upper layer of the workpiece taking into account residual deformations, as well as with simultaneous elongation of the upper and lower layers of the sample under study. The level of reduction of residual stresses in low-rigidity parts made of aluminum alloys after mechanical processing by milling is established. A numerical experiment is carried out using a finite element model in the FEMAP software package, illustrating the stress-strain state of the sample under study. Further studies can be associated with the assessment of the change in the residual stress diagram with its asymmetric nature.

Keywords: residual stresses; finite element method; mechanical processing; stress-strain condition; low-rigidity details.

Введение. Реализация штатных технологических процессов на предприятиях тяжелого машиностроения является основой для последующего длительного безопасного использования производимых заготовок, деталей, узлов, агрегатов, машин и механизмов, используемых в дальнейшем в производственных целях. Этим обусловлено повышенное внимание ко всем этапам изготовления готовых изделий, так как каждая стадия производства сопровождается влиянием различных негативных факторов, связанных как с формированием готового образца, так и появляющихся после его изготовления. В этом направлении известен ряд научных исследований, нашедших отражение в публикациях в виде статей и монографий отечественных и зарубежных ученых [1–6].

Длительная эксплуатация промышленного оборудования при производстве широкой номенклатуры деталей сопровождается возникновением различного рода неравномерностей, связанных в том числе с появлением биений, увеличением или уменьшением регламентированных зазоров, что влечет за собой повышение уровня шума и появление нежелательных вибрационных процессов, сопровождающих работы используемых технологических машин. Учет, контроль и снижение этих факторов положительно сказываются на повышении надежности и безопасности работы технологического оборудования [7–12], что напрямую влияет на качество производимых изделий.

Последующее применение произведенных деталей связано с оценкой наличия дефектов в теле полученного образца. К ним можно отнести нарушение геометрии готового изделия, внутренние микротрещины, продольные складки и др. [13–16]. Одной из основных причин, снижающих качество полученных заготовок, являются остаточные напряжения. Их определение связано как

с применением механических методов, так и с использованием способов неразрушающего контроля [15–21]. При всей разработанности проблемы в данном направлении остаются нерешенные вопросы, связанные как с комплексным использованием разрушающих и неразрушающих методов, так и с интерпретацией полученных результатов на основе численных экспериментов.

Цель исследования заключается в оценке изменения механических параметров в заготовках из алюминиевых сплавов до и после фрезерной обработки одной и двух поверхностей плиты из алюминиевых сплавов на основе численного эксперимента с учетом возможностей применения метода конечных элементов при определении остаточных напряжений и интерпретации полученных результатов с учетом известных теоретических положений.

Материалы и методы исследования. Изучение технологического подхода и методики моделирования построено на примере формирования конечно-элементной модели детали из алюминиевого сплава типа «Плита» марки В95Т, представляющей собой закаленный сплав алюминия после термической обработки и используемой при производстве деталей для авиационной промышленности. Общий вид заготовки может быть представлен в виде параллелепипеда.

Особенности проведения термической обработки, заключающиеся в различной скорости остывания частей заготовки из-за градиента температуры, обуславливают возникновение остаточных напряжений, распределение которых может в приближенном виде с учетом плоской системы координат оценено в виде параболической зависимости [19, 20], как показано на рис. 1, где представлен частный случай линейного распределения остаточных напряжений по длине заготовки.

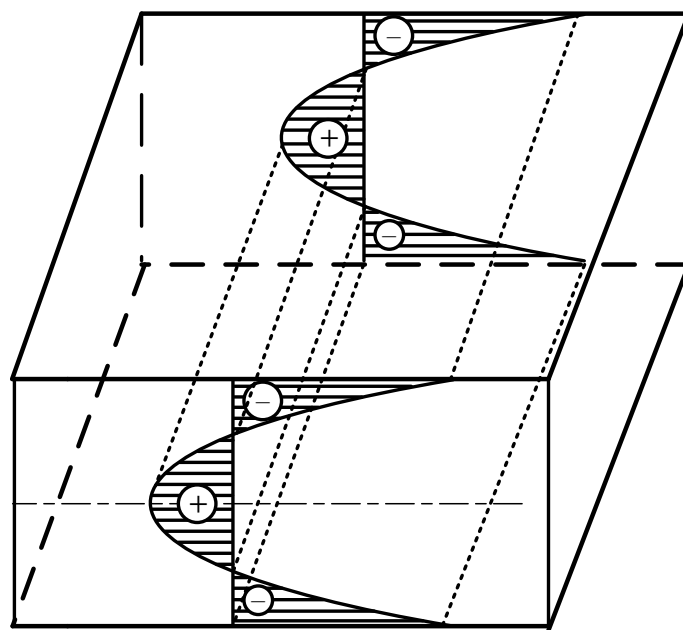


Рис. 1. Пространственное распределение остаточных напряжений после термической обработки

