Зайдес, С.А. Напряженно-деформированное состояние цилиндрических деталей при упрочнении плоскими клиновыми плитами / С.А. Зайдес, Буй Мань Зунг. – DOI: 10.15593/perm.mech/2025.4.05 // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2025. – № 4. – С. 61–71.

Perm Polytech Style: Zaides S.A., Dung Bui Manh Stress-Strain State of cylindrical parts when strengthened by flat wedge plates. *PNRPU Mechanics Bulletin,* 2025, no. 4, pp. 61-71. DOI: 10.15593/perm.mech/2025.4.05

пермский политех

ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА
№ 4, 2025
PNRPU MECHANICS BULLETIN
https://ered.pstu.ru/index.php/mechanics/index



Научная статья

DOI: 10.15593/perm.mech/2025.4.05
УДК 621.787.4

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ ПРИ УПРОЧНЕНИИ ПЛОСКИМИ КЛИНОВЫМИ ПЛИТАМИ

С.А. Зайдес, Буй Мань Зунг

Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Российская Федерация

О СТАТЬЕ

Получена: 26 апреля 2025 г.
Одобрена: 22 сентября 2025 г.
Принята к публикации:
25 сентября 2025 г.

Ключевые слова:

напряженно-деформированное состояние, нежесткие цилиндрические детали, плоская клиновая плита, остаточное напряжение, упрочнение, моделирование, относительное обжатие, поверхностное пластическое деформирование.

АННОТАЦИЯ

Повышение качества поверхностного слоя деталей является актуальной задачей современного машиностроения, от эффективного решения которой зависит надежность работы изделий. Формирование благоприятного напряженно-деформированного состояния в поверхностных слоях позволяет повысить износостойкость, усталостную прочность и эксплуатационные характеристики деталей машин. На сегодняшний день существуют различные методы упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием, среди которых можно выделить накатывание, обкатку роликами, ультразвуковую обработку и т.д. Выбор конкретного способа зависит от назначения детали, ее геометрии и требований к эксплуатационным характеристикам. Особые технологические проблемы возникают при обработке цилиндрических деталей малых диаметров типа осей, силовых шпилек, валиков, которые легко изгибаются. Для нежестких деталей, характеризующихся отношением длины к диаметру более 15, разработан способ упрочнения с использованием плоских клиновых плит. Данный метод представлен и исследован в настоящей работе. Цель работы заключается в оценке напряженно-деформированного состояния в очаге деформации и остаточных напряжений в упрочненных цилиндрических деталях в зависимости от геометрической формы рабочего инструмента и основных параметров процесса упрочнения плоскими клиновыми плитами. Методом исследования служит моделирование в программной среде ANSYS Workbench с учетом билинейной диаграммы деформирования материала образца. Проведены численные эксперименты при различных углах клинового участка β (от 30° до 90°) и степенях относительного обжатия *Q* (от 0,5 до 4 %), что позволило определить закономерности распределения временных и остаточных напряжений, а также интенсивности пластической деформации как по длине, так и по радиусу заготовки. Установлено, что угол β клинового участка плоских плит, равный 45°, является наиболее рациональным, так как обеспечивает равномерное распределение остаточных напряжений, предотвращает локальные перегрузки и способствует упрочнению без повреждений поверхностного слоя. Рекомендуемая величина относительного обжатия при упрочнении плоскими клиновыми плитами должна находиться в интервале *Q* = (1,3–1,5) %.

© **Зайдес Семен Азикович** – д. т. н., проф. кафедры материаловедения, сварочных и аддитивных технологий, e-mail: zsa@istu.edu.
Буй Мань Зунг – аспирант кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств, e-mail: manhdungbuik52@gmail.com.

Semen A. Zaides – Doctor of Technical Sciences, Professor Department of Materials Science, Welding and Additive Technology, e-mail: zsa@istu.edu.
Bui Manh Dung – postgraduate student, Department of Technology and Equipment for Machine-Building Production, e-mail: manhdungbuik52@gmail.com.

Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

STRESS-STRAIN STATE OF CYLINDRICAL PARTS WHEN STRENGTHENED BY FLAT WEDGE PLATES

S.A. Zaides, Bui Manh Dung

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 26 April 2025
Approved: 22 September 2025
Accepted for publication:
25 September 2025

Keywords:

stress-strain state, non-rigid cylindrical part, flat wedge plate, residual stress, hardening, modeling, relative compression, surface plastic deformation.

ABSTRACT

Methods of improving the quality of surface layers can make major contributions in mechanical engineering by increasing reliability of products. Formation of a favorable stress-strain state in the surface layers allows us to increase wear resistance, fatigue strength and performance characteristics of machine parts. Today, there are various methods of strengthening parts by surface plastic deformation, e.g. rolling, roller running, ultrasonic treatment, etc. The choice of a specific method depends on the purpose of each part, its geometry and requirements for performance characteristics. Special technological problems arise when processing cylindrical parts of small diameters such as axles, power studs, rollers, which are easily bent. For non-rigid parts characterized by a length-to-diameter ratio of more than 15, a strengthening method using flat wedge plates has been developed. This method is presented and studied in this paper. It aims at evaluating the stress-strain state in the deformation zone and residual stresses in hardened cylindrical parts depending on the geometric shape of the working tool and the main parameters of the hardening process with flat wedge plates. The research method suggests modeling in the ANSYS Workbench software environment taking into account the bilinear diagram of the sample material deformation. Numerical experiments were carried out at different angles of the wedge section β (from 30° to 90°) and degrees of relative compression *Q* (from 0.5 to 4%), which made it possible to determine the patterns of distribution of temporary and residual stresses, as well as the intensity of plastic deformation both along the length and radius of the workpiece. It was found that the angle β of the wedge section of flat plates equal to 45° is the most rational, since it ensures a uniform distribution of residual stresses, prevents local overloads and promotes hardening without damaging the surface layer. The recommended value of relative compression during strengthening with flat wedge plates is to be in the range *Q* = (1.3–1.5) %.

Введение

Цилиндрические нежесткие детали имеют широкое применение в машиностроении в качестве валов, осей, штоков, штанг и др. [1–4]. Они во многом определяют ресурс машин и механизмов. Обычно нежесткие детали сложны в изготовлении, так как не выдерживают больших силовых и термических нагрузок. Но, самое главное, в процессе эксплуатации они теряют свою первоначальную форму под действием даже незначительных усилий [5–8].

Упрочняющая обработка является одним из ключевых методов повышения эксплуатационной надежности и долговечности деталей машин [9; 10]. В машиностроении широко используются различные технологии обработки, направленные на увеличение поверхностной твердости и улучшение механических характеристик материалов. Одним из перспективных методов является упрочнение цилиндрических деталей с применением поверхностного пластического деформирования (ППД), которое позволяет формировать благоприятное напряженно-деформированное состояние (НДС) в поверхностном слое деталей [11–15].

В последнее время в научном сообществе наблюдается заметный всплеск интереса к методам повышения поверхностной прочности деталей машин и оборудования. Поиск методов поверхностного упрочнения основан на возможности значительного продления срока службы и повышения эксплуатационных свойств изделий машиностроения [16–18]. Известны такие новые способы упрочнения, как обработка мультирадиусным роликом [19], применение ультразвуковой обработки [20] или упрочнение с использованием сложной кинематики рабочего инструмента, например, реверсивное выглаживание [21] или маятниковое упрочнение [22]. Эти способы имеют определенные достоинства, но исключают возможность упрочнения заготовок весьма малых диаметральных размеров и малой жесткости.

