

ПРОБЛЕМЫ МЕХАНИКИ И МАШИНОСТРОЕНИЯ

УДК: 621.787.4

DOI:10.18324/2077-5415-2022-3-7-15

Влияние основных параметров реверсивного поверхностного пластического деформирования на напряженно-деформированное состояние цилиндрических деталей

С.А. Зайдес^а, Нгуен Хыу Хай^б

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

^а zsa@istu.edu, ^б nquan6799@gmail.com

^а <https://orcid.org/0000-0001-9416-7749>, ^б <https://orcid.org/0000-0001-7909-385X>

Статья поступила 14.06.2022, принята 14.09.2022

В статье рассмотрена отделочно-упрочняющая обработка деталей машин типа валов и осей реверсивным поверхностным пластическим деформированием. С использованием программного обеспечения для 3D-проектирования и вычислительного моделирования построена конечно-элементная модель для определения напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя цилиндрических деталей в зависимости от основных параметров реверсивного поверхностного деформирования и физико-механических свойств материала. Кроме того, установлена зависимость глубины пластического слоя от основных параметров упрочнения. Установлено, что уменьшение продольной подачи рабочего инструмента, повышение частоты вращения заготовки и величины радиального натяга приводят к росту временных и остаточных напряжений в поверхностном слое упрочненных деталей. Показано изменение напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя в зависимости от физико-механических свойств материала: большие напряжения формируются у материала с повышенным пределом текучести и модулем упругости.

Ключевые слова: реверсивное поверхностное пластическое деформирование; продольная подача рабочего инструмента; частота вращения заготовки; временные и остаточные напряжения; глубина пластической деформации; физико-механические свойства материала.

The influence of the main parameters of the reversible surface plastic deformation on the stress-strain state of cylindrical parts

S.A. Zaides^а, Nguyen Huu Hai^б

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

^а zsa@istu.edu, ^б nquan6799@gmail.com

^а <https://orcid.org/0000-0001-9416-7749>, ^б <https://orcid.org/0000-0001-7909-385X>

Received 14.06.2022, accepted 14.09.2022

The article considers the finishing and hardening processing of machine parts such as shafts and axles by reversible surface plastic deformation. Using software for 3D design and computational modeling, a finite element model is built to determine the stress-strain state of the surface layer of cylindrical parts depending on the main parameters of reversible surface deformation and the physical and mechanical properties of the material. In addition, the dependence of the depth of the plastic layer on the main parameters of hardening has also been established. Moreover, the dependence of the depth of the plastic layer on the main hardening parameters has also been determined. It has been established that a decrease in the longitudinal feed of the working tool, an increase in the frequency of rotation of the workpiece and the magnitude of the radial interference lead to an increase in temporary and residual stresses in the surface layer of the hardened parts. The change in the stress-strain state of the surface layer is shown depending on the physical and mechanical properties of the material: large stresses are formed in a material with an increased yield strength and elastic modulus.

Keywords: reversible surface plastic deformation; longitudinal feed of the working tool; workpiece rotation frequency; temporary and residual stresses; plastic deformation depth; physical and mechanical properties of the material.

Введение. Надежность любого изделия машиностроения во многом зависит от качества изготовления отдельных деталей. Механическая обработка деталей машин еще довольно широко применяется в нашей стране и позволяет получать достаточно точные размеры обрабатываемых поверхностей. Однако состояние поверхностного слоя не всегда удовлетворяет требованиям к эксплуатационным показателям отдельных узлов и изделиям в целом. Поверхностный слой деталей машин в первую очередь

испытывает силовые и температурные воздействия, именно в поверхностном слое зарождаются и развиваются дефекты в виде повреждений и трещин [1–3]. Поверхностный слой испытывает трение при контакте с ответной деталью и подвергается износу, испытывает коррозионное и эрозийное воздействия, контактное давление и др. В этой связи для повышения качества поверхностного слоя дополнительно применяют отделочно-упрочняющую обработку поверхностным пластическим деформированием (ППД), которая позволяет не только сгладить острые микровыступы после механической обработки, но и повысить прочность металла, а также сформировать сжимающие остаточные напряжения, которые оказывают благоприятное влияние на эксплуатационные характеристики деталей машин [4–6].

В настоящее время разработано большое количество разнообразных способов ППД для решения конкретных производственных задач, но для упрочнения цилиндрических деталей типа валов и осей малой жесткости остались проблемы, требующие решения. Проблемы связаны с тем, что при обработке нежестких деталей легко искажается их форма под действием радиальной нагрузки от деформирующего инструмента, что не позволяет получить не только стабильные диаметральные размеры, но и стабильные физико-механические свойства по длине заготовки.

Проблему можно существенно уменьшить, если усилить напряженное состояние в очаге деформации, не повышая при этом величину радиального натяга. Авторами статьи разработан новый способ упрочнения,

получивший название «реверсивное ППД» [7]. Способ позволяет не только повышать напряженное состояние в очаге упругопластической деформации, но и уменьшить величину зерна в поверхностном слое, что оказывает благоприятное влияние на эксплуатационные свойства деталей машин, работающих в условиях пониженных температур.

Цель данной работы заключается в определении влияния основных технологических параметров реверсивного ППД на напряженное состояние в очаге упругопластической деформации, остаточные напряжения в упрочненных деталях и глубину пластического слоя.

Способ реверсивного поверхностного пластического деформирования. Новый способ ППД поясняется на рис. 1, где показана конструкция рабочего инструмента, реализующего предлагаемый способ реверсивного поверхностного пластического деформирования цилиндрической заготовки.

Особенность данного способа заключается в том, что рабочий тороидальный инструмент выполнен в виде двух деформирующих роликов, расположенных перпендикулярно направлению продольной подачи, при этом ось вращения рабочего инструмента расположена перпендикулярно оси заготовки, а рабочему инструменту сообщают реверсивное вращение относительно оси, проходящей через плоскость, соединяющую два деформирующих ролика и перпендикулярную ось заготовки с амплитудой угла $\pm\alpha_p$ (рис. 1).