Представленная на рис. 1 эпюра остаточных напряжений содержит области сжимающих и растягивающих напряжений, находящихся в равновесном состоянии. Снижение уровня остаточных напряжений в заготовке достигается путем снятия ее верхнего слоя. Этому сопутствует их перераспределение, что сопровождается появлением остаточных деформаций и изменением геометрии рассматриваемой заготовки. Для реализации процедуры снятия слоя материала необходимо идентифицировать местонахождение остаточных напряжений. Расположение остаточных напряжений в теле плиты из алюминиевых сплавов можно определить при помощи методов неразрушающего контроля, в том числе с применением рентгена [19, 20].

Проверка качества готового изделия с габаритами $200 \times 300 \times 100$ мм производится при помощи поверочно-го стола с фиксирующими элементами и измерительно-

го оборудования, работающего на специализированном программном обеспечении.

Проведение численного эксперимента с использованием метода конечных элементов связано с построением приближенной модели исследуемой заготовки, ее закреплением и приложением внутренних сил в соответствующих областях заготовки, которые с достаточной точностью сформируют общую картину распределения остаточных напряжений в исследуемом образце. Для корректного использования пакета прикладных программ закрепление прикладывается к нижней грани образца, а нагружение представляет собой уравновешенные силы. После закрепления модели заготовки и приложения к ней соответствующих статических силовых воздействий проведен анализ напряженно-деформированного состояния исследуемой заготовки. Его результаты приведены на рис. 2.

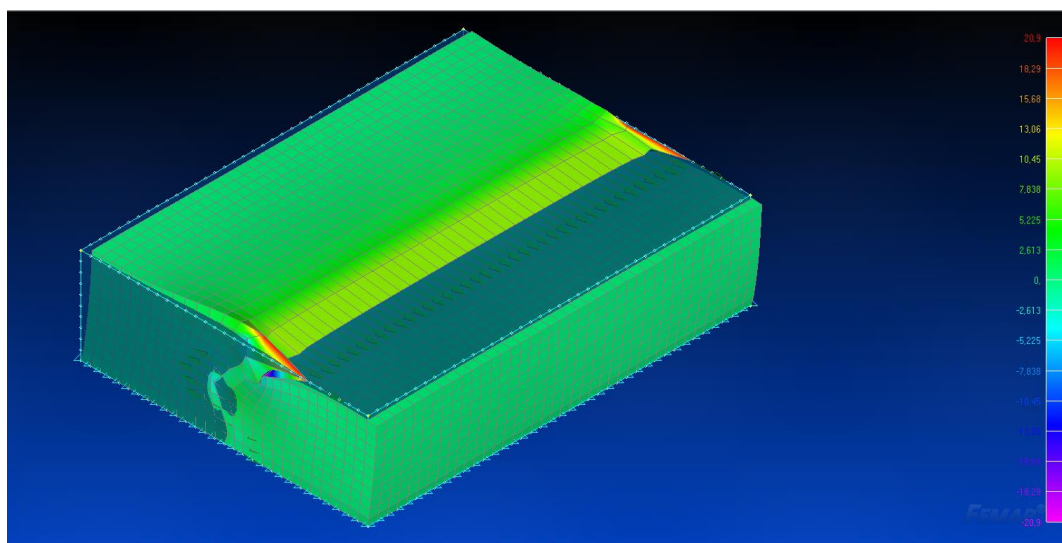


Рис. 2. Конечно-элементная модель плиты из алюминиевых сплавов при наличии остаточных напряжений

После формирования общей картины расположения остаточных напряжений в теле исследуемого образца производится реализация технологии снятия припуска.

Значение толщины срезаемого материала принимается примерно 5 мм. Анализ напряженно-деформированного состояния представлен на рис. 3.