В Иркутском национальном исследовательском техническом университете разрабатываются новые способы и устройства для правки и упрочнения нежестких цилиндрических деталей типа валов и осей [23]. Разработанные способы основаны на обкатке деталей плоскими плитами. Плоскообкатные станы обладают рядом преимуществ: простота изготовления и невысокая стоимость рабочего инструмента, стабильное положение детали на плоскости инструмента, высокая стойкость рабочего инструмента [24; 25]. Способ правки и упрочнения в одной технологической операции, техническая новизна которого подтверждена патентом РФ на изобретение [26], предназначен в основном для обработки нежестких цилиндрических деталей из пластичных металлов и сплавов. Так как рабочий инструмент выполнен в виде плоских клиновых плит, то можно выправлять цилиндрические детали, искривленные в разных плоскостях, и упрочнять даже весьма тонкие цилиндрические детали типа валов и осей.

Цель работы – оценка напряженно-деформированного состояния в очаге деформации и остаточных

напряжений в упрочненных цилиндрических деталях в зависимости от геометрической формы рабочего инструмента и основных параметров процесса упрочнения плоскими клиновыми плитами.

Схема упрочнения цилиндрических деталей плоскими клиновыми плитами и исходные данные для моделирования процесса

Схема процесса упрочнения нежестких цилиндрических деталей плоскими клиновыми плитами, а также геометрическая форма плоских плит представлены на рис. 1.

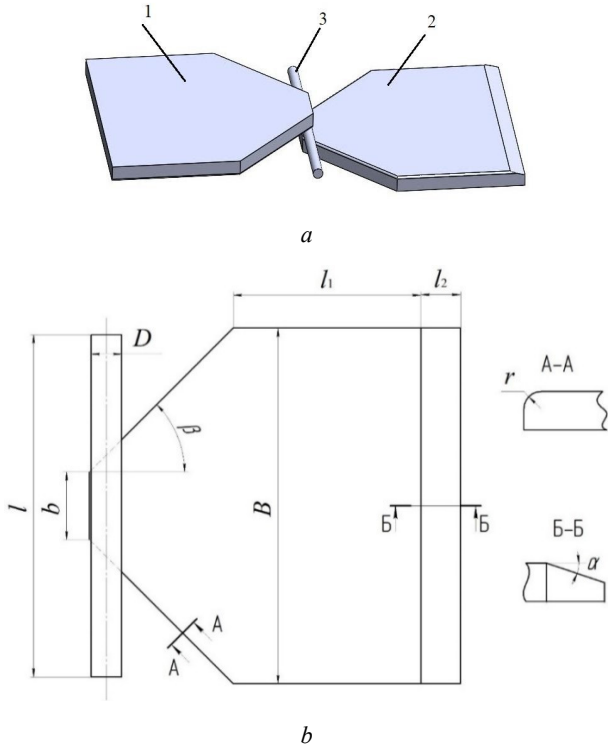


Рис. 1. Схема процесса упрочнения цилиндрической заготовки на плоских клиновых плитах (*a*) и геометрическая форма плиты (*b*): *1* – верхняя плита, *2* – нижняя плита, *3* – цилиндрическая заготовка

Fig. 1. Scheme of hardening a cylindrical workpiece on flat wedge plates (*a*) and the geometric shape of the plate (*b*): *1* – upper plate, *2* – lower plate, *3* – cylindrical workpiece

Процесс упрочнения происходит следующим образом: цилиндрическая заготовка диаметром D и длиной l мм расположена первоначально на участке плиты ширины b с углом развала клинового участка β. Ширина плит B принята равной l+20 мм для обеспечения обработки заготовки по всей длине. За счет горизонтального перемещения верхней плиты и вертикального обжатия заготовка переходит на калибрующий участок длиной l_1, где происходит выравнивание напряжений по длине цилиндра и после этого заготовка перемещается на выходной участок длиной l_2 с углом спуска α. Для снижения концентрации напряжений в концевых участках заготовки на клиновом участке и по краям плит выполнены скругления с радиусом r.

Для исследования напряженно-деформированного состояния в очаге деформации цилиндрических деталей был использован метод конечных элементов (МКЭ), который позволяет численно определить максимальную интенсивность рабочих и остаточных напряжений и интенсивность пластической деформации. Применение численного моделирования является удобным методом и дает возможность выявить оптимальные параметры обработки без проведения дорогостоящих экспериментальных испытаний, а также предсказать потенциальные дефекты, возникающие при упрочнении таких деталей [27; 28].

Исследование проведено в программном комплексе инженерного анализа ANSYS Workbench при использовании модуля *Transient structural*. Конечно-элементная модель процесса упрочнения цилиндрической детали плоскими клиновыми плитами показана на рис. 2.

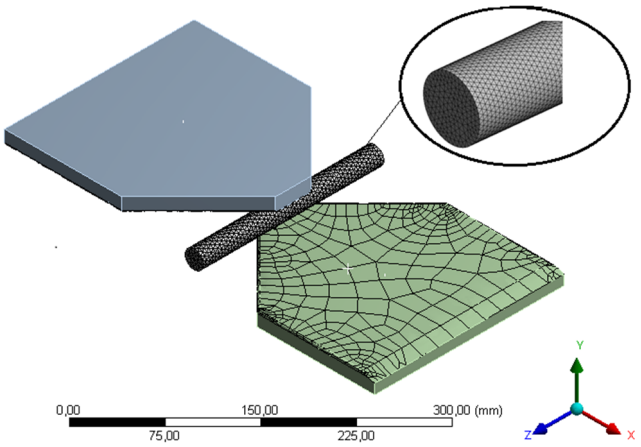


Рис. 2. Конечно-элементная модель процесса упрочнения цилиндрической заготовки на клиновых плоских плитах

Fig. 2. Finite element model of hardening of a cylindrical workpiece on wedge flat plates

При моделировании исходные механические характеристики были заданы следующими параметрами: материал заготовки – углеродистая конструкционная сталь Ст.3 (упругопластический, модуль Юнга $E = 1{,}8 \cdot 10^5$ МПа; коэффициент Пуассона μ = 0,3; диаграмма деформирования материала – билинейная, предел текучести $\sigma_т = 255$ МПа, предел прочности $\sigma_в$ = 480 МПа, модуль упрочнения $E_т = 1{,}45 \cdot 10^3$ МПа). Геометрические параметры цилиндрической заготовки следующие: диаметр D = 10 мм, длина l = 200 мм. Материалом для плоских клиновых плит служила конструкционная сталь высокой прочности и жесткости. При моделировании рабочий инструмент принят как абсолютно жесткое тело. В расчетной схеме нижняя плита была задана жестко закреплена, верхняя плита задана перемещения по вертикальному и горизонтальному направлениям (осям X и Y). Для заготовки были заданы свободные перемещения по осям X и Y и возможность вращения вокруг оси Z. Коэффициент трения качения для пары «сталь–сталь» в зоне контакта цилиндрической заготовки с плитами $f = 0{,}05$. С учетом механического взаимодействия заготовки из стали

с абсолютно жестким телом приняты конечные элементы тетраэдрического типа. Сетка использована с постоянным размером (в данном исследовании 0,5 мм) и одного типа по всему объему заготовки. Скорость движения верхней плиты выбрана 10 мм/с и величина относительного обжатия Q составляет 1 %.

