

ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

MATERIAL PROCESS ENGINEERING

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 621.787.4

DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-3-87-96



ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ ВЕЛИЧИНЫ УГЛА КЛИНОВОГО УЧАСТКА ПЛОСКИХ ПЛИТ ПРИ ПОВЕРХНОСТНОМ ПЛАСТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ

Зайдес С.А., Буй М.З.

Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

Аннотация. Актуальность работы. Цилиндрические мало жесткие изделия имеют широкое применение в машиностроении в качестве заготовок для изготовления деталей типа валов, осей, штоков, штанг и др. Упрочнение деталей является одним из ключевых методов повышения эксплуатационной надежности и долговечности таких типов детали. Применение метода упрочнения поверхностного пластического деформирования позволяет формировать благоприятное напряженно-деформированное состояние в поверхностном слое деталей. В Иркутском НИТУ разработаны способы правки и упрочнения не жестких деталей, основанные на поперечной обкатке гладкими плитами. Отличие этих способов заключается в геометрической форме рабочего инструмента. Неправильный выбор геометрических параметров инструмента может привести к неравномерному упрочнению, локальным концентрациям напряжений и, как следствие, к образованию трещин, остаточных деформаций или снижению эффективности процесса. **Цель работы.** По результатам анализа напряженно-деформированного состояния в зоне деформации и остаточных напряжений в упрочненных деталях выбрать и обосновать величину угла клинового участка плоских плит, который обеспечивает необходимое качество упрочненного слоя. **Используемый метод.** С помощью программного обеспечения для 3D-проектирования (Solid work 2019) и вычислительного моделирования (Ansys workbench 19.2) построена модель процесса упрочнения цилиндрической детали плоскими инструментами для расчета и оценки напряженно-деформированное состояние заготовки в зоне деформации и остаточных напряжений в готовых деталях. **Результаты исследования.** На основе анализа результатов конечно-элементного моделирования установлено рациональное значение угла клинового участка плоских плит, равное 45° . При таком значении угла максимальное временное напряжение в процессе упрочнения достигает величину меньше, чем предел прочности материала, что обеспечивает упрочнение без возникновения на поверхности заготовки трещин, а также равномерное распределение остаточных напряжений на поверхности. **Практическая значимость.** Предложенные результаты исследования имеют важное практическое значение для повышения качества упрочняемых деталей. Установленное рациональное значение угла клинового участка плоских плит (45°) позволяет минимизировать риск образования повреждений и остаточных деформаций цилиндрических деталей при их упрочнении. Это способствует улучшению эксплуатационных характеристик не жестких деталей, обеспечивая их повышенную долговечность и надежность в процессе эксплуатации.

Ключевые слова: упрочнение, поверхностный слой, клиновые плиты, прямоугольные плиты, напряженно-деформированное состояние, предел текучести, глубина пластической деформации

© Зайдес С.А., Буй М.З., 2025

Для цитирования

Зайдес С.А., Буй М.З. Выбор и обоснование величины угла клинового участка плоских плит при поверхностном пластическом деформировании // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №3. С. 87-96. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-3-87-96>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

SELECTION AND JUSTIFICATION OF THE ANGLE VALUE OF THE WEDGE SECTION OF FLAT PLATES UNDER SURFACE PLASTIC DEFORMATION

Zaides S.A., Bui M.D.

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. Relevance. Cylindrical low-rigidity products are widely used in mechanical engineering as blanks for manufacturing parts such as shafts, axles, rods, bars, etc. Hardening of parts is one of the key methods for increasing the operational reliability and durability of such types of parts. Application of the method of hardening of surface plastic deformation (SPD) allows forming a favorable stress-strain state (SSS) in the surface layer of parts. Irkutsk NRTU has developed methods for straightening and hardening of non-rigid parts based on transverse rolling with smooth plates. The difference between these methods lies in the geometric shape of the working tool. Incorrect choice of geometric parameters of the tool can lead to uneven hardening, local stress concentrations and, as a consequence, to the formation of cracks, residual deformations or a decrease in the efficiency of the process. **The objective** of the work is to select and justify the angle of the wedge section of flat plates, which ensures the required quality of the hardened layer, based on the analysis of the SSS in the deformation zone and residual stresses in the hardened parts. **Method Applied.** Using 3D design software (Solid work 2019) and computational modeling (Ansys workbench 19.2), a model of the process of hardening a cylindrical part with flat tools was built to calculate and evaluate the stress-strain state of the blank in the deformation zone and residual stresses in finished parts. **Result.** Based on the analysis of the results of finite element modeling, a rational value of the angle of the wedge section of flat plates was established equal to 45°. With this angle value, the maximum temporary stress during hardening reaches a value less than the tensile strength of the material, which ensures hardening without the occurrence of cracks on the surface of the blank, as well as a uniform distribution of residual stresses on the surface. **Practical Relevance.** The proposed research results are of great practical importance for improving the quality of hardened parts. The established rational value of the wedge section angle of flat plates (45°) allows minimizing the risk of damage and residual deformations of cylindrical parts during their hardening. This helps improve the performance characteristics of non-rigid parts, ensuring their increased durability and reliability during operation.