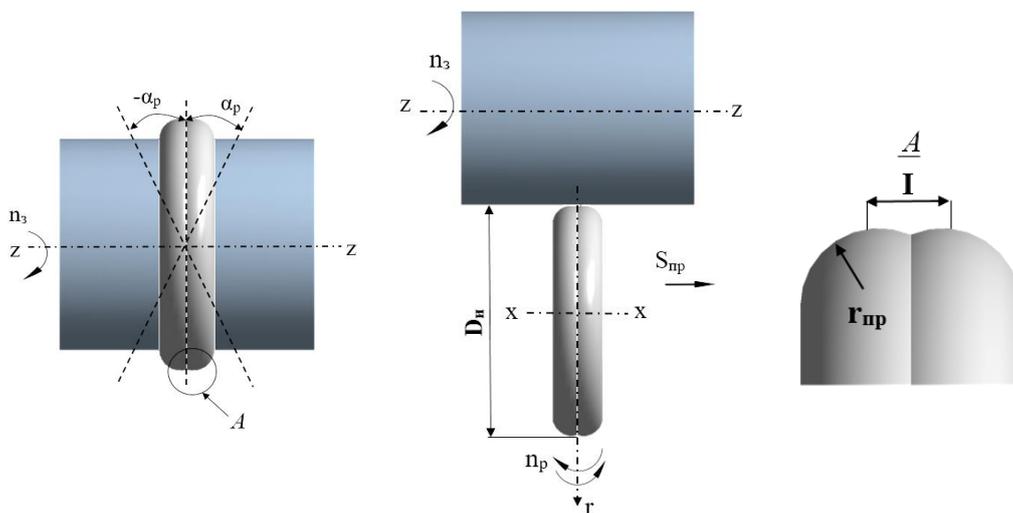


Рис. 1. Схема реверсивного поверхностного пластического деформирования двухрадиусным роликом

Рабочий инструмент (рис. 1) выполнен в виде двух деформирующих роликов, вершины которых располагаются относительно друг друга на расстоянии I . Как видно на схеме обработки (рис. 1), параметрами режима, определяющими кинематику процесса, являются частота вращения заготовки (n_3), продольная подача (S_{np}), реверсивная частота вращения рабочего инструмента (n_p), амплитуда угла реверсивного вращения рабочего инструмента (α_p). Сущность повышения эффективности упрочнения деформации состоит в том, что обработка производится путем целенаправленных

технологических воздействий на структуру металла для увеличения плотности дислокаций и создания дислокационной субструктуры, увеличивающей сопротивление сдвигу.

Конечно-элементное моделирование процесса обработки реверсивным ППД. В настоящее время существуют разнообразные численные методы для расчета напряжений и деформаций, в которых широко и эффективно используется метод конечных элементов (МКЭ) [8; 9]. Метод конечных элементов позволяет решать прочностные задачи, используя

дифференциальные уравнения, создавая сетку с элементами, связанными вместе узлами. В настоящее время в задачах расчета напряжений (локальное напряжение, перемещение, деформации и т. д.) методом конечно-элементного моделирования широко применяют разнообразные программные продукты, среди которых для решения задач, связанных с механикой материалов, весьма успешно используется

программное обеспечение ANSYS [10; 11].

На рис. 2, а показаны главные компоненты тензора напряжений в цилиндрической системе координат: радиальные σ_r , тангенциальные σ_φ и осевые напряжения σ_z и конечно-элементная модель (рис. 2, б) при реверсивном ППД двухрадиусным роликом.

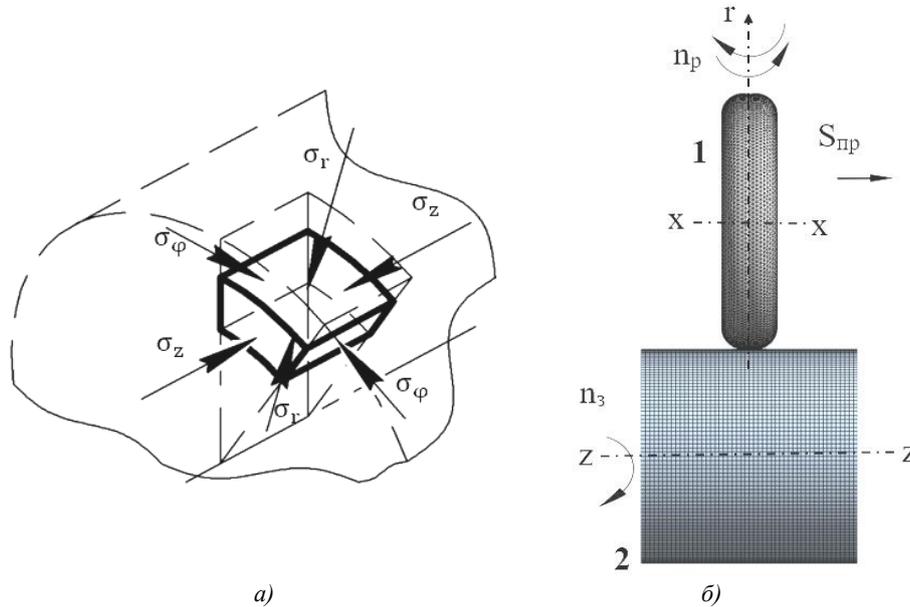


Рис. 2. Главные компоненты тензора напряжений в цилиндрической системе координат (а) и конечно-элементная модель при реверсивном ППД двухрадиусным роликом (б): 1 — двухрадиусный ролик; 2 — цилиндрический образец

Для исследования влияния основных параметров реверсивного ППД и физико-механических свойств материала на напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя цилиндрических деталей рассмотрены три технологических параметра — частота вращения заготовки (n_3), продольная подача рабочего инструмента ($S_{пр}$), натяг (t) и примеры разных марок материалов — конструкционная углеродистая сталь 45; конструкционная среднелегированная сталь 30ХГСА; титановый сплав ВТ6; нержавеющая сталь 08Х18Н10; конструкционная углеродистая сталь 20; медный сплав Л90. Для проведения расчетов по определению НДС процесса приняты следующие параметры и режимы обработки: тип рабочего инструмента — двухрадиусный ролик со следующими переменными значениями: продольная подача двухрадиусного ролика ($S_{пр} = 0,1...0,5$ мм/об.), частота вращения заготовки ($n_3 = 60...300$ мин⁻¹), натяг ($t = 0,05...0,2$ мм.). Реверсивная частота вращения двухрадиусного ролика ($n_p = 300$ дв.ход./мин), амплитуда угла реверсивного вращения двухрадиусного ролика ($\alpha_p = \pm 45^\circ$). Диаметр ролика $D_n = 30$ мм; профильный радиус

$r_{пр} = 2,5$ мм; материал — твердый сплав ВК8; модуль упругости $E = 6 \cdot 10^5$ МПа; коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$; коэффициент трения в зоне контакта рабочего инструмента с поверхностью цилиндра $f = 0,1$.