Выбор и обоснование основных параметров геометрической формы плоских клиновых плит

Основными геометрическими параметрами плоской плиты является угол клина β, начальная ширина b клинового участка и длина калибрующего участка l_1 (см. рис. 1). Правильный выбор геометрии инструмента позволяет получить благоприятное напряженно-деформированное состояние и впоследствии повышение качества упрочненного слоя детали. В соответствии с предыдущими работами [29; 30] принято значение b = 40 мм для обеспечения условия захвата и упрочнения заготовки на клиновом участке.

Для оценки напряженно-деформированного состояния в разных точках цилиндрического образца определены интенсивность временных и остаточных напряжений σ_i, интенсивность относительной деформации с учетом главных компонент тензора напряжений и тензора деформаций по осям координат [31; 32].

На рис. 3 показано распределение интенсивности временных напряжений и его компонентов тензора по радиусу в разных поперечных сечениях цилиндра в конце клинового участка при величине угла β, равного 45°.

Из рис. 3 следует, что в конце клинового участка в разных поперечных сечениях заготовки распределения интенсивности и компонентов тензора временных напряжений имеют одинаковый характер, но при этом разные по величине. На поверхности заготовки формируются сжимающие временные напряжения, а в центральной области растягивающие. Наибольшее значение сжимающих радиальных временных напряжений находится в глубине 1 мм от поверхности и достигает величину 260 МПа в центральном сечении и 420 МПа в концевом сечении заготовки. Для оценки влияния угла β клинового участка на напряженно-деформированное состояние цилиндрической заготовки выполнено моделирование с разными значениями β. На рис. 4 показаны максимальные значения интенсивности временных напряжений в разных поперечных сечениях заготовки в конце клинового участка при разных значениях угла β клинового участка.

В процессе моделирования установлено, что в конце клинового участка на концевых областях заготовки интенсивность временных напряжений больше, чем в центральной зоне. Из рис. 4 следует, что максимальное значение интенсивности временных напряжений в концевом сечении заготовки увеличивается при увеличении угла β клинового участка от 30° до 60°. При β = 60° она достигает величину 540 МПа, что превышает предел прочности материала детали, и характеризуется возможным появлением повреждений поверхностного слоя заготовки. При разных вариантах моделирования минимальное значение интенсивности временных напряжений $\sigma_i^{вр}$ наблюдается при упрочнении плоскими прямоугольными плитами (β = 90°). В центральном поперечном сечении заготовки максимальная интенсивность временных напряжений в конце клинового участка практически не меняется при разных углах β, и ее значение варьируется в интервале 250–260 МПа (в районе предела текучести материала). В результате моделирования процесса обкатки заготовки на плоских плитах установлено, что при использовании клиновых плит с углом β=45°, по сравнению с прямоугольными (β=90°), интенсивности временных напряжений в очаге деформации возрастают на 25 %. Это можно объяснить тем, что клиновые плиты формируют очаг деформации, который находится в стесненных условиях за счет недеформируемых концевых участков заготовки. Ранее проведенные исследования [33; 34] показали, что деформация в стесненных условиях происходит при значительно больших напряжениях, чем деформации в свободных условиях.

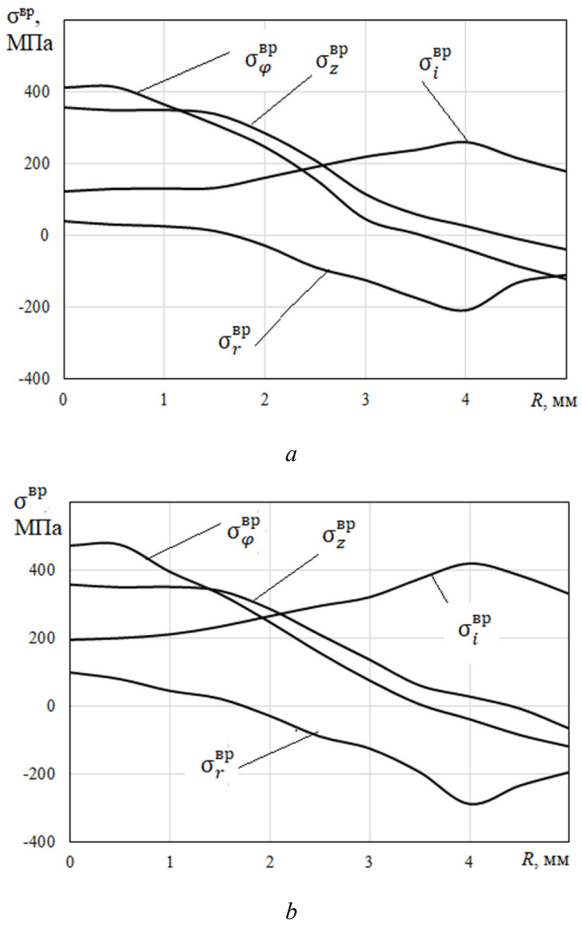


Рис. 3. Распределение интенсивности и компонентов тензора временных напряжений по радиусу цилиндра в конце клинового участка (при β=45°) в центральном поперечном сечении (*a*) и концевом сечении (*b*) заготовки

Fig. 3. Distribution of intensity and components of the time stress tensor along the radius of the cylinder at the end of the wedge section (β=45°) in the central cross-section (*a*) and end section (*b*) of the workpiece

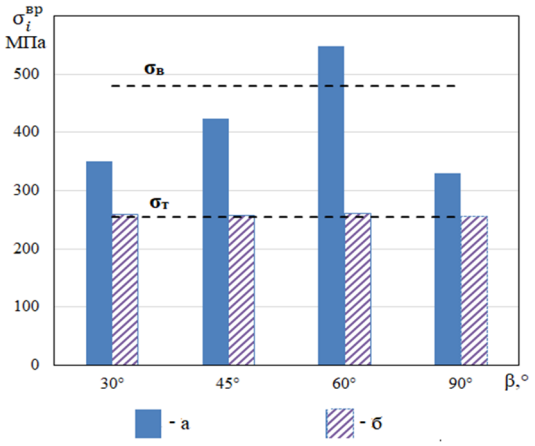


Рис. 4. Максимальные значения интенсивности временных напряжений в концевом сечении (*a*) и центральном сечении (*b*) заготовки при разных углах β

Fig. 4. Maximum values of the intensity of temporary stresses in the end section (*a*) and central section (*b*) of the workpiece at different angles β

При выборе рационального значения угла β одним из ключевых критериев является обеспечение равномерного распределения интенсивности временных напряжений на длине заготовки при выходе из клинового участка плит, поскольку градиенты напряжений вдоль длины заготовки могут вызвать локализованные пластические деформации, повышенные остаточные напряжения и повышенный риск появления трещин. На рис. 5 представлено распределение интенсивности временных напряжений по длине заготовке при разных значениях угла β при выходе из клинового участка.

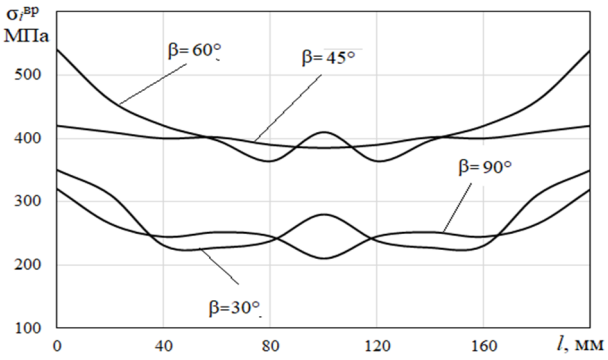


Рис. 5. Распределение интенсивности временных напряжений по длине заготовки в конце клинового участка при разных значениях угла β

Fig. 5. Distribution of the intensity of temporary stresses along the length of the workpiece at the end of the wedge section for different values of the angle β

Из рис. 5 следует, что в конце клинового участка распределение интенсивности временных напряжений имеет выраженную симметрию относительно середины длины заготовки при всех значениях угла клинового участка β. При этом на краях заготовки наблюдается наибольшая интенсивность временных напряжений. Из рис. 5 можно сделать вывод, что при угле клинового участка β = 45° интенсивность временных напряжений по длине заготовки распределяется более равномерно, чем при других значениях угла β клинового участка. На рис. 6 показано распределение интенсивности относительной пластической деформации в конце клинового участка по радиусу цилиндра при разных значениях угла β.