Keywords: strengthening, surface layer, wedge plates, rectangular plates, stress-strain state, yield strength, depth of plastic deformation

For citation

Zaides S.A., Bui M.D. Selection and Justification of the Angle Value of the Wedge Section of Flat Plates Under Surface Plastic Deformation. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 3, pp. 87-96. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-3-87-96>

Введение

Цилиндрические мало жесткие изделия имеют широкое применение в машиностроении в качестве заготовок для изготовления деталей типа валов, осей, штоков, штанг и др. [1-3]. Они во многом определяют ресурс машин и механизмов. Обычно мало жесткие детали сложны в изготовлении, так как не выдерживают больших силовых и термических нагрузок. Но самое главное, после изготовления таких деталей они теряют свою первоначальную форму под действием даже незначительных остаточных напряжений, которые неизбежно возникают в процессе их механической и термической обработки. Поэтому на заключительной стадии изготовления такие детали подвергаются правке [4-6].

Упрочнение деталей является одним из ключевых методов повышения эксплуатационной надежности и долговечности деталей машин [1]. В машиностроении

широко используются различные технологии обработки, направленные на увеличение поверхностной твердости и улучшение механических характеристик материалов. Одним из перспективных методов является упрочнение цилиндрических заготовок с применением поверхностного пластического деформирования (ППД), которое позволяет формировать благоприятное напряженно-деформированное состояние (НДС) в поверхностном слое деталей [7, 8].

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 [9]. В Иркутском национальном исследовательском техническом университете разрабатываются новые способы и устройства для правки и упрочнения не жестких цилиндрических де-

талей типа валов и осей. Способ правки и упрочнения в одной технологической операции, техническая новизна которого подтверждена патентами РФ на изобретения [10, 11], предназначен в основном для обработки деталей из пластичных металлов и сплавов. Разработанные способы основаны на обкатке деталей гладкими плитами. К преимуществам плоско-обкатного устройства относятся простота изготовления и низкая стоимость плоского инструмента, стабильное положение детали на плоскости инструмента, высокая стойкость рабочего инструмента, высокая производительность. Так как рабочий инструмент выполнен в виде плоских плит, то можно упрочнять даже весьма тонкие цилиндрические детали типа валов и осей [12, 13]. Принципиальные схемы способов упрочнения цилиндрической детали представлены на рис. 1.

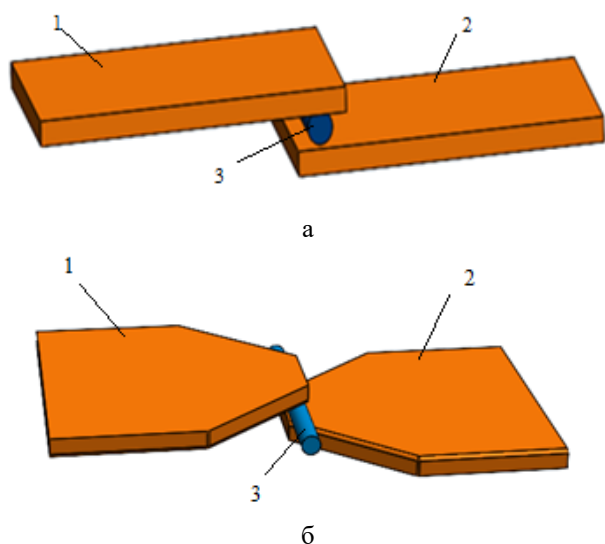


Рис. 1. Способы упрочнения нежесткой цилиндрической заготовки: а – прямоугольными плитами; б – клиновыми плитами; 1 – верхняя плита; 2 – нижняя плита; 3 – заготовка

Fig. 1. Methods of strengthening a non-rigid cylindrical workpiece: а is rectangular plates; б is wedge plates; 1 is upper plate; 2 is lower plate; 3 is workpiece

Заготовку кладут между плитами и сжимают со стороны верхней плиты. Упрочнение заготовки осуществляется за счет движения в горизонтальном направлении верхней плиты. Разница между этими способами заключается в геометрической форме упрочняющих инструментов. Клиновая форма в отличие от прямоугольных плит позволяет упрочнять даже искривленные заготовки без предварительной правки. Это отличие влияет и на НДС детали в процессе упрочнения и это необходимо учитывать при выборе геометрии инструмента. Важным аспектом данного процесса является равномерность распре-

ления напряжений и деформаций в заготовке. Неправильный выбор геометрических параметров плит может привести к неравномерному упрочнению, локальным концентрациям напряжений и, как следствие, к образованию трещин, остаточных деформаций или снижению эффективности процесса.

Цель работы: по результатам анализа НДС в зоне деформации и остаточных напряжений в упрочненных деталях выбрать и обосновать величину угла клинового участка плоских плит, который обеспечивает необходимое качество упрочненного слоя.

Метод исследования

Для исследования влияния геометрических параметров рабочего инструмента на НДС поверхностного слоя цилиндрических деталей был использован метод конечных элементов (МКЭ), который позволяет численно определить НДС деталей в очаге деформации и максимальную интенсивность временных и остаточных напряжений и является удобным методом представления сложного поведения материала путем точного отражения физических явлений с помощью дифференциальных уравнений [14]. Применение численного моделирования дает возможность выявить оптимальные параметры обработки без проведения дорогостоящих экспериментальных испытаний, а также предсказать потенциальные дефекты, возникающие при неравномерном распределении напряжений [4].