Характеристики заготовки. В качестве заготовки был использован цилиндр диаметром $D_3 = 20$ мм; материал сталь 45 — упругопластический, упрочняющийся; модуль упругости $E = 2 \cdot 10^5$ МПа; коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$; диаграмма деформирования материала — билинейная (предел текучести $\sigma_T = 360$ МПа, модуль упрочнения $E_T = 6,8 \cdot 10^3$ МПа).

Для оценки напряженного состояния в разных точках цилиндрического образца с учетом главных компонент тензора напряжений определена интенсивность временных и остаточных напряжений по осям Oz (осевые $\sigma_z^{ост}$), Or (радиальные $\sigma_r^{ост}$), Oφ (тангенциальные $\sigma_\varphi^{ост}$). При этом интенсивность остаточных напряжений и интенсивность относительных деформаций по Мизесу ($\sigma_i^{ост}$, ε_i) определяются как [12–14]:

$$\sigma_i^{ост} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot [(\sigma_z^{ост} - \sigma_\varphi^{ост})^2 + (\sigma_\varphi^{ост} - \sigma_r^{ост})^2 + (\sigma_r^{ост} - \sigma_z^{ост})^2]}, \quad (1)$$

где $\sigma_z^{ост}$, $\sigma_r^{ост}$, $\sigma_\varphi^{ост}$ — компоненты остаточных напряжений, действующие по осям Oz, Or, Oφ.

По аналогичной формуле определяется и интенсивность временных напряжений ($\sigma_i^{вп}$):

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_z^{ост} - \varepsilon_\varphi^{ост})^2 + (\varepsilon_\varphi^{ост} - \varepsilon_r^{ост})^2 + (\varepsilon_r^{ост} - \varepsilon_z^{ост})^2}, \quad (2)$$

где $\varepsilon_z^{ост}$, $\varepsilon_r^{ост}$, $\varepsilon_\varphi^{ост}$ — компоненты относительных деформаций, действующие по осям Oz, Or, Oφ.

Базовые режимы упрочнения представлены в табл. 1.

Таблица 1. Базовые режимы реверсивного ППД

D_n (мм)	$r_{пр}$ (мм)	D_s (мм)	n_p (дв.ход./мин)	α_p (град.)	f
30	2,5	20	300	± 45	0,1

Влияние продольной подачи рабочего инструмента. Продольная подача характеризует относительное движение между рабочим инструментом и заготовкой. Величина подачи связана со стойкостью рабочего инструмента, производительностью обработки и качеством упрочненной поверхности [15; 16]. Большая скорость продольной подачи увеличивает производительность обработки, но ухудшает качество поверхности (повышается шероховатость). Малая скорость продольной подачи снижает производительность обработки, но обеспечивает высокое качество поверхности (низкая шероховатость).

На рис. 3 приведены поля распределения интенсивности временных (σ_i^{BP}) и остаточных (σ_i^{OCT}) напряжений по поперечному сечению цилиндрических образцов в зависимости от величины продольной подачи: а) $S_{пр} = 0,1$ мм/об.; б) $S_{пр} = 0,5$ мм/об.

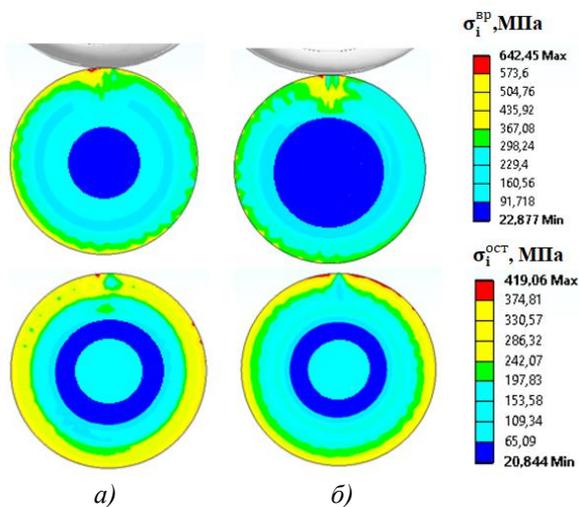


Рис. 3. Поля распределения интенсивности временных (σ_i^{BP}) и остаточных (σ_i^{OCT}) напряжений по поперечному сечению цилиндрических образцов в зависимости от величины продольной подачи: а — $S_{пр} = 0,1$ мм/об.; б — $S_{пр} = 0,5$ мм/об.

Анализ распределения полей интенсивности временных и остаточных напряжений в зависимости от величины продольной подачи показывает, что при $S_{пр} = 0,5$ мм/об. возникает наименьшая, а при $S_{пр} = 0,1$ мм/об. — наибольшая интенсивность временных и остаточных напряжений.

На рис. 4 показано влияние продольной подачи двухрадиусного ролика на максимальную интенсивность временных (σ_i^{BP}) и остаточных (σ_i^{OCT}) напряжений при реверсивном ППД.

напряжений при реверсивном ППД.

Результаты моделирования показали (рис. 4), что чем меньше продольная подача ролика, тем выше интенсивность максимальных временных и остаточных напряжений. При уменьшении продольной подачи ролика от 0,5 до 0,1 мм/об. значения интенсивности максимальных временных и остаточных напряжений увеличиваются соответственно на 36,7 и 26,8 %. Следует отметить, что при $S_{пр} < 0,1$ мм/об. возможно появление перенаклепа, который происходит при многократном нагружении обрабатываемых зон заготовки.