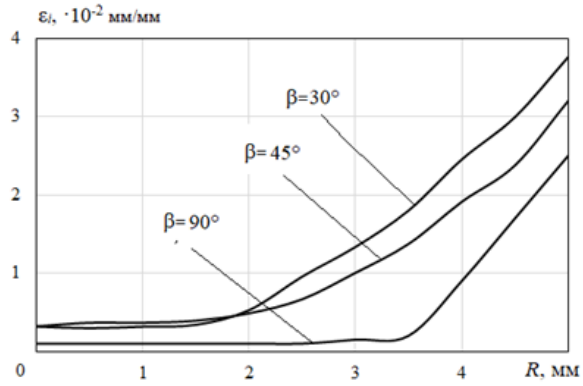


Рис. 6. Распределение интенсивности относительной пластической деформации по радиусу цилиндра в конце клинового участка при разных значениях β

Fig. 6. Distribution of the intensity of relative plastic deformation along the radius of the cylinder at the end of the wedge section for different values of β

Из рис. 6 следует, что чем меньше значение угла β клинового участка, тем больше глубина пластической деформации, и клиновая форма плоских плит дает глубину пластической деформации больше, чем прямоугольная форма (β = 90°), на 1,5 мм. Анализируя рис. 4, 5 и 6 можно сделать вывод, что угол β клинового участка плоских плит, равный 45°, обеспечивает упрочнение заготовки без возможного повреждения поверхностного слоя, равномерное распределение интенсивности временных напряжений и наибольшую глубину пластической деформации. Поэтому в дальнейшем для оценки влияния параметров процесса на напряженно-деформированное состояние заготовки принята геометрическая форма плит с углом клина β равным 45°.

Результаты исследования напряженно-деформированного состояния по длине заготовки в процессе упрочнения на плоских клиновых плитах

Полученные выше результаты позволили выбрать рациональную величину геометрического параметра клинового участка. При этом количество оборотов цилиндрической заготовки на данном участке (*n*) определяется по формуле:

$$n = \frac{l - b}{2\pi D tg\beta}. \quad (1)$$

Из формулы (1) для заготовки диаметром D = 10 мм и длиной l = 200 мм и угла клинового участка β = 45° количество оборотов на этом участке $n \approx 3$. На рис. 7 показана диаграмма изменения максимальной интенсивности временных напряжений поверхностного слоя заготовки и остаточное напряжение в процессе обкатки на плоских плитах, а на рис. 8 – поля распределения интенсивности временных напряжений, а также остаточных напряжений на поверхности заготовки при разных этапах ее перемещения по поверхности плиты.

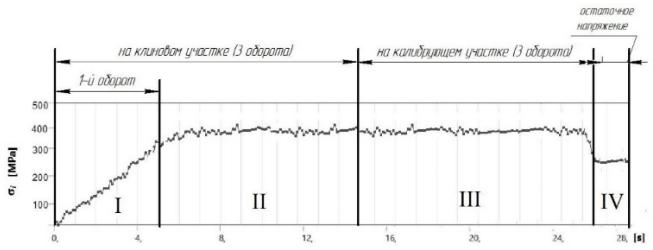


Рис. 7. Диаграмма изменения максимальной интенсивности временных и остаточных напряжений заготовки в процессе упрочнения клиновыми плитами (β = 45°)

Fig. 7. Diagram of the change in the maximum intensity of temporary and residual stresses of the workpiece during strengthening with wedge plates (β = 45°)

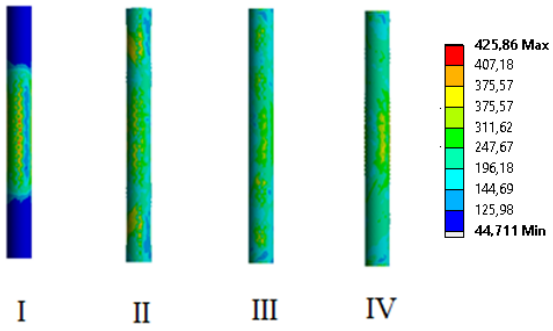


Рис. 8. Поля распределения интенсивности напряжений на поверхности заготовки при разных этапах перемещения на плитах (β = 45°)

Fig. 8. Fields of stress intensity distribution on the workpiece surface at different stages of movement on the plates (β = 45°)

Из диаграммы на рис.7 следует, что максимальная интенсивность временных напряжений заготовки увеличивается равномерно при повороте ее на один оборот и достигает значения 350 МПа (превышает предел текучести исследуемого материала). Далее при вращении заготовки на клиновом и калибрующем участках наблюдается небольшое изменение максимальной интенсивности временных напряжений, величина которой варьируется в диапазоне от 400 до 425 МПа (меньше предела прочности материала), что свидетельствует об отсутствии повреждений поверхностного слоя заготовки. После снятия нагрузки формируются остаточные напряжения, максимальная интенсивность которых составляет 240 МПа (см. рис.7). Из рис. 8 видно, что после первого оборота заготовки поле интенсивности временных напряжений возникает в контактной зоне заготовки с плоскими клиновыми плитами (положение I). В конце клинового участка интенсивность временных напряжений формируется по всей длине заготовки, но при этом имеет разные значения по поверхности (положение II). Далее на калибрующем участке с вращением заготовки на 3 оборота напряжение выравнивается за счет прямоугольной геометрической формы этого участка (положение III), и на выходе получается равномерное распределения интенсивности остаточных напряжений (положение IV). При этом по длине заготовки максимальное значение интенсивности временных напряжений в процессе упрочнения достигает 425 МПа, что на 10–15 % меньше предела прочности материала. Приближение напряжений к пределу прочности является опасным фактором, которое указывает на возможное повреждение поверхностного слоя заготовки [35].

На рис. 9 представлена диаграмма изменения интенсивности относительных пластических деформаций в поверхностных слоях заготовки в процессе упрочнения на плоских клиновых плитах, а также поля их распределения по длине при разных этапах перемещения на плитах.