Исследования проведены в программном комплексе ANSYS Mechanical при использовании модуля *Transient structural*. В качестве заготовок были использованы цилиндрические образцы диаметрами 10 и 20 мм. В качестве материала заготовок была выбрана углеродистая конструкционная сталь Ст3 (упруго-пластический, модуль упругости $E = 1,8 \cdot 10^5$ МПа; коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$; диаграмма деформирования материала – билинейная, предел текучести $\sigma_t = 255$ МПа, предел прочности $\sigma_b = 480$ МПа, модуль упрочнения $E_T = 1,45 \cdot 10^3$ МПа). В качестве материала, используемого для клиновых плит, применена конструкционная сталь высокой прочности и жесткости. При моделировании рабочий инструмент принят как абсолютно жесткое тело. Коэффициент трения качения для пары сталь-сталь в зоне контакта заготовки с плитами $f = 0,05$. При моделировании для построения сетки конечных элементов использован справочник программы Ansys 19.1. С учетом механического взаимодействия заготовки из стали с абсолютно жестким телом приняты конечные элементы тетраэдрического типа. Сетка использована с постоянным размером конечного элемента (в данном исследовании 0,5 мм) и одного типа по всему объему заготовки. Конечно-элементная модель процесса показана на рис. 2.

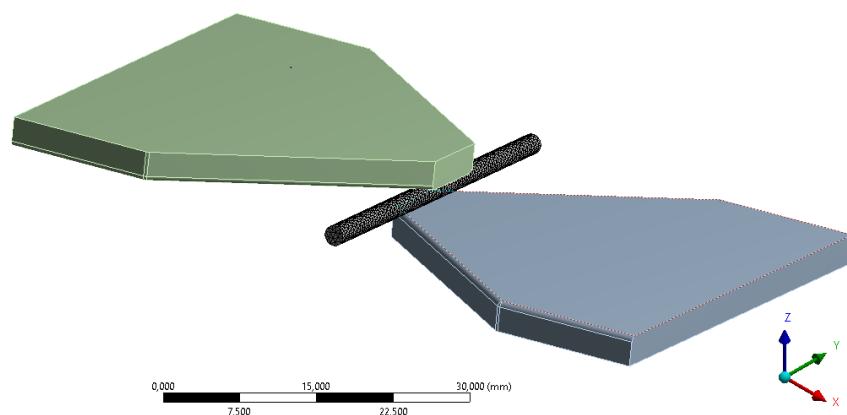


Рис. 2. Конечно-элементная модель процесса упрочнения цилиндрической заготовки клиновыми плитами
Fig. 2. Finite element model of the process of strengthening a cylindrical workpiece with wedge plate

Основными параметрами процесса являются величина относительного обжатия заготовки Q , скорость движения верхней плиты v . Для определения влияния угла клина плоских плит β на НДС заготовки в исследовании эти параметры приняты постоянными, а значения β переменными. Значения базовых параметров и режимов процесса упрочнения представлены в **таблице**.

Таблица. Базовые параметры и режимы процесса упрочнения

Table. Basic parameters and modes of the hardening process

Диаметр заготовки D , мм	Длина заготовки l , мм	Скорость движения верхней плиты v , мм/с	Величина относительного обжатия Q , %
10, 20	120	10	1%

Геометрическая форма клинового участка плиты представлена на **рис. 3**. Основным геометрическим параметром плиты является угол клина β . При упрочнении деталей плоскими прямоугольными плитами (**рис. 1, а**) значение β равно 90° .

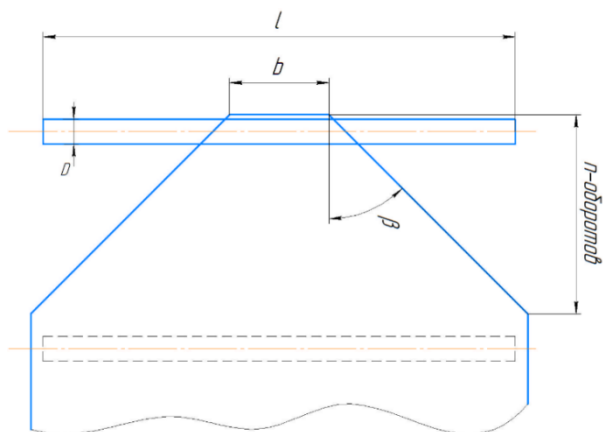


Рис. 3. Геометрическая форма клинового участка плиты

Fig. 3. Geometric shape of the wedge section of the plate

Заготовка длиной l и диаметром D расположена первоначально на участке плиты шириной b и совершает n оборотов на клиновом участке для упрочнения всей поверхности заготовки. Значение b было взято по результатам исследования [4] и составляет 40 мм для заготовок с малыми диаметрами (10, 20 мм), а величина n определяется по формуле

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

По формуле (1) построена зависимость между количеством оборотов заготовки и углом клинового участка при разных диаметрах заготовки (**рис. 4**).