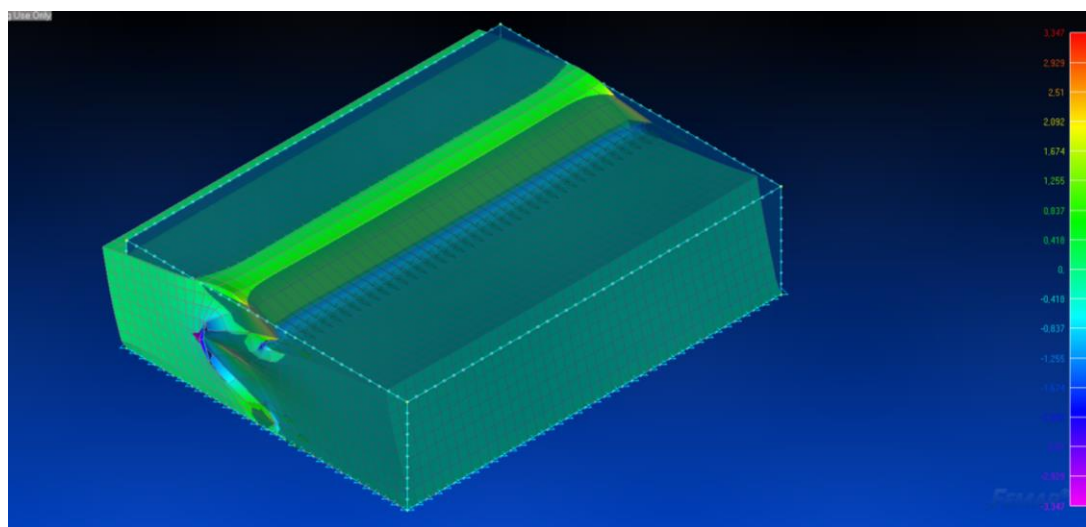


Рис. 3. Конечно-элементная модель плиты из алюминиевых сплавов при наличии остаточных напряжений после обработки

При снятии припуска с заготовок происходит перераспределение остаточных напряжений до установившегося равновесного состояния оставшихся в них остаточных напряжений. Подбор оптимального сочетания толщины припуска и граней снятия позволяет получить равновесное состояние с достаточной точностью

и уменьшить трудоемкость реализации такой технологии. Срез материала с одной из поверхностей изменяет геометрические параметры заготовки, что показывает на перераспределение остаточных напряжений. Показаны различные варианты сочетания величин припусков на разных гранях заготовки (рис. 4).