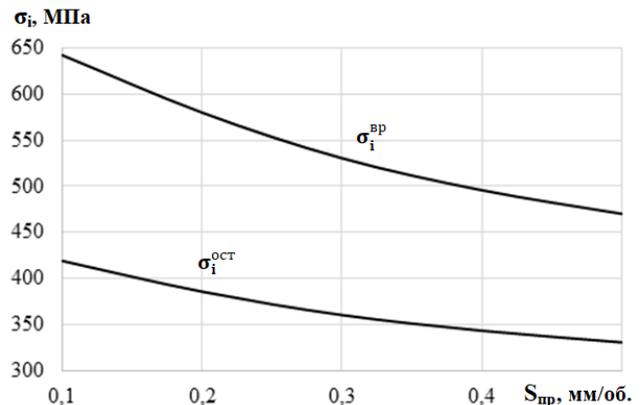


Рис. 4. Влияние продольной подачи двухрадиусного ролика на максимальную интенсивность временных (σ_i^{BP}) и остаточных (σ_i^{OCT}) напряжений при реверсивном ППД

Влияние частоты вращения заготовки. На рис. 5 приведены поля распределения интенсивности временных (σ_i^{BP}) и остаточных (σ_i^{OCT}) напряжений по поперечному сечению цилиндрических образцов в зависимости от частоты вращения заготовки: а) $n_3 = 60$ мин⁻¹; б) $n_3 = 240$ мин⁻¹.

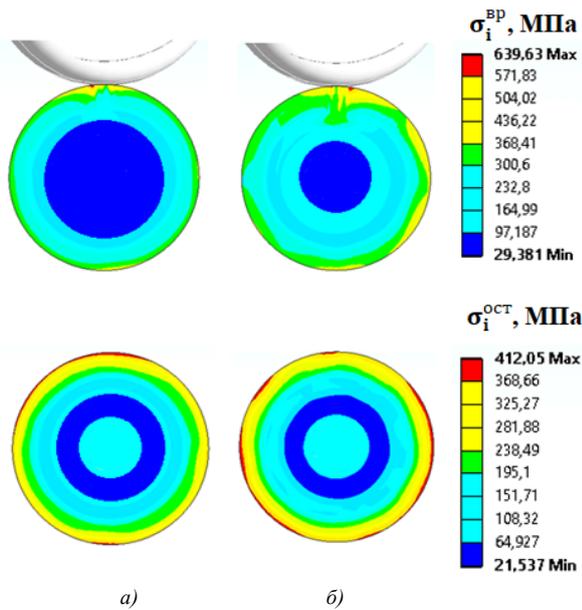


Рис. 5. Поля распределения интенсивности временных (σ_i^{BP}) и остаточных (σ_i^{OCT}) напряжений по поперечному сечению цилиндрических образцов в зависимости от величины вращения заготовки: *a* — $n_3 = 60 \text{ мин}^{-1}$; *б* — $n_3 = 240 \text{ мин}^{-1}$

Анализ распределения полей интенсивности временных и остаточных напряжений в зависимости от частоты вращения заготовки показывает, что при $n_3 = 60 \text{ мин}^{-1}$ возникает наименьшая, а при $n_3 = 240 \text{ мин}^{-1}$ — наибольшая интенсивность временных и остаточных напряжений.

На рис. 6 представлено влияние частоты вращения заготовки на интенсивность временных (σ_i^{BP}) и остаточных (σ_i^{OCT}) напряжений при реверсивном ППД.

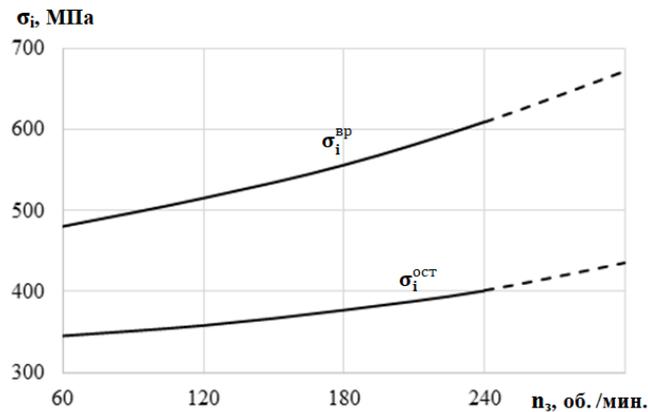


Рис. 6. Влияние частоты вращения заготовки на интенсивность временных (σ_i^{BP}), остаточных (σ_i^{OCT}) напряжений при реверсивном ППД

Результаты моделирования показали (рис. 6), что чем выше частота вращения заготовки, тем выше интенсивность максимальных временных и остаточных напряжений. При увеличении частоты вращения заготовки от 60 до 240 об./мин значения интенсивности максимальных временных и остаточных напряжений увеличиваются соответственно на 26,8 и 16,1 %. Это объясняется тем, что при увеличении частоты вращения заготовки повышается скорость искажения кристаллической структуры материала, что способствует росту дислокаций и повышению прочности поверхностного слоя.

При $n_3 > 240 \text{ об./мин}$ наблюдается весьма существенный рост интенсивности временных напряжений, значение которых превышает предел прочности материала заготовки ($\sigma_s = 650 \text{ МПа}$), и создаются остаточные напряжения, превышающие предел текучести материала ($\sigma_T = 360 \text{ МПа}$). Формирование напряжений такой величины в процессе упрочнения является недопустимым, так как возникают значительные вибрации, при работе заготовки на высоких скоростях снижается качество поверхностного слоя цилиндрических деталей, и возможно разрушение их поверхности.

Влияние величины натяга. Величина радиального натяга непосредственно оказывает влияние на величину нормального давления, которое возникает в плоскости, перпендикулярной оси заготовки в течение всего процесса упрочнения. Выбор оптимальной величины натяга является важным шагом при определении рациональных режимов ППД. При недостаточной величине натяга не обеспечивается степень необходимого деформирования микронеровностей. В результате происходят незначительное смятие вершин микровыступов и неполное заполнение микровпадин профиля микронеровностей. При слишком большой величине натяга происходит полное смятие микронеровностей, а кроме того, происходит внедрение рабочего инструмента в основной материал, что приводит к выдавливанию основного материала и увеличению диаметра обработанной поверхности [17; 18].