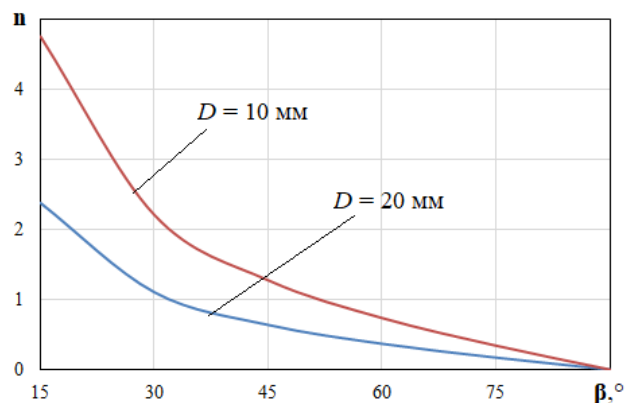


Рис. 4. Зависимость количества оборотов заготовки от величины угла клинового участка плит

Fig. 4. Dependence of the number of workpiece revolutions on the value of the angle of the plates wedge section

Из **рис. 4** следует, что количество оборотов заготовки на клиновом участке плит находится в обратной зависимости от величины угла β . При одинаковой геометрической форме плит чем меньше диаметр заготовки, тем больше количество оборотов она совершает на клиновом участке. Малый угол плиты β обеспечивает

возможность упрочнения заготовок с достаточно большой начальной кривизной, но для упрочнения всей поверхности заготовка должна совершить достаточно большое число оборотов, что связано с возможностью перенаклепа материала. Большой угол β исключает перенаклеп поверхностного слоя, но не позволяет упрочнить искривленные детали.

Результаты компьютерного моделирования

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 деформаций по осям координат.

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

где σ_z , σ_φ , σ_r – осевые, радиальные и тангенциальные напряжения по осям координат, МПа.

По аналогии определяется интенсивность деформации по формуле

$$\varepsilon_i = \sqrt{\frac{2}{9}[(\varepsilon_z - \varepsilon_\varphi)^2 + (\varepsilon_\varphi - \varepsilon_r)^2 + (\varepsilon_r - \varepsilon_z)^2]}, \quad (3)$$

где ε_z , ε_φ , ε_r – компоненты осевых, радиальных и тангенциальных деформаций, мм/мм.

В процессе упрочнения клиновыми плитами угол клина β играет важную роль в формировании НДС цилиндрической заготовки. Увеличение угла β приводит к увеличению начальной площади контакта между заготовкой и клиновыми плитами, так как в этом случае боковые поверхности плит контактируют

с заготовкой под более острым углом, что увеличивает площадь контакта по длине заготовки. На рис. 5 представлены максимальные интенсивности временных и остаточных напряжений на поверхности по длине заготовки, а на рис. 6 в центральном поперечном сечении при разных значениях угла β клинового участка и разных диаметральных размерах заготовки.

Из рис. 5 и 6 следует, что при упрочнении заготовки клиновыми плитами максимальные интенсивности временных и остаточных напряжений на поверхности больше, чем при упрочнении прямоугольными плитами ($\beta = 90^\circ$) (см. рис. 5). В центральном поперечном сечении максимальная интенсивность временных напряжений почти одинаковая при разных геометрических формах плит (см. рис. 6). Причем чем больше угол β клинового участка плит, тем больше интенсивность остаточных напряжений, и максимальное значение наблюдается при угле $\beta = 60^\circ$. Это объясняется тем, что при увеличении угла клиновых плит возрастает площадь контакта с заготовкой, что ведет к увеличению локальных напряжений на поверхности заготовки. Это может усилить качество процесса упрочнения, но в то же время увеличить риск возникновения повреждений на поверхности детали.

Результаты моделирования, представленные на рис. 5, показывают, что при $\beta = 60^\circ$ максимальные значения интенсивности временных напряжений превышают значения предела прочности материала (для исследуемого материала $\sigma_B = 480$ МПа), что указывает на возможность возникновения на поверхности заготовки дефектов. В центральном поперечном сечении заготовки максимальные значения интенсивности напряжений меньше, чем предел прочности материала (480 МПа) при всех диаметрах заготовки, что свидетельствует об отсутствии внутренних повреждений (см. рис. 6) [15].

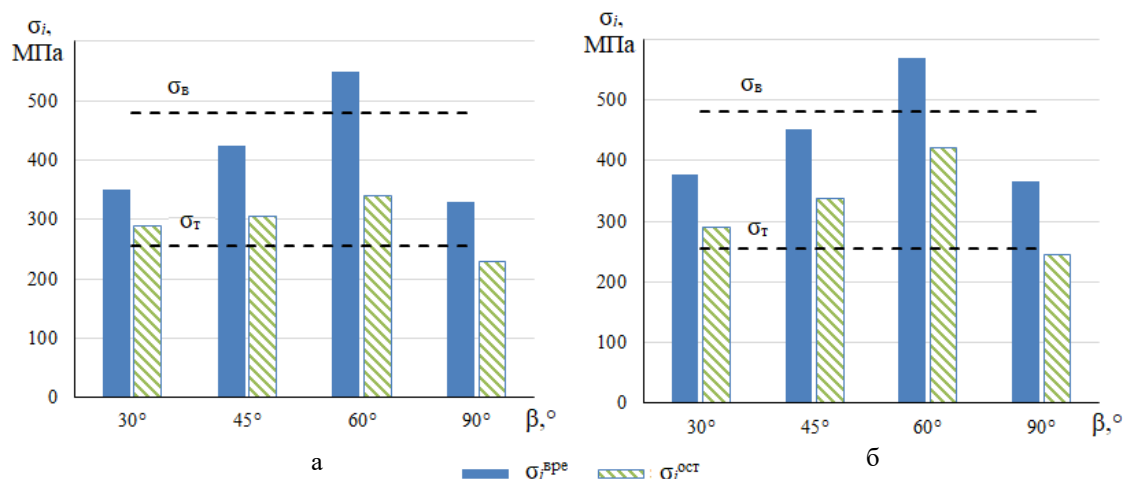


Рис. 5. Максимальные интенсивности временных и остаточных напряжений на поверхности заготовки при разных значениях угла β : а – $D = 10$ мм; б – $D = 20$ мм