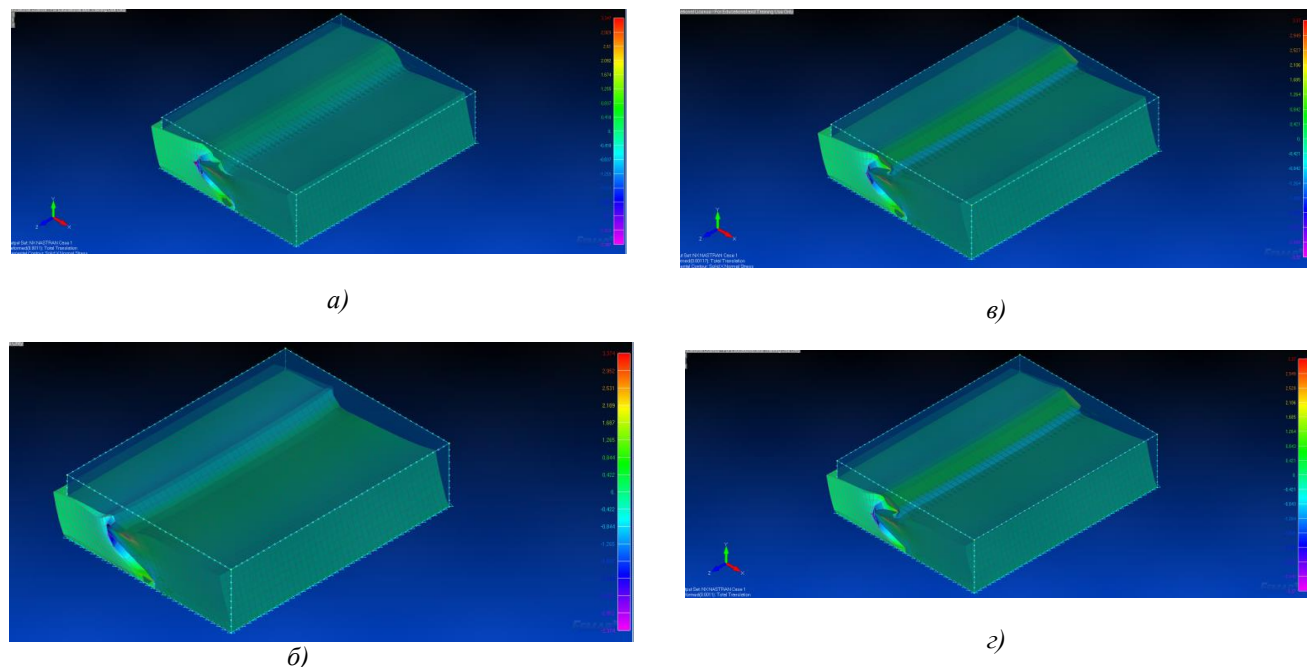


Рис. 4. Модель плиты из алюминиевых сплавов после снятия припуска: с верхней грани 10 мм (а); с верхней грани 15 мм (б); с верхней и нижней граней по 5 мм (в); 10 мм с верхней грани и 5 мм с нижней (г)

Механические методы являются наиболее действенными при определении остаточных напряжений, но имеют существенный недостаток – разрушение исследуемого образца. В этом случае целесообразнее применение как методов неразрушающего контроля, так и известных теоретических положений, посвященных распределению остаточных напряжений. Также достаточную эффективность показывает использование метода конечных элементов. Применение специализированного пакета прикладных программ показывает близкую сходимость с теоретическими положениями. Результат конечно-элементного анализа детали после снятия припуска отображает перераспределение зон нагружения и снижение максимальных значений перемещения узлов заготовки.

Заключение. Предлагаемый подход для оценки эпюры остаточных напряжений исследуемой заготовки из алюминиевых сплавов с учетом известных теоретиче-

ских положений позволяет построить конечно-элементную модель, с достаточной точностью отображающую остаточных напряжений в теле рассматриваемой заготовки, что дает возможность корректировки процесса формирования технологии механической обработки готового изделия для уменьшения уровня остаточных напряжений, в том числе при отсутствии возможности реализации некоторых ее этапов. На примере конечно-элементной модели исследуемого образца показаны особенности напряженно-деформированного состояния при различных вариантах изменения ее геометрических параметров. Произведена оценка уровня изменения остаточных деформаций. Сформированная методика позволяет снизить затраты на исследование маложестких заготовок на наличие остаточных напряжений за счет информации об изменении эпюры остаточных напряжений, полученной на основе численного моделирования.

Литература

1. Биргер И.А. Остаточные напряжения. М.: Изд-во Машиностроение, 1963. 233 с.
2. Промптов А.И. Формирование общих подходов к управлению качеством поверхности при механической обработке // Вестн. Иркутск. гос. технич. ун-та. 2005. № 2(22). С. 98-101.
3. Бондаренко Ю.А. Технология изготовления деталей на станках с ЧПУ. Старый Оскол: ООО «ТНТ», 2011. 292 с.
4. Тайц В.Г. Технология машиностроения и производство подъемно-транспортных, строительных и дорожных машин. М.: Академия, 2007. 368 с.
5. Чернышев Г.Н., Попов А.Л., Козинцев В.М., Пономарев И.И. Остаточные напряжения в деформируемых твердых телах. М: Наука. Физматлит, 1996. 240 с.
6. Каргапольцев С.К. Остаточные деформации при фрезеровании маложестких деталей с подкреплением. Иркутск: Иркутский Дом печати, 1999. 136 с.
7. Определение реакций связей между элементами виброзащитных систем на основе метода структурных преобразований // Механики XXI века. 2016. № 15. С. 295-300.
8. Bolshakov R.S. Unilateral Constraints in Interactions of System Elements: Estimation of Dynamic Constraint Reactions //

Proceedings of the 6th Internat. Conf. on Industrial Engineering (ICIE 2020): Ser. Lecture Notes in Mechanical Engineering, Chelyabinsk, May 18–22 2020. Vol. 1. Chelyabinsk: Springer Science+Business Media B.V., Formerly Kluwer Academic Publishers B.V., 2021. P. 851–860. DOI: 10.1007/978-3-030-54814-8_98