На рис. 7 показана зависимость интенсивности временных (σ_i^{BP}), остаточных (σ_i^{OCT}) напряжений от величины натяга (t), а на рис. 8 представлена зависимость максимальных осевых и тангенциальных сжимающих остаточных напряжений (σ_ϕ^{OCT} , σ_z^{OCT}) от величины натяга (t) при реверсивном ППД.

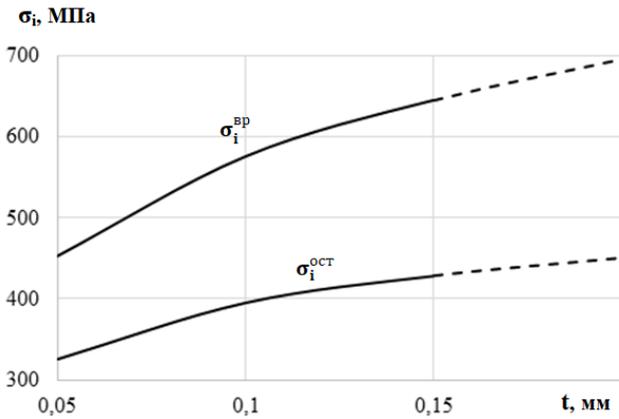


Рис. 7. Влияние величины натяга (t) на интенсивность временных (σ_i^{BP}), остаточных (σ_i^{OCT}) напряжений при реверсивном ППД

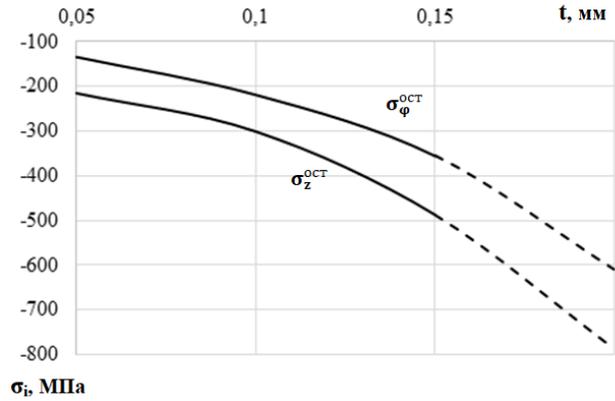


Рис. 8. Зависимость максимальных осевых и тангенциальных остаточных напряжений сжатия (σ_ϕ^{OCT} , σ_z^{OCT}) от величины натяга (t) при реверсивном ППД

Анализируя рис. 7 и 8, можно сделать вывод о том, что с увеличением натяга t от 0,05 до 0,15 мм максимальные значения интенсивности временных, остаточных напряжений увеличиваются на 42,5 и 31,76 %, при этом тангенциальные и осевые сжимающие напряжения повышаются в 2,3 и 2,6 раза.

При натяге $t \geq 0,15$ мм наблюдается весьма существенный рост интенсивности временных напряжений, значение которых намного больше предела прочности материала заготовки ($\sigma_b = 600$ МПа), и формируются большие остаточные

напряжения сжатия, превышающие предела текучести материала ($\sigma_T = 360$ МПа). Формирование таких напряжений при большой величине натяга в процессе упрочнения является недопустимым, так как происходит значительное искажение формы и разрушение поверхности цилиндрических деталей.

Влияние марки материалов. Для определения влияния физико-механических свойств материала на напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя цилиндрических деталей при реверсивном ППД выполнены расчеты для некоторых черных и цветных металлов (рис. 9).

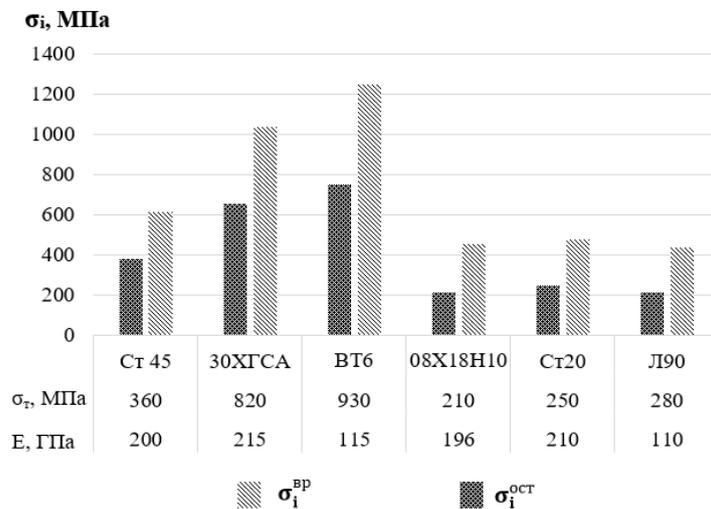


Рис. 9. Влияние марки материалов на интенсивность временных (σ_i^{BP}), остаточных (σ_i^{OCT}) напряжений при реверсивном ППД

На рис. 9 видно, что физико-механические свойства металла значительно влияют на напряженно-деформирующее состояние поверхностного слоя цилиндрических образцов при реверсивном ППД. Максимальные интенсивности временных и остаточных напряжений наблюдаются у материалов, имеющих высокий предел текучести (конструкционная среднелегированная сталь 30ХГСА и титановый сплав ВТ6). Установлено, что чем выше предел текучести материала, тем выше интенсивность напряжений. Максимальная интенсивность напряжений

формируется при обработке титанового сплава ВТ6, минимальная — при упрочнении нержавеющей стали 08Х18Н10.

Глубина пластической деформации. При обработке металлов давлением создаются пластические зоны, различные как по форме, так и по размерам, которые оказывают существенное влияние как на степень упрочнения, так и на разрушение металлических материалов, а также на сопротивление развитию трещин. Глубина пластической деформации является важным параметром при оценке физико-

механических и эксплуатационных свойств упрочненных деталей ППД [19; 20]. На рис. 10 показаны результаты определения интенсивности относительной

деформации после реверсивного ППД двухрадиусным роликом (при $S_{пр} = 0,1$ мм/об., $n_3 = 120$ мин⁻¹, $t = 0,1$ мм).