Fig. 5. Maximum intensities of temporary and residual stresses on the surface of the workpiece at different values of the angle β : а is $D = 10$ mm, б is $D = 20$ mm

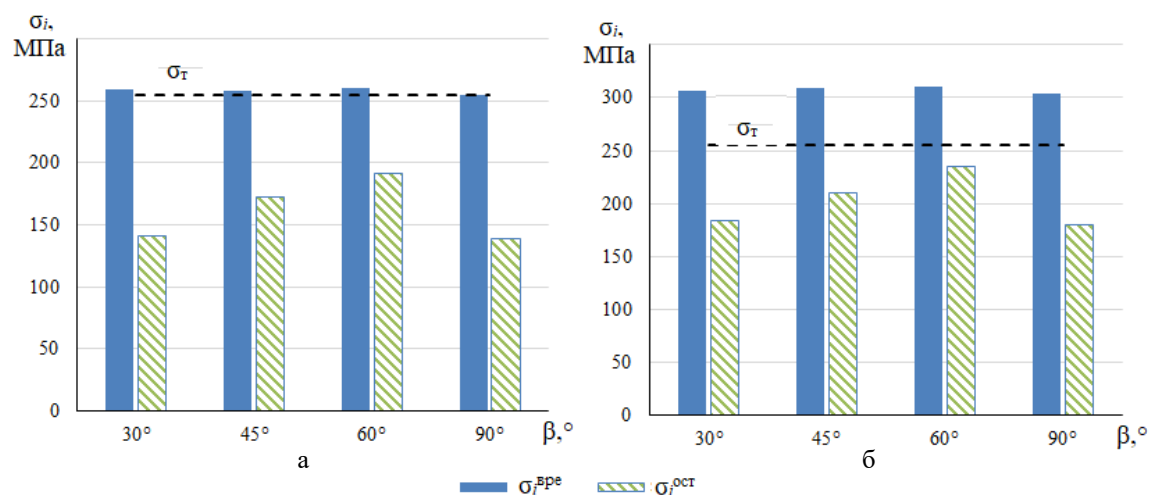


Рис. 6. Максимальные интенсивности временных и остаточных напряжений в центральном поперечном сечении заготовки при разных значениях угла β : а – $D = 10$ мм; б – $D = 20$ мм

Fig. 6. Maximum intensities of temporary and residual stresses in the central cross-section of the workpiece at different values of the angle β : а is $D = 10$ mm; б is $D = 20$ mm

Одним из самых важных качеств параметра процесса упрочнения является равномерность распределения остаточных напряжений на поверхности заготовки. На **рис. 7** представлено распределение интенсивности остаточных напряжений по длине заготовки при разных диаметральных размерах и значениях угла β клинового участка плоских плит.

Центром координатной системы для расчета НДС является центральное поперечное сечение и ось Oy вдоль длины заготовки. Так как система симметричная, поэтому рассмотрим распределение напряжений от центра до одного края заготовки (соответственно по оси Oy от 0 до 60 мм). По результатам моделирования наблюдаются максимальные напряжения на концевой части заготовки. Из **рис. 7** видно, что для разных диаметров заготовки наиболее равномерное распределение остаточных напряжений по

длине заготовки происходит при угле $\beta = 45^\circ$. Во всех остальных случаях наблюдается большая неравномерность распределения напряжений, которое может привести к концентрации напряжений [16].

На **рис. 8** представлено распределение интенсивности остаточных напряжений по радиусу заготовки в центральном поперечном сечении.

Кривые напряжений показывают, что интенсивность остаточных напряжений уменьшается от поверхности к центру заготовки. Причем на поверхности значения напряжений больше, чем предел текучести материала. Это свидетельствует о том, что глубина пластической деформации при упрочнении клиновыми плитами эффективно происходит только в поверхностных слоях. На **рис. 9** показаны поля распределения интенсивности остаточных напряжений и компонент тензор напряжений при $\beta = 45^\circ$ и $D = 10$ мм.

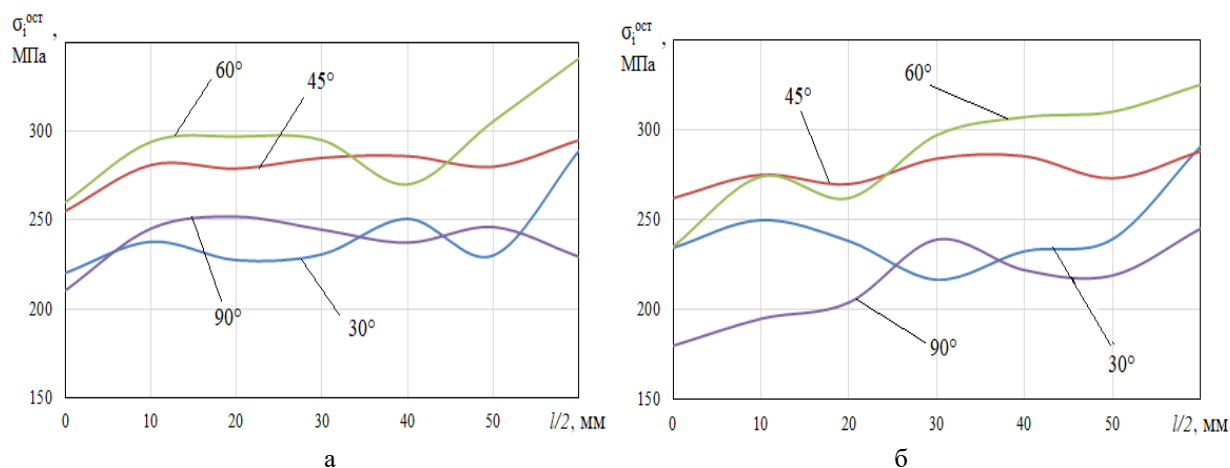


Рис. 7. Распределение интенсивности остаточных напряжений по длине заготовки при разных значениях угла β : а – $D = 10$ мм; б – $D = 20$ мм