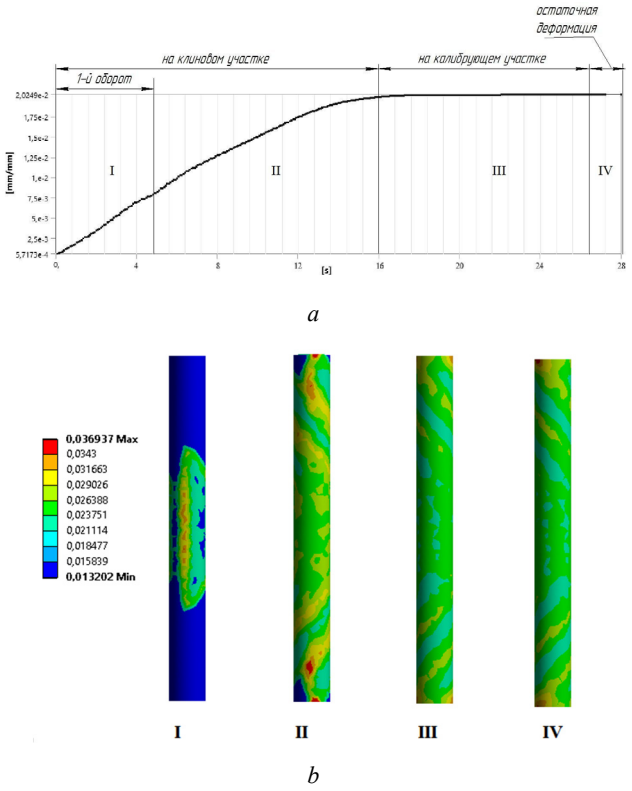


Рис. 9. Диаграмма изменения интенсивности относительных пластических деформаций заготовки в процессе упрочнения (*a*) и поля их распределения по длине при разных этапах перемещения на плитах (*b*) (β = 45°)

Fig. 9. Diagram of the change in the intensity of relative plastic deformations of the workpiece during the hardening process (*a*) and the field of their distribution along the length at different stages of movement on the plates (*b*) (β = 45°)

Из рис. 9 следует, что интенсивность относительной пластической деформации цилиндрической заготовки в процессе упрочнения плоскими клиновыми плитами увеличивается равномерно при перемещении на клиновом участке. Далее на калибрующем участке интенсивности пластической деформации становится постоянной величиной (рис. 9, *а*). После первого оборота заготовки пластическая деформация возникает только на локальном участке поверхности (рис. 9, *b*, положение I). При перемещении до конца клинового участка интенсивность пластической деформации распределяется по всей длине заготовки (положение II). Далее поля распределения пластической деформации не изменяются на калибрующем и выходном участках (положения III и IV).

При оценке качества процесса упрочнения цилиндрических деталей необходимо учитывать распределение остаточных напряжений по всей длине детали. На рис. 10 показано распределение интенсивности максимальных остаточных напряжений по длине заготовки при разных углах β.

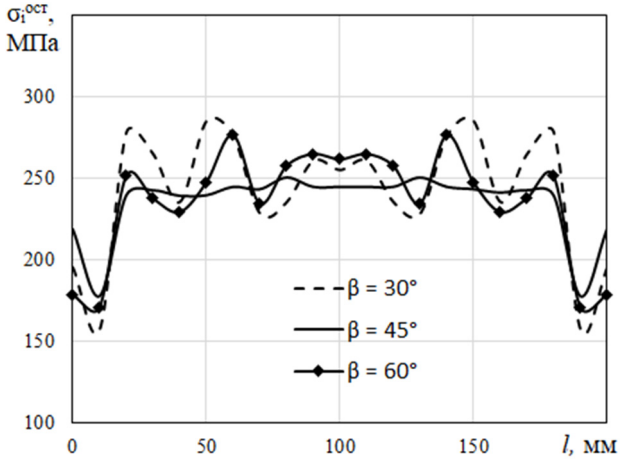


Рис. 10. Распределение по длине заготовки максимальной интенсивности остаточных напряжений при разных значениях β

Fig. 10. Distribution of the maximum intensity of residual stresses along the length of the workpiece for different values of β

Из рис. 10 можно сделать вывод, что интенсивность максимальных остаточных напряжений по длине заготовки распределяется симметрично. На торцевых частях заготовки наблюдается понижение интенсивности остаточных напряжений. Минимальное значение интенсивности остаточных напряжений находится на удалении 10 мм от торцов заготовки, далее напряжения равномерно распределяются по длине заготовки. При значении β=45° величина интенсивности остаточных напряжений составляет 240–250 МПа (меньше предела текучести материала). При остальных значениях угла β наблюдается сильное изменение остаточных напряжений, а в некоторых местах их максимальные значения превышают предел текучести материала, что является нежелательным следствием упрочнения.

Влияние степени относительного обжатия на напряженно-деформированное состояние цилиндрических деталей

Основным технологическим параметром, влияющим на напряженно-деформированное состояние цилиндрических деталей при упрочнении плоскими клиновыми плитами, является степень относительного обжатия Q [36]:

$$Q = \frac{\Delta H}{D} \cdot 100\,\%, \qquad (2)$$

где ΔH – максимальное значение абсолютного обжатия, мм.

Для оценки влияния технологических параметров процесса на напряженно-деформированное состояние деталей выполнено моделирование с разными значениями относительного обжатия. На рис. 11 показано распределение интенсивности временных напряжений по радиусу цилиндра, а на рис. 12 представлены зависимости максимальной интенсивности временных и остаточных напряжений от степени относительного обжатия Q при упрочнении цилиндрической заготовки из конструкционной стали Ст3.

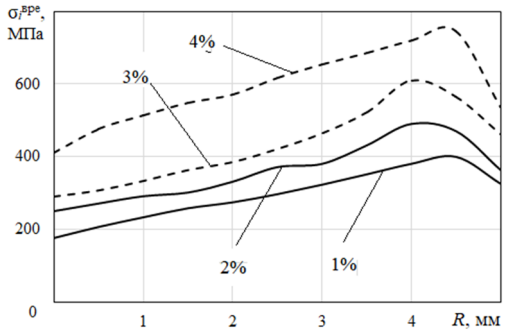


Рис. 11. Распределение интенсивности временных напряжений по радиусу заготовки при разных степенях относительного обжатия Q

Fig. 11. Distribution of the intensity of temporary stresses along the radius of the workpiece at different degrees of relative compression Q

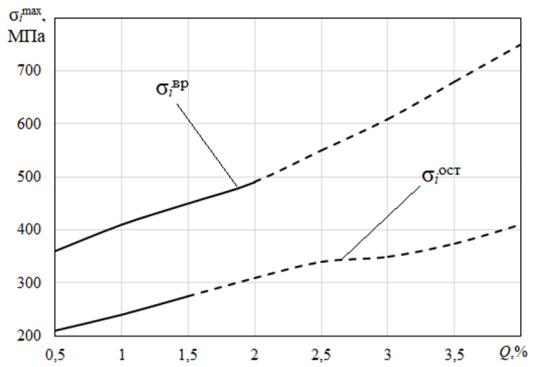


Рис. 12. Зависимость максимальной интенсивности временных и остаточных напряжений от степени относительного обжатия Q

Fig. 12. Dependence of the maximum intensity of temporary and residual stresses on the degree of relative compression Q

Из рис. 11 следует, что в поперечном сечении заготовки кривые распределения интенсивности временных напряжения имеют подобный характер при разных величинах Q. Максимальные значения напряжений возникают при этом не на поверхности, а на расстоянии 1–2 мм от нее. Далее с приближением к центру поперечного сечения интенсивность временных напряжений снижается. При больших обжатиях ($Q \geq 3$ %) в поперечном сечении цилиндра максимальное значение напряжений превышает предел прочности материала. Максимальные значения интенсивности временных и остаточных напряжений находится в прямой зависимости от степени относительного обжатия (см. рис. 12). При $Q > 2$ % интенсивность временных напряжений достигает значения больше предела прочности материала, а интенсивность остаточных напряжений больше предела текучести при $Q > 1{,}5$ %. Из рис. 11 и 12 можно сделать вывод, что при упрочнении цилиндрической заготовки плоскими клиновыми плитами величина относительного обжатия больше 2 % может привести к образованию дефектов в виде повреждения поверхностного слоя. Рекомендуемая величина относительного обжатия при упрочнении плоскими клиновыми плитами должна находится в интервале Q = (1,3–1,5) %.