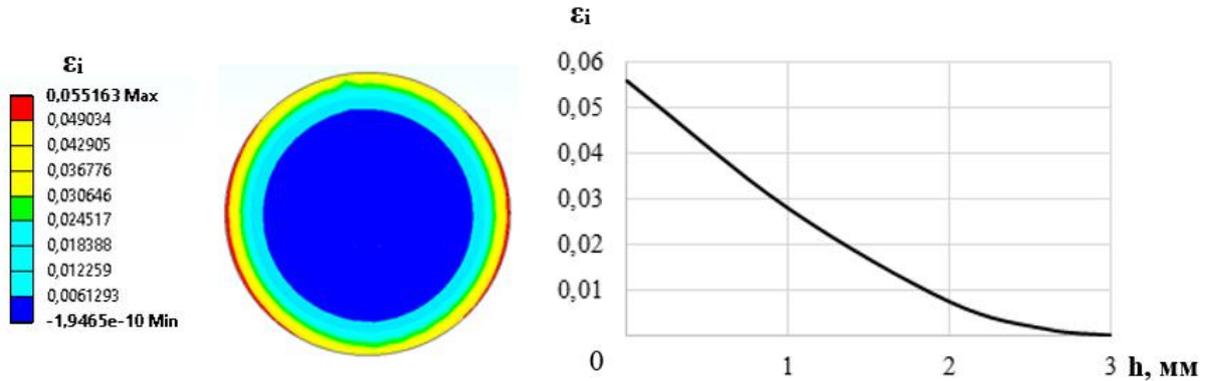


Рис. 10. Поля распределения пластической деформации в поперечном сечении образца и кривая распределения относительной деформации после реверсивного ППД двухрадиусным роликом (при $S_{пр} = 0,1$ мм/об., $n_3 = 120$ мин⁻¹, $t = 0,1$ мм)

На рис. 10 видно, что при реверсивном вращении двухрадиусного ролика (при $S_{пр} = 0,1$ мм/об., $n_3 = 120$ мин⁻¹, $t = 0,1$ мм) максимальная величина пластической деформации достигает своего значения в зоне контакта цилиндра с рабочим инструментом. В слое толщиной $h > 2,6$ мм величина пластической деформации близка к

нулю. Таким образом, зона пластической деформации при нагружении двухрадиусным роликом с принятыми режимами обработки находится в интервале $0 \leq h \leq 2,6$ мм. На рис. 11 и 12 показано влияние основных параметров реверсивного ППД и физико-механических свойств материала на глубину пластического слоя.

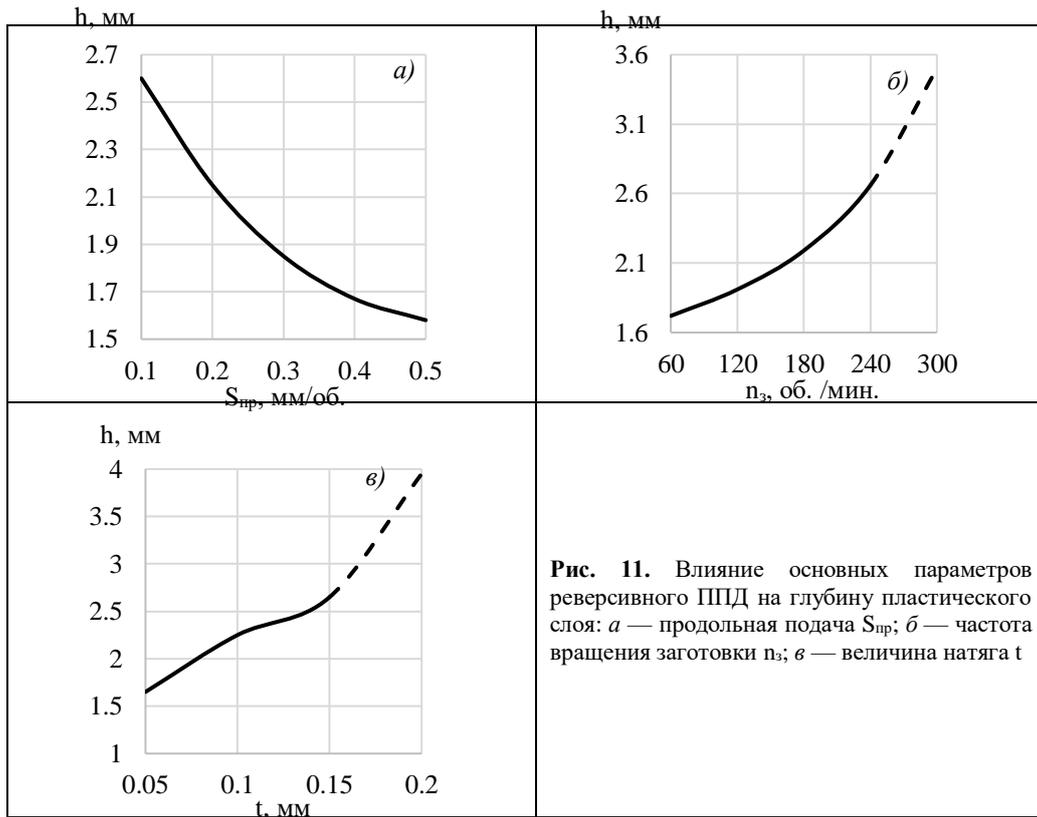


Рис. 11. Влияние основных параметров реверсивного ППД на глубину пластического слоя: а — продольная подача $S_{пр}$; б — частота вращения заготовки n_3 ; в — величина натяга t