Fig. 7. Distribution of residual stress intensity along the length of the workpiece for different values of the angle β : а is $D = 10$ mm; б is $D = 20$ mm

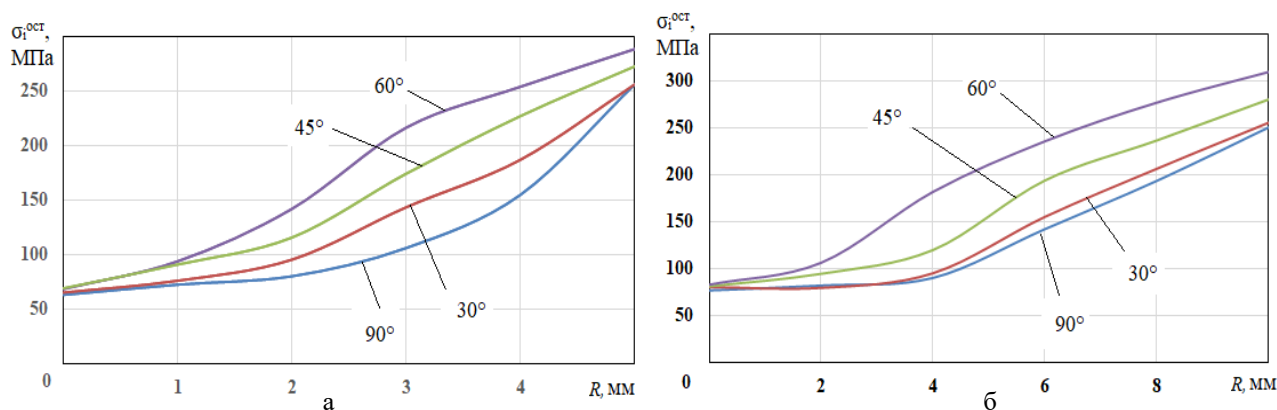


Рис. 8. Распределение интенсивности остаточных напряжений по радиусу заготовки при разных значениях угла β :
а – $D = 10$ мм; б – $D = 20$ мм

Fig. 8. Distribution of residual stress intensity along the radius of the workpiece for different values of the angle β :
а is $D = 10$ мм; б is $D = 20$ мм

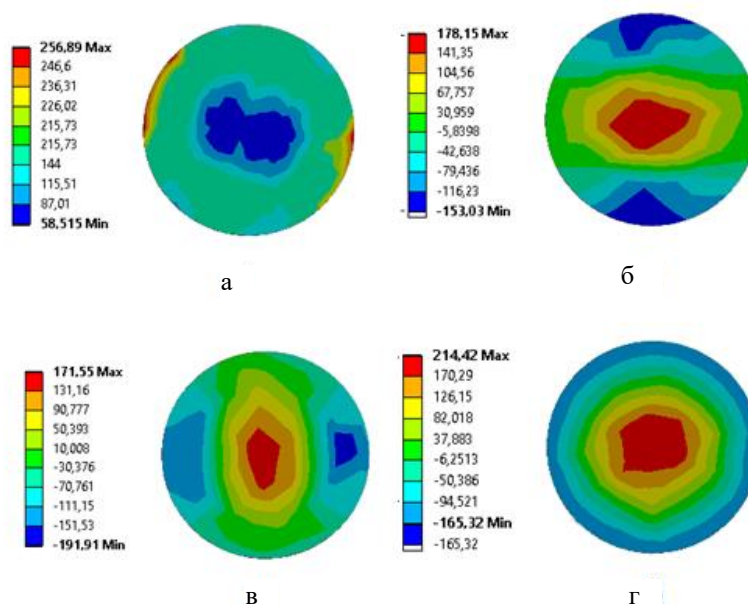


Рис. 9. Изополосы распределения интенсивности остаточных напряжений (а) и компоненты тензора напряжений σ_ϕ (б), σ_r (в), σ_z (г) при $D = 10$ мм и $\beta = 45^\circ$

Fig. 9. Isobands of residual stress intensity distribution (а) and stress tensor components σ_ϕ (б), σ_r (в), σ_z (г) at $D = 10$ мм and $\beta = 45^\circ$

Из **рис. 9** следует, что максимальные интенсивности остаточных напряжений возникают на поверхности заготовки и снижаются по мере приближения к центру (**рис. 9, а**). Тангенциальное, осевое и радиальное напряжения имеют знакопеременный характер. В центральной части сечения формируется область растягивающих напряжений, а на поверхности – сжимающих. При этом максимальное растягивающее напряжение является осевым. Представленные картины остаточных напряжений и его компонент тензор напряжений при упрочнении клиновыми плитами сравнивается с результатами исследования, получен-

ными при обработке ППД плоскими прямоугольными плитами [17]. Анализ показал, что при той или другой схеме упрочнения ППД компоненты тензора остаточных напряжений имеют аналогичный характер распределения, при этом осевые сжимающие напряжения при клиновых плитах больше по величине, что является благоприятным влиянием на циклическую долговечность заготовки при ее эксплуатации.