Заключение

Таким образом, по результатам компьютерного моделирования процесса упрочнения цилиндрической заготовки на плоских клиновых плитах можно сделать следующие выводы.

Для исключения повреждения поверхностного слоя заготовки и концентрации интенсивности временных напряжений, а также повышения глубины пластической деформации при упрочнении рациональное значение угла клинового участка плоских плит β должно составлять 45°.

Максимальная интенсивность временных и остаточных напряжений находится в прямой зависимости от степени относительного обжатия Q. При величине относительного обжатия свыше 2 % могут образовываться дефекты в виде повреждения поверхностного слоя заготовки. Рекомендуемая величина относительного обжатия при упрочнении плоскими клиновыми плитами должна находиться в интервале Q=(1,3–1,5) %.

При упрочнении цилиндрической детали плоскими клиновыми плитами максимальная интенсивность временных и остаточных напряжений формируется на глубине 1 мм от поверхности заготовки. Клиновая форма плит дает больше глубину пластической деформации, чем при упрочнении прямоугольными плитами на 1,5 мм.

Библиографический список

1. Исследование отделочно-упрочняющей обработки методом обкатывания с программным управлением с помощью тороидального ролика / И.О. Зенин, П.Д. Акулиничев, М.А. Альбов, А.А. Гончаров // Технология металлов. – 2024. – № 4. – С. 29-37. DOI: 10.31044/1684-2499-2024-0-4-29-37

2. Influence of the mode of deformation and hydrogen charging on mechanical properties of 40X steel with surface nanostructure / V.I. Kyryliv, O.V. Maksymiv, I.V. Hurey [et al.] // Mater Sci. – 2024. – Vol. 60. – P. 169–175. DOI: 10.1007/s11003-025-00868-0

3. A thermo-mechanical machining method for improving the accuracy and stability of the geometric shape of long low-rigidity shafts / Swic A., Gola A., Sobaszek L. [et al.] // J Intell Manuf. – 2021. – Vol. 32. – P. 1939–1951. DOI: 10.1007/s10845-020-01733-4

4. Каратушин, С.И. Моделирование процесса упрочнения заготовки кручением / С.И. Каратушин, Д.А. Храмова, Ю.А. Плешанова // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2019. – № 2(707). – С. 34–39. DOI 10.18698/0536-1044-2019-2-34-39

5. Springback prediction of multiple reciprocating bending based on different hardening models / Qingdang Meng, Jun Zhao, Zhenkai Mu, Ruixue Zhai, Gaochao Yu // Journal of Manufacturing Processes. – 2022. – Vol. 76. – P. 251–263. DOI: 10.1016/j.jmapro.2022.01.070

6. Шуляк, Я.И. Особенности деформационного упрочнения поверхностного слоя деталей методом деформирующего резания / Я.И. Шуляк // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2015. – № 3(660). – С. 3–10.

7. Драпкин, Б.М. Свойства сплавов в экстремальном состоянии / Б.М. Драпкин, В.К. Кононенко, В.Ф. Безъязычный. – М.: Машиностроение, 2004. – 256 с.

8. Investigation of rotary straightening process for the rollers of planetary roller screw / T. Niu, Y. Luo, F. Chen [et al.] // J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng. – 2025. – Vol. 47, no. 116. DOI: 10.1007/s40430-025-05434-y

9. Безъязычный, В.Ф. Влияние технологических условий обработки на глубину наклепа в поверхностном слое детали при обработке лезвийным инструментом / В.Ф. Безъязычный // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2019. – Т. 15, № 8(176). – С. 348–354.

10. Gu, L. Study on thermo-plastic instability characteristics of machined surface localization in high-speed machining of rail steel / L. Gu // Int J Adv Manuf Technol. – 2024. – Vol. 135. – P. 511–524. DOI: 10.1007/s00170-024-14467-x

11. Исследование дополнительных возможностей влияния знакопеременной упругопластической деформации на свойства металлических материалов / А.Е. Шелест, В.С. Юсупов, М.М. Перкас, Е.Н. Шефтель // Металлы. – 2021. – № 1. – С. 54–61.

12. Влияние технологических параметров изготовления на уровень остаточных напряжений в оболочках тепловыделяющих элементов / Е.В. Кузнецова, О.Н. Горбач, Р.В. Кузнецов, А.Ю. Мелехин, К.В. Горбач // Прикладная математика и вопросы управления. – 2017. – № 4. – С. 118–131.

13. Кременский, И.Г. Место пластического деформирования в технологии восстановления деталей / И.Г. Кременский // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2020. – № 3.– С. 3–7. DOI: 10.31044/1684-2561-2020-0-3-3-7

14. Stupnytskyy, V., Kusyi, Y., Dragašius, E., Baskutis, S., Chatys, R. (2024). Modeling of Vibrational-Centrifugal Strengthening for Functional Surfaces of Machine Parts. In: Tonkonogyi, V., Ivanov, V., Trojanowska, J., Oborskyi, G., Pavlenko, I. (eds) Advanced Manufacturing Processes V. InterPartner 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-031-42778-7_21

15. Мураткин, Г.В. Математическая модель процесса правки деталей методом поверхностного пластического деформирования с предварительным изгибом заготовки / Г.В. Мураткин, И.В. Катова // Обработка металлов давлением. – 2004. – № 6. – С. 27–31.

16. Влияние поверхностного механического упрочнения на релаксационную стойкость сталей / Г.В. Мураткин, Д.А. Болдырев, Л.И. Попова, С.Г. Прасолов // Сталь. – 2021. – № 5. – С. 33–35.

17. Макаров, В.Ф. Применение различных методов локального ППД для снижения влияния технологического концентратора напряжений на профильных поверхностях деталей транспортных машин / В.Ф. Макаров, А.С. Горбунов // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2019. – № 7(97). – С. 42–48.

18. Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений / А.Г. Суслов [и др.]. – М.: Машиностроение, 2006. – 448 с.

19. Блюменштейн, В.Ю. Исследование влияния технологических факторов процесса поверхностного пластического деформирования сложно профильным инструментом на качество поверхностного слоя / В.Ю. Блюменштейн, К.С. Митрофанова // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2020. – Т. 16, № 2(182). – С. 68–74.

20. Самуль, А.Г. Кинематические характеристики процесса ультразвуковой поверхностной обработки / А.Г. Самуль // iPolytech Journal. – 2022. – Т. 26, № 1. – С. 24–34. DOI: 10.21285/1814-3520-2022-1-24-34

21. Zaides, S.A. Deviation from Roundness of Cylindrical Parts from Steel 45 with Reversible SPD / S.A. Zaides, Huu Hai Nguyen // Steel in Translation. – 2023. – Vol. 53, no. 6. – P. 554–561.

22. Zaides, S.A. Stress–strain state of components hardened by plastic deformation under cyclic loading / S.A. Zaides, M.Q. Ho // Russian engineering research. – 2022. – Vol. 42, no. 11. – P. 1125–1132.

23. Патент № 2696988 C1 Российская Федерация, МПК B21D 3/00. Устройство для правки нежестких цилиндрических деталей гладкими плитами: № 2019109584: заявл. 02.04.2019: опубл. 08.08.2019 / С.А. Зайдес, Х.К. Лэ; заявитель ФГБОУВО «ИрНИТУ».