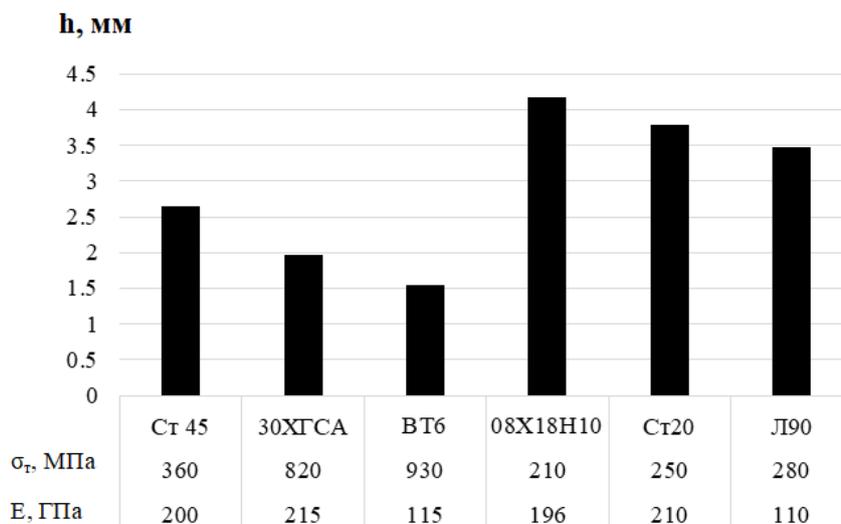


Рис. 12. Влияние марки материалов на глубину пластического слоя при реверсивном ППД

Анализ рис. 11 показывает, что глубина пластического слоя изменяется практически обратно пропорционально увеличению продольной подачи ролика и пропорционально увеличению частоты вращения заготовки и величины натяга. При уменьшении продольной подачи ролика от 0,5 до 0,1 мм/об. глубина пластической деформации увеличивается на 64,6 %. При увеличении частоты вращения заготовки от 60 до 240 об./мин и величины натяга от 0,05 до 0,15 мм глубина пластической деформации увеличивается на 54,7 и 60,6 %. На рис. 12 видно, что при одинаковых условиях упрочнения чем меньше предел текучести материала, тем выше глубина пластической деформации. Максимальная глубина пластической деформации возникает при упрочнении нержавеющей сталей 08Х18Н10, а минимальная — при обработке титанового сплава ВТ6.

Таким образом, результаты исследования показали, что основные параметры реверсивного ППД и физико-механические свойства материала значительно влияют на напряженно-деформированное состояние и глубину пластической деформации цилиндрических деталей. Для интенсификации напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя рекомендуется назначать рациональные режимы обработки реверсивным ППД: продольная подача ролика 0,1...0,15

мм/об., частота вращения заготовки 180...240 об./мин. и величина натяга 0,1...0,15 мм.

Выводы

1. При уменьшении продольной подачи ролика от 0,5 до 0,1 мм/об. значения интенсивности максимальных временных и остаточных напряжений увеличиваются соответственно на 36,7 и 26,8 %, а глубина пластической деформации увеличивается при этом на 64,6 %.

2. При увеличении частоты вращения заготовки от 60 до 240 об./мин значения интенсивности максимальных временных и остаточных напряжений увеличиваются соответственно на 26,8 и 16,1 %, а глубина пластической деформации увеличивается при этом на 54,7 %.

3. При увеличении натяга t от 0,05 до 0,15 мм максимальные значения интенсивности временных, остаточных напряжений увеличиваются на 42,5 и 31,76 %, при этом тангенциальные и осевые сжимающие напряжения повышаются в 2,3 и 2,6 раза, а глубина пластической деформации увеличивается на 60,6 %.

4. Результаты моделирования показали, что физико-механические свойства материала значительно влияют на напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя деталей при реверсивном ППД. Большие напряжения возникают при упрочнении материала с большим предел текучести и наоборот.

Литература

1. Смелянский В.М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 2002. 299 с.
2. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 1987. 328 с.
3. Сулов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. М.: Машиностроение, 2000. 320 с.
4. Алексеев П.Г. Повышение износостойкости стальных деталей путем поверхностного упрочнения // Станки и инструмент. 1968. № 1. С. 7-9.
5. Бабичев А.П., Попов М.Е. Поиск новых технологических методов повышения прочности коленчатых валов двигателей // Вестн. ДГТУ. 2015. № 1. С. 49-54.
6. Зайдес С.А. Охватывающее деформационное упрочнение мало жестких валов // Упрочняющие технологии и покрытия. 2008. № 2. С. 3-6.
7. Зайдес С.А., Нгуен Хью Хай. Способ поверхностного пластического деформирования наружных поверхностей тел вращения: пат. RU № 2758713, МПК В24В 39/04; заявл. 14.01.2021; опубл. 01.11.2021.
8. Shashank Vadlamani, Arun C.O. A stochastic B-spline wavelet on the interval finite element method for problems in elasto-statics. Probabilistic Engineering Mechanics Vol. 58, October 2019, 102996. URL: <https://doi.org/10.1016/j.probengmech.2019.102996> (дата обращения: 14.09.2022).
9. Limab C.W., Islamc M.Z., Zhanga G. A nonlocal finite element method for torsional statics and dynamics of circular nanostructures // International Journal of Mechanical Sciences. 2015. V. 94-95, May. P. 232-243.