На **рис. 10** представлена глубина пластической деформации по радиусу цилиндра при разных значениях угла β , а на **рис. 11** поля распределения пластической деформации по поперечному сечению заго-

товки при $\beta = 45^\circ$.

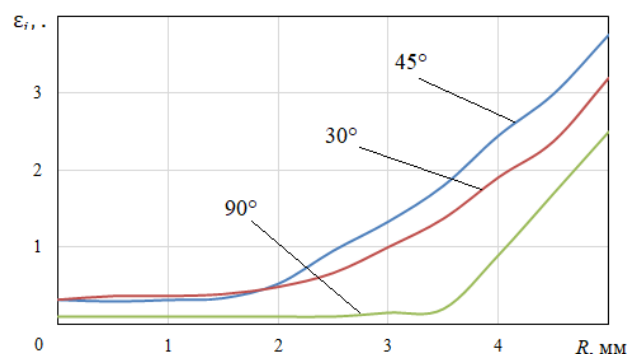


Рис. 10. Глубина пластической деформации по радиусу заготовки при разных значениях угла β
Fig. 10. Depth of plastic deformation along the radius of the workpiece at different values of the angle β

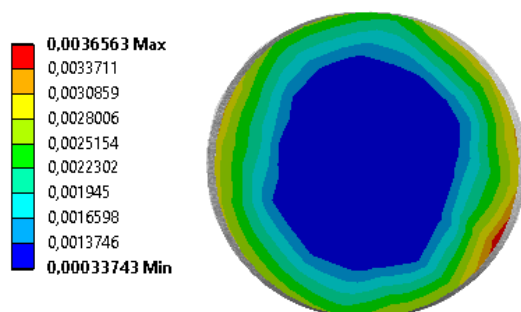


Рис. 11. Изополосы распределения интенсивности пластической деформации при $\beta = 45^\circ$
Fig. 11. Isobands of distribution of plastic deformation intensity at $\beta = 45^\circ$

Из рис. 10 следует, что глубина пластической деформации при упрочнении клиновыми плитами больше, чем при упрочнении прямоугольными ($\beta = 90^\circ$), что является положительным фактором, влияющим на качество процесса упрочнения. При $\beta = 45^\circ$ наблюдается равномерное распределение изополос интенсивности пластической деформации, величина которой снижается от поверхности к центру сечения заготовки (рис. 11).

Выводы

Таким образом, моделирование процесса упрочнения нежестких цилиндрических деталей ППД клиновыми плитами позволяет сделать следующие выводы:

1. Результаты исследования позволили выбрать рациональное значение угла клинового участка. Из всех рассмотренных случаев более равномерное распределение напряжения по длине заготовки наблюдается при $\beta = 45^\circ$. При таком значении угла максимальное временное напряжение в процессе упрочнения достигает величины меньше, чем предел прочно-

сти материала, что обеспечивает упрочнение без возникновения дефектов на поверхности заготовки.

2. Упрочнение клиновыми плитами с большим углом клина β (в данной работе 60°) приводит к локальному повышению напряжений, что может вызвать дефекты на поверхности заготовки и снизить эффективность процесса. Уменьшение угла β позволяет снизить концентрацию напряжений и вероятность образования дефектов.

3. При упрочнении заготовки плоскими плитами на поверхности возникает зона пластической деформации. Глубина пластической деформации в поперечном сечении заготовки зависит от геометрической формы рабочего инструмента. При этом глубина пластической деформации при упрочнении заготовки клиновыми плитами больше, чем прямоугольными плитами, то есть клиновидная форма плит дает больший эффект упрочнения.

Список источников

1. Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений / А.Г. Суслев [и др.]. М.: Машиностроение, 2006. 448 с.
2. Зайдес С.А., Ву К.Х. Влияние пространственной ориентации тороидального ролика на напряженно-деформированное состояние цилиндрической заготовки // Упрочняющие технологии и покрытия. 2024. Т. 20, № 11(239). С. 489-495.
3. Rahman Seifi, Kaveh Abbasi. Friction coefficient estimation in shaft/bush interference using finite element model updating // Engineering Failure Analysis. 2015, vol. 57, pp. 310-322.
4. Зайдес С.А., Буй М.З., Пономарев Б.Б. Правка локального участка цилиндрических деталей перед обкаткой гладкими плитами // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22, № 3. С. 71-80.
5. Effect of the Tool Path on Hardness Uniformity in an Annular Zone of X20Cr13 Steel Surface-Hardened by Friction Stir Processing / Kuznetsov V.P., Skorobogatov A.S., Kolumbaev E.A. et al. // Phys Mesomech 26. 2023. pp. 593-607.
6. Symonova A., Drahobetskyi V., Kulynych V. (). Enhancing Service Life and Durability of Machine Parts Through Surface Plastic Deformation // Advances in Design, Simulation and Manufacturing VII. DSMIE 2024. Lecture Notes in Mechanical Engineering / Ivanov, V., Trojanowska, J., Pavlenko, I., Rauch, E., Pitel, J. (eds) Springer, Cham. 2024. https://doi.org/10.1007/978-3-031-61797-3_29
7. Богатов А.А. Остаточные напряжения и разрушение металла // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2007. №10. С. 27-34.
8. Емельянов В.Н. Прецизионная правка валов поверхностным пластическим деформированием / В.Н. Емельянов // Машиностроитель. 2001. №1. С. 9-10.
9. Блюменштейн В.Ю., Махалов М.С. Расчетная модель остаточных напряжений упрочненного поверхностного слоя при размерном совмещенном обкатывании // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2008. № 5(69). С. 50-58.