24. Antimonov, A.M., Pushkareva, N.B., Reshetnikov, E.G. (2019). Cylindrical Shell Edges Bending Process Technological Features. In: Radionov, A., Kravchenko, O., Guzeev, V., Rozhdestvenskiy, Y. (eds) Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-319-95630-5_84

25. Клушин В.А., Рудович А.О. Технология и оборудование поперечно-клиновой прокатки: монография. – Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2010. – 300 с.

26. Патент № 2827624 C1 Российская Федерация, МПК B21D 3/00, B24B 39/04. Способ правки и упрочнения цилиндрических деталей: № 2024106758: заявл. 15.03.2024: опубл. 30.09.2024 / С. А. Зайдес, М. З. Буй.

27. Ziqian Zhang. Modeling and simulation for cross-sectional ovalization of thin-walled tubes in continuous rotary straightening process / Ziqian Zhang // International Journal of Mechanical Sciences. – 2019. – Vol. 153–154. – P. 83–102.

28. Rahman, Seifi Friction coefficient estimation in shaft/bush interference using finite element model updating / Rahman Seifi, Kaveh Abbasi // Engineering Failure Analysis. – 2015. – Vol. 57. – P. 310–322.

29. Зайдес, С.А. Правка локального участка цилиндрических деталей перед обкаткой гладкими плитами / С.А. Зайдес, М.З. Буй, Б.Б. Пономарев // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2024. – Т. 22, № 3. – С. 71–80. DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-3-71-80

30. Зайдес, С.А. Влияние геометрических параметров цилиндрической заготовки на напряженно-деформированное состояние при выправлении локального участка гладкими плитами / С.А. Зайдес, М.З. Буй // Технология металлов. – 2025. – № 3. – С. 28–38. DOI: 10.31044/1684-2499-2025-0-3-28-38

31. Громов, Н.П. Теория обработки металлов давлением / Н.П. Громов. – М.: Металлургиздат, 1978. – 360 с.

32. Experimental study on the static rolling friction coefficient of a flat-roller-flat configuration considering surface roughness / Jichao Li, Yi Zhang, Qingxue Shang, Tao Wang // Structures. – 2024. – Vol. 65. – P. 106711.

33. Зайдес, С.А. Определение напряженного состояния в очаге деформации при обкатке заготовки из углеродистой стали на локальном участке // С.А. Зайдес, М.З. Буй // Черные металлы. – 2025. – № 4. – С. 41–47. DOI: 10.17580/chm.2025.04.07

34. Shin, J.H. A Stroke Model for Straightening Partially Heat-Treated Ball Screws with Complex Mechanical Properties / J.H. Shin, S.W. Kim, H.S. Yoon // Int. J. Precis. Eng. Manuf. – 2024. – Vol. 25. – P. 1875–1884. DOI: 10.1007/s12541-024-01012-9

35. Variations of stress and deformation in the straightening process of turnout base plate / H. Zhai, Y. Wu, X. Liu [et al.] // J Mech Sci Technol. – 2022. – Vol. 36. – P. 3353–3360 DOI: 10.1007/s12206-022-0614-8

36. Мураткин, Г.В. Исследование влияния методов правки на размерную стабильность длинномерных валов ответственного назначения / Г.В. Мураткин // Новые материалы и технологии производства. – 2014. – № 4(82). – С. 37–44.

References

1. Zenin I.O., Akulinichev P.D., Albov M.A., Goncharov A.A. Issledovanie otdelochno-uprochniaiushchei obrabotki metodom obkatyvaniia s programmnym upravleniem s pomoshch'iu toroidal'nogo rolika [Study of finishing-strengthening treatment using CNC-controlled toroidal roller]. *Tekhnologiia metallov*, 2024, No. 4, pp. 29–37. https://doi.org/10.31044/1684-2499-2024-0-4-29-37.

2. Kyryliv V.I., Maksymiv O.V., Hurey I.V. et al. Influence of the mode of deformation and hydrogen charging on mechanical properties of 40X steel with surface nanostructure. *Materials Science*, 2024, Vol.60, pp.169–175. https://doi.org/10.1007/s11003-025-00868-0.

3. Swic A., Gola A., Sobaszek L. et al. A thermo-mechanical machining method for improving the accuracy and stability of the geometric shape of long low-rigidity shafts. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2021, Vol. 32, pp. 1939–1951. https://doi.org/10.1007/s10845-020-01733-4.

4. Karatushin S.I., Khramova D.A., Pleshanova Iu.A. Modelirovanie protsessa uprochneneniia zagotovki krucheniem [Modeling of the strengthening process of a workpiece by torsion]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie*, 2019, No. 2(707), pp. 34–39. https://doi.org/10.18698/0536-1044-2019-2-34-39.

5. Meng Q., Zhao J., Mu Z., Zhai R., Yu G. Springback prediction of multiple reciprocating bending based on different hardening models. Journal of Manufacturing Processes, 2022, Vol. 76, pp. 251–263. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.01.070.

6. Shuliak Ia.I. Osobennosti deformatsionnogo uprochneneniia poverkhnostnogo sloia detaley metodom deformiruiushchego

rezaniia [Features of deformation strengthening of the surface layer of parts by the method of deforming cutting]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie*, 2015, No. 3(660), pp. 3–10.

7. Drapkin B.M., Kononenko V.K., Bezziazychnyi V.F. Svoistva splavov v ekstremal'nom sostoianii [Properties of alloys under extreme conditions]. Mashinostroenie, 2004, 256 p.

8. Niu T., Luo Y., Chen F. et al. Investigation of rotary straightening process for the rollers of planetary roller screw. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2025, Vol. 47, Article No. 116. https://doi.org/10.1007/s40430-025-05434-y.

9. Bezziazychnyi V.F. Vliianie tekhnologicheskikh uslovii obrabotki na glubinu naklepa v poverkhnostnom sloe detali pri obrabotke lezviinym instrumentom [Effect of processing conditions on work hardening depth in the surface layer of a part during machining with cutting tools]. *Uprochniaiushchie tekhnologii i pokrytiia*, 2019, Vol. 15, No. 8(176), pp. 348–354.

10. Gu L. Study on thermo-plastic instability characteristics of machined surface localization in high-speed machining of rail steel. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2024, Vol. 135, pp. 511–524. https://doi.org/10.1007/s00170-024-14467-x.

11. Shelest A.E., Iusupov V.S., Perkas M.M., Sheftel' E.N. Issledovanie dopolnitel'nykh vozmozhnostei vliianiia znakoperemennoi uprugoplasticheskoi deformatsii na svoistva metallcheskikh materialov [Investigation of additional effects of cyclic elasto-plastic deformation on the properties of metallic materials]. *Metally*, 2021, No. 1, pp. 54–61.

12. Kuznetsova E.V., Gorbach O.N., Kuznetsov R.V., Melekhin A.Iu., Gorbach K.V. Vliianie tekhnologicheskikh parametrov izgotovleniia na uroven' ostatotchnykh napriazhenii v obolochkakh teplovydeliaiushchikh elementov [Influence of manufacturing parameters on the residual stress level in the claddings of fuel elements]. *Prikladnaia matematika i voprosy upravleniia*, 2017, No. 4, pp. 118–131.

13. Kremenskii I.G. Mesto plasticheskogo deformirovaniia v tekhnologii vosstanovleniia detaley [The role of plastic deformation in the technology of part restoration]. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiia,* 2020, No. 3, pp. 3–7. https://doi.org/10.31044/1684-2561-2020-0-3-3-7.