9. Eliseev S.V., Bolshakov R.S., Trofimov A.N., Orlenko A.I. Structural mathematical modelling: The concept of feedback in the dynamics of mechanical oscillation systems // Journ. of Physics: Conference Series, Omsk, 13–15 ноября 2018 г. Vol. 1210. Omsk: Institute of Physics Publishing, 2019. P. 012037. DOI: 10.1088/1742-6596/1210/1/012037
10. Bolshakov R.S. The estimation of dynamical condition of vibration technological machines at joint action of two external disturbances // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: Ser. 4. 2020 Internat. Conf. on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, IC-MTMTE 2020, Sevastopol, 07–11 сентября 2020 г. Vol. 971. Bristol, England: IOP Publishing Ltd, 2020. P. 042007. DOI: 10.1088/1757-899X/971/4/042007
11. Korneev S.V., Bolshakov R.S. Applications of Control Theory Approaches to Assessing the Dynamical Interactions of Elements of Technical Objects // 2023 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics), Omsk, 14–15 ноября 2023 г. Omsk: Publishing House of Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2023.
12. Патент № 2689901 C2 Российская Федерация, МПК F16F 15/02, F16F 7/10. Устройство управления вибрационным полем технологической машины: № 2017140746: заявл. 22.11.2017; опубл. 29.05.2019 / С.В. Елисеев, Р.С. Болшаков, А.В. Елисеев [и др.]; заяв. Иркутск. гос. ун-т путей сообщения.
13. Бачурин А.С., Бобин К.Н., Матвеев К.А., Курлаев Н.В. Численное моделирование влияния припуска на величину остаточных напряжений в деталях летательных аппаратов после закалки // Вестник СибГАУ. 2013. № 3 (49). С. 123–127.
14. Ключников С.И. Использование системы MSC/Nastran для моделирования перераспределения внутренних напряжений при фрезеровании изделий // Вестн. Иркутск. гос. технич. ун-та. 2006. № 4 (28). С. 1516.
15. Хусаинов Р.М., Мубаракшин И.И., Сабиров А.Р. Исследование упругих деформаций при обработке на вертикально-фрезерных станках // Науч.-техн. вестник Поволжья. 2015. № 5. С. 304–308.
16. Rossini N.S., Dassisti M., Benyounis K.Y., Olabi A.G. Methods of measuring residual stresses in components (Review) // Materials and Design. 2012. № 35. P. 572–588. DOI: 10.1016/j.matdes.2011.08.022
17. Schajer G.S. Residual Stresses: Measurement by Destructive Methods // Encyclopedia of Materials: Science and Technology. Section 5a. Oxford: Elsevier Science, 2001. P. 8152–8158. DOI: 10.1016/B0-08-043152-6/01462-5
18. Schajer G.S., Philip S.W. Hole-Drilling Method for Measuring Residual Stresses // Synthesis SEM Lectures on Experimental Mechanics. 2018. № 1. P. 1–186. DOI: 10.2200/S00818ED1V01Y201712SEM001
19. Каргапольцев С.К. Современные технологии диагностики остаточных напряжений // Системы. Методы. Технологии. 2024. № 3(63). С. 15–25. DOI: 10.18324/2077-5415-2024-3-15-25
20. Каргапольцев С.К. Способы определения термических остаточных напряжений в заготовках типа плит из алюминиевых сплавов // Системы. Методы. Технологии. 2023. № 4(60). С. 27–32. DOI: 10.18324/2077-5415-2023-4-27-32
21. Rickert T. Residual Stress Measurement by ESPI Hole-Drilling // Procedia CIRP. 2016. Vol. 45. P. 203–206. DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.256