10. Lindgaard E., Bak B.L.V., Glud J.A., Sjølund J., Christensen E.T. A user programmed cohesive zone finite element for ANSYS Mechanical. *Engineering Fracture Mechanics*. 2017. V. 180, July. P. 229-239. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.05.026> (дата обращения: 14.09.2022).
11. Mohanavela V., Prasathb S., Arunkumarc M., Pradeepd G.M., Surendra Babue S. Modeling and stress analysis of aluminium alloy based composite pressure vessel through ANSYS software. *Materialstoday: Proceedings*. 2021. V. 37, Part 2. P. 1911-1916. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.472> (дата обращения: 14.09.2022).
12. Yuan-Zuo Wanga, Guo-Qiang Lib, Yan-Bo Wanga, Yi-Fan Lyuc. Simplified method to identify full von Mises stress-strain curve of structural metals // *Journal of Constructional Steel Research*. 2021. V. 181, June. P. 106624. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.106624> (дата обращения: 14.09.2022).
13. Filipe Meirelles Fonseca, Paulo Batista Gonçalves. Nonlinear behavior and instabilities of a hyperelastic von Mises truss // *International Journal of Non-Linear Mechanics*. 2022. V. 142, June. P. 103964. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2022.103964> (дата обращения: 14.09.2022).
14. Bontea M.H.A., de Boera A., Liebrechts R. Determining the von Mises stress power spectral density for frequency domain fatigue analysis including out-of-phase stress components // *Journal of Sound and Vibration*. 2007. V. 302, iss. 1-2, 17 April. P. 379-386. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2006.11.025> (дата обращения: 14.09.2022).
15. Зайдес С.А., Нго Као Кыонг. Повышение напряженного состояния в очаге деформации при поверхностном пластическом деформировании цилиндрических деталей // *Изв. высш. учеб. заведений. Машиностроение*. 2017. № 5. С. 52-59.
16. Зайдес С.А., Бобровский И.Н., Фам Ван Ань. Влияние кинематики локального деформирования на напряженное состояние поверхностного слоя // *Научные технологии в машиностроении*. 2019. № 5. С. 32-38.
17. Копылов Ю.Р. Формирование шероховатости, остаточных напряжений и наклепа в проточных каналах центробежного колеса турбины // *Инженерный журнал. Справочник*. 2013. № 12. С. 17-21.
18. Зайдес С.А., Горбунов А.В. Определение механических свойств поверхностного слоя маложестких валов, упрочненных поверхностным пластическим деформированием // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2015. № 3. С. 15-19.
19. Губанов В.Ф. Параметры качества поверхностного слоя при выглаживании специальным инструментом с минералокерамическими инденторами // *Технология машиностроения*. 2009. № 6. С. 15-17.
20. Кузнецов В.П. Формирование высококачественных поверхностей деталей из коррозионностойкой стали выглаживанием специальным инструментом с узлом динамической стабилизации на токарно-фрезерном центре // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2011. № 8. С. 3-15.
5. Babichev A.P., Popov M.E. Search for new technological methods for increasing the strength of engine crankshafts // *Vestnik of Don State Technical University*. 2015. № 1. P. 49-54.
6. Zajdes S.A. Enveloping strain hardening of low-rigid shafts // *Strengthening Technologies and Coatings*. 2008. № 2. P. 3-6.
7. Zajdes S.A., Nguen Hyu Haj. Method for surface plastic deformation of the outer surfaces of bodies of revolution: pat. RU № 2758713, MPK V24V 39/04; заявл. 14.01.2021; опubl. 01.11.2021.
8. Shashank Vadlamani, Arun C.O. A stochastic B-spline wavelet on the interval finite element method for problems in elasto-statics. *Probabilistic Engineering Mechanics* Vol. 58, October 2019, 102996. URL: <https://doi.org/10.1016/j.probenmech.2019.102996> (дата обращения: 14.09.2022).
9. Limab C.W., Islamc M.Z., Zhanga G. A nonlocal finite element method for torsional statics and dynamics of circular nanostructures // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2015. V. 94-95, May. P. 232-243.
10. Lindgaard E., Bak B.L.V., Glud J.A., Sjølund J., Christensen E.T. A user programmed cohesive zone finite element for ANSYS Mechanical. *Engineering Fracture Mechanics*. 2017. V. 180, July. P. 229-239. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.05.026> (дата обращения: 14.09.2022).
11. Mohanavela V., Prasathb S., Arunkumarc M., Pradeepd G.M., Surendra Babue S. Modeling and stress analysis of aluminium alloy based composite pressure vessel through ANSYS software. *Materialstoday: Proceedings*. 2021. V. 37, Part 2. P. 1911-1916. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.472> (дата обращения: 14.09.2022).
12. Yuan-Zuo Wanga, Guo-Qiang Lib, Yan-Bo Wanga, Yi-Fan Lyuc. Simplified method to identify full von Mises stress-strain curve of structural metals // *Journal of Constructional Steel Research*. 2021. V. 181, June. R. 106624. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.106624> (дата обращения: 14.09.2022).
13. Filipe Meirelles Fonseca, Paulo Batista Gonçalves. Nonlinear behavior and instabilities of a hyperelastic von Mises truss // *International Journal of Non-Linear Mechanics*. 2022. V. 142, June. P. 103964. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2022.103964> (дата обращения: 14.09.2022).
14. Bontea M.H.A., de Boera A., Liebrechts R. Determining the von Mises stress power spectral density for frequency domain fatigue analysis including out-of-phase stress components // *Journal of Sound and Vibration*. 2007. V. 302, iss. 1-2, 17 April. P. 379-386. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2006.11.025> (дата обращения: 14.09.2022).
15. Zajdes S.A., Ngo Kao Kyong. Increasing the stress state in the deformation zone during surface plastic deformation of cylindrical parts // *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*. 2017. № 5. P. 52-59.
16. Zajdes S.A., Bobrovskij I.N., Fam Van An'. Influence of the kinematics of local deformation on the stress state of the surface layer // *Science intensive technologies in mechanical engineering*. 2019. № 5. P. 32-38.
17. Kopylov YU.R. Handbook. An Engineering Journal // *Handbook. An Engineering Journal*. 2013. № 12. P. 17-21.
18. Zajdes S.A., Gorbunov A.V. Determination of the mechanical properties of the surface layer of low-rigid shafts hardened by surface plastic deformation // *Strengthening Technologies and Coatings*. 2015. № 3. P. 15-19.
19. Gubanov V.F. Quality parameters of the surface layer during burnishing with a special tool with mineral-ceramic indenters // *Tekhnologiya mashinostroeniya*. 2009. № 6. P. 15-17.
20. Kuznecov V.P. Formation of high-quality surfaces of parts from corrosion-resistant steel by burnishing with a special tool with a dynamic stabilization unit at a turning-milling center // *Strengthening Technologies and Coatings*. 2011. № 8. P. 3-15.

References

1. Smelyanskij V.M. *Mechanics of hardening of parts by surface plastic deformation*. M.: Mashinostroenie, 2002. 299 p.
2. Odincov L.G. *Hardening and finishing of parts by surface plastic deformation*. M.: Mashinostroenie, 1987. 328 p.
3. Suslov A.G. *The quality of the surface layer of machine parts*. M.: Mashinostroenie, 2000. 320 p.
4. Alekseev P.G. Improving the wear resistance of steel parts by surface hardening // *Stanki i instrument*. 1968. № 1. P. 7-9.