14. Stupnytskyy, V., Kusyi, Y., Dragašius, E., Baskutis, S., Chatys, R. (2024). Modeling of Vibrational-Centrifugal Strengthening for Functional Surfaces of Machine Parts. In: Tonkonogyi, V., Ivanov, V., Trojanowska, J., Oborskyi, G., Pavlenko, I. (eds) Advanced Manufacturing Processes V. InterPartner 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-42778-7_21.

15. Muratkin G.V., Katova I.V. Matematicheskaia model' protsessa pravki detaley metodom poverkhnostnogo plasticheskogo deformirovaniia s predvaritel'nym izgibom zagotovki [Mathematical model of the straightening process by surface plastic deformation with preliminary bending of the workpiece]. *Obrabotka metallov davleniem*, 2004, No. 6, pp. 27–31.

16. Muratkin G.V., Boldyrev D.A., Popova L.I., Prasolov S.G. Vliianie poverkhnostnogo mekhanicheskogo uprochneniia na relaksatsionnuiu stoikost' stalei [Effect of surface mechanical strengthening on the relaxation resistance of steels]. *Steel in Translation*, 2021, No. 5, pp. 33–35.

17. Makarov V.F., Gorbunov A.S. Primenenie razlichnykh metodov lokal'nogo PPD dlia snizheniia vliianiia tekhnologicheskogo kontsentratora napriazhenii na profilevykh poverkhnostiakh detaley transportnykh mashin [Application of various local surface plastic deformation methods to reduce the influence of technological stress concentrators on profiled surfaces of transport machine parts]. *Naukoiemkie tekhnologii v mashinostroeni*i, 2019, No. 7(97), pp. 42–48.

18. Suslov A.G. [et al.]. Tekhnologicheskoe obespechenie i povyshenie ekspluatatsionnykh svoistv detaley i ikh soedinenii [Technological support and improvement of operational properties of parts and their joints]. Mashinostroenie, 2006, 448 p.

19. Blumenstein V.Iu., Mitrofanova K.S. Issledovanie vliianiia tekhnologicheskikh faktorov protsessa poverkhnostnogo plasticheskogo deformirovaniia slozhno profilevannym instrumentom na kachestvo poverkhnostnogo sloia [Study of the influence of technological factors of surface plastic deformation with complex-profile tool on the surface layer quality]. *Uprochniaiushchie tekhnologii i pokrytiia*, 2020, Vol. 16, No. 2(182), pp. 68–74.

20. Samul' A.G. Kinematicheskie kharakteristiki protsessa ul'trazvukovoi poverkhnostnoi obrabotki [Kinematic characteristics of the ultrasonic surface treatment process]. *iPolytech Journal*, 2022, Vol. 26, No. 1, pp. 24–34. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-1-24-34.

21. Zaides, S.A. Nguyen Huu Hai. Deviation from Roundness of Cylindrical Parts from Steel 45 with Reversible SPD // Steel in Translation. – 2023. – Vol. 53. – No. 6. – P. 554–561. https://doi.org/10.3103/s0967091223060165.

22. Zaides, S.A. Ho M.Q. Stress–strain state of components hardened by plastic deformation under cyclic loading // Russian engineering research. – 2022. – Vol. 42. – No. 11. – pp. 1125–1132. https://doi.org/10.3103/s1068798x22110260.

23. Patent No. 2696988 C1 Rossiiskaia Federatsiia, MPK B21D 3/00. Ustroistvo dlia pravki nezhestkikh tsilindricheskikh detaley gladkimi plitami [Device for straightening low-rigidity cylindrical parts using smooth plates]. No. 2019109584, filed 02.04.2019, published 08.08.2019 / Zaides S.A., Le K.K.; applicant FGBOUVO "IrNITU".

24. Antimonov, A.M., Pushkareva, N.B., Reshetnikov, E.G. (2019). Cylindrical Shell Edges Bending Process Technological Features. In: Radionov, A., Kravchenko, O., Guzeev, V., Rozhdestvenskiy, Y. (eds) Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2018. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-95630-5_84.

25. Klushin V.A., Rudovich A.O. Tekhnologiia i oborudovanie poperechno-klinovoi prokatki: monografiia [Technology and equipment for cross-wedge rolling: monograph]. FTI NAN Belarusi, Minsk, 2010, 300 p.

26. Patent No. 2827624 C1 Rossiiskaia Federatsiia, MPK B21D 3/00, B24B 39/04. Sposob pravki i uprochneneniia tsilindricheskikh detaley [Method for straightening and strengthening cylindrical parts]. No. 2024106758, filed 15.03.2024, published 30.09.2024 / Zaides S.A., Bui M.Z.

27. Ziqian Zhang. Modeling and simulation for cross-sectional ovalization of thin-walled tubes in continuous rotary straightening process. *International Journal of Mechanical Sciences*. Volumes 153–154. 2019. pp. 83-102.

28. Rahman Seifi, Kaveh Abbasi. Friction coefficient estimation in shaft/bush interference using finite element model updating. *Engineering Failure Analysis*. Volume 57. 2015. pp. 310-322.

29. Zaides S.A., Bui M.Z., Ponomarev B.B. Pravka lokal'nogo uchastka tsilindricheskikh detaley pered obkatkoi gladkimi plitami [Straightening of a local section of cylindrical parts before rolling with flat plates]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova*, 2024, Vol. 22, No. 3, pp. 71–80. https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-3-71-80.

30. Zaides S.A., Bui M.Z. Vliianie geometricheskikh parametrov tsilindricheskoi zagotovki na napriazhenno-deformirovannoe sostoianie pri vypravlenii lokal'nogo uchastka gladkimi plitami [Influence of geometric parameters of a cylindrical billet on the stress–strain state during straightening of a local zone using flat plates]. Tekhnologiia metallov, 2025, No. 3, pp. 28–38. https://doi.org/10.31044/1684-2499-2025-0-3-28-38.

31. Gromov N.P. Teoriia obrabotki metallov davleniem [Theory of metal forming]. Metallurgizdat, Moscow, 1978, 360 p.

32. Jichao Li, Yi Zhang, Qingxue Shang, Tao Wang. Experimental study on the static rolling friction coefficient of a flat-roller-flat configuration considering surface roughness. *Structures*. Volume 65.2024.106711.

33. Zaides S.A., Bui Manh Dung. Opredelenie napriazhennogo sostoianiia v ochage deformatsii pri obkatke zagotovki iz uglerodistoi stali na lokal'nom uchastke [Determination of the stress state in the deformation zone when rolling rotation of a carbon steel workpiece at a local site]. *Chernye metally,* 2025, No. 4, pp. 41–47 DOI: 10.17580/chm.2025.04.07

34. Shin, JH., Kim, S.W. & Yoon, HS. A Stroke Model for Straightening Partially Heat-Treated Ball Screws with Complex Mechanical Properties. Int. J. Precis. Eng. Manuf. 25, 1875–1884 (2024). https://doi.org/10.1007/s12541-024-01012-9.

35. Zhai, H., Wu, Y., Liu, X. et al. Variations of stress and deformation in the straightening process of turnout base plate. J Mech Sci Technol 36, pp. 3353–3360 (2022). https://doi.org/10.1007/s12206-022-0614-8.

36. Muratkin G.V. Issledovanie vliianiia metodov pravki na razmernuiu stabil'nost' dlinnomernykh valov otvetstvennogo naznacheniia [Study of the influence of straightening methods on dimensional stability of long shafts for critical applications]. *Novie materialy i tekhnologii proizvodstv*a, 2014, No. 4(82), pp. 37–44.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.
Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Вклад авторов равноценен.

Funding. The study was not supported by sponsorship.
Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.
The authors' contributions are equal.