References

1. Birger I.A. Residual stresses. Moscow: Mashinostroenie Publishing House, 1963. 233 p.
2. Promptov A.I. Formation of general approaches to surface quality management in mechanical processing // Vestnik Irkutsk State Technical University. 2005. № 2(22). P. 98–101.
3. Bondarenko Yu.A. Technology of the parts manufacturing on the CNC machines. Stary Oskol: LLC “TNT”, 2011. 292 p.
4. Taitz V.G. Technology of mechanical engineering and production of lifting-transport, construction and road machines. Moscow: Academy, 2007. 368 p.
5. Chernyshev G.N., Popov A.L., Kozintsev V.M., Ponomarev I.I. Residual stresses in deformable solid bodies. M: Nauka. Fizmatlit, 1996. 240 p.
6. Kargapoltsev S.K. Residual deformations at milling of low-rigid parts with reinforcement. Irkutsk: Irkutsk House of Press, 1999. 136 p.
7. Determination of bond reactions between elements of vibration protection systems based on the method of structural transformations // Mechanics to XXI century. 2016. № 15. P. 295–300.
8. Bolshakov R.S. Unilateral Constraints in Interactions of System Elements: Estimation of Dynamic Constraint Reactions // Proceedings of the 6th Internat. Conf. on Industrial Engineering (ICIE 2020): Ser. Lecture Notes in Mechanical Engineering (ICIE 2020): Ser. Lecture Notes in Mechanical Engineering, Chelyabinsk, May 18–22 2020. Vol. 1. Chelyabinsk: Springer Science+Business Media B.V., Formerly Kluwer Academic Publishers B.V., 2021. P. 851–860. DOI: 10.1007/978-3-030-54814-8_98
9. Eliseev S.V., Bolshakov R.S., Trofimov A.N., Orlenko A.I. Structural mathematical modelling: The concept of feedback in the dynamics of mechanical oscillation systems // Journ. of Physics: Conference Series, Omsk, 13–15 ноября 2018 г. Vol. 1210. Omsk: Institute of Physics Publishing, 2019. P. 012037. DOI: 10.1088/1742-6596/1210/1/012037
10. Bolshakov R.S. The estimation of dynamical condition of vibration technological machines at joint action of two external disturbances // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: Ser. 4. 2020 Internat. Conf. on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, IC-MTMTE 2020, Sevastopol, 07–11 сентября 2020 г. Vol. 971. Bristol, England: IOP Publishing Ltd, 2020. P. 042007. DOI: 10.1088/1757-899X/971/4/042007
11. Korneev S.V., Bolshakov R.S. Applications of Control Theory Approaches to Assessing the Dynamical Interactions of Elements of Technical Objects // 2023 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics), Omsk, 14–15 ноября 2023 г. Omsk: Publishing House of Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2023.
12. Patent № 2689901 C2 Russian Federation, MPK F16F 15/02, F16F 7/10. Vibration field control device for technological machine: No. 2017140746: applied on 22.11.2017: published on 29.05.2019 / S.V. Eliseev, R.S. Bolshakov, A.V. Eliseev [and et al]; applicant Irkutsk State Univ. of Railway Transport.
13. Bachurin A.S., Bobin K.N., Matveev K.A., Kurlaev N.V. Numerical modeling of the allowance effect on the residual stresses in aircraft parts after hardening // Vestnik SibGAU. 2013. № 3 (49). P. 123–127.
14. Klyuchnikov S.I. Use of the MSC/Nastran system for modeling of the internal stress redistribution at the product milling (in Russian) // Bulletin of Irkutsk State Technical University. 2006. № 4 (28). P. 1516.
15. Khusainov R.M., Mubarakshin I.I., Sabirov A.R. Investigation of elastic deformations during machining on vertical milling machines // Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region. 2015. № 5. P. 304–308.
16. Rossini N.S., Dassisti M., Benyounis K.Y., Olabi A.G. Methods of measuring residual stresses in components (Review) //

- Materials and Design. 2012. № 35. P. 572-588. DOI: 10.1016/j.matdes.2011.08.022
17. Schajer G.S. Residual Stresses: Measurement by Destructive Methods // Encyclopedia of Materials: Science and Technology. Section 5a. Oxford: Elsevier Science, 2001. P. 8152-8158. DOI: 10.1016/B0-08-043152-6/01462-5
18. Schajer G.S., Philip S.W. Hole-Drilling Method for Measuring Residual Stresses // Synthesis SEM Lectures on Experimental Mechanics. 2018. № 1. P. 1-186. DOI: 10.2200/S00818ED1V01Y201712SEM001
19. Kargapoltsev S.K. Modern technologies of the residual stress diagnostics // Systems. Methods. Technologies. 2024. № 3(63). P. 15-25. DOI: 10.18324/2077-5415-2024-3-15-25
20. Kargapoltsev S.K. Methods of determination of thermal residual stresses in billets of the plate type from aluminum alloys // Systems. Methods. Technologies. 2023. № 4(60). P. 27-32. DOI: 10.18324/2077-5415-2023-4-27-32
22. Rickert T. Residual Stress Measurement by ESPI Hole-Drilling // Procedia CIRP. 2016. Vol. 45. P. 203-206. DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.256