10. Патент № 2827624 С1 Российская Федерация, МПК В21D 3/00, В24В 39/04. Способ правки и упрочнения цилиндрических деталей: № 2024106758: заявл. 15.03.2024; опубл. 30.09.2024 / С. А. Зайдес, М. З. Буй.
11. Патент № 2600302 С1 Российская Федерация, МПК В21Н 1/18. Устройство для обкатывания цилиндрических изделий плоскими инструментами: № 2015114157/02: заявл. 16.04.2015; опубл. 20.10.2016 / С. А. Зайдес, Д. Ф. Фам.
12. Матяш В. И. Математическое моделирование формообразования деталей класса нежестких валов / В.В. Максимов, А.В. Анкин, В.И. Матяш // Вестник машиностроения. 1997. №3. С. 27-30.
13. Modeling of Vibrational-Centrifugal Strengthening for Functional Surfaces of Machine Parts / Stupnytskyi, V., Kusi, Y., Dragašius, E., Baskutis, S., Chatys, R. // Advanced Manufacturing Processes V. InterPartner 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering / Tonkonogiy, V., Ivanov, V., Trojanowska, J., Oborskyi, G., Pavlenko, I. (eds) Springer, Cham. 2024. https://doi.org/10.1007/978-3-031-42778-7_21
14. Yuncai Zhaoa, Delang Guob, Fangping Hu. Finite element simulation of web falling during heavy rail roller straightening. *Procedia Earth and Planetary Science*. 2011, vol. 2, pp. 44–49.
15. Study on Large Plastic Deformation Mechanism of AlCo-CrFeNi2.1 Eutectic High-Entropy Alloys Prepared by Laser Additive Manufacturing / Zhang, X., Cui, Y., Cai, Y. et al. // J. of Materi Eng and Perform. 2024. <https://doi.org/10.1007/s11665-024-10438-1>
16. 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, 106711.
17. Zaides S.A., Fong D. Fam Roughness of Cylindrical Parts in Transverse Burnishing by Flat Plates // Russian Engineering Research. 2018, vol. 38, no. 12, pp. 921-925. DOI: 10.3103/S1068798X18120420.
5. Kuznetsov V.P., Skorobogatov A.S., Kolubaev E.A., et al. Effect of the Tool Path on Hardness Uniformity in an Annular Zone of X20Cr13 Steel Surface-Hardened by Friction Stir Processing. *Phys Mesomech*. 26, 593-607 (2023).
6. Symonova A., Drahobetskyi V., Kulynych V. (2024). Enhancing Service Life and Durability of Machine Parts Through Surface Plastic Deformation. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing VII. DSMIE 2024. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2024. https://doi.org/10.1007/978-3-031-61797-3_29.
7. Bogatov A.A. Residual stresses and metal failure. *Kuznetchno-shtampovoychnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem* [Forging and stamping production. Processing of materials by pressure], 2007;(10):27-34. (In Russ.)
8. Emelyanov V.N. Precision straightening of shafts by surface plastic deformation. *Mashinostroitel* [Mechanical engineer], 2001;(1):9-10. (In Russ.)
9. Blyumenshteyn V.Yu., Makhlov M.S. Calculation model of residual stresses of the hardened surface layer during dimensional combined rolling. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kuzbass State Technical University], 2008;(5(69)):50-58. (In Russ.)
10. Zaydes S.A., Bui M.Z. *Sposob pravki i uprochneniya tsilindricheskikh detaley* [Method of straightening and strengthening cylindrical parts]. Patent RF, no. 2827624, 2024.
11. Zaydes S.A., Fam D.F. *Ustroistvo dlia obkatyvaniia tsilindricheskikh izdelii ploskimi instrumentami* [Device for rolling cylindrical products with flat tools]. Patent RF, no. 2600302, 2016.
12. Maksimov V.V., Ankin A.V., Matyash V.I. Mathematical modeling of forming parts of the class of non-rigid shafts. *Vestnik mashinostroeniya* [Bulletin of Mechanical Engineering], 1997;(3):27-30. (In Russ.)
13. Stupnytskyi V., Kusi Y., Dragašius E., Baskutis S., Chatys R. Modeling of Vibrational-Centrifugal Strengthening for Functional Surfaces of Machine Parts. *Advanced Manufacturing Processes V. InterPartner 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. 2024. https://doi.org/10.1007/978-3-031-42778-7_21
14. Yuncai Zhaoa, Delang Guob, Fangping Hu. Finite element simulation of web falling during heavy rail roller straightening. *Procedia Earth and Planetary Science*. 2011;2:44-49.
15. Zhang X., Cui Y., Cai Y., et al. Study on Large Plastic Deformation Mechanism of AlCoCrFeNi2.1 Eutectic High-Entropy Alloys Prepared by Laser Additive Manufacturing. *J. of Materi Eng and Perform*. 2024. <https://doi.org/10.1007/s11665-024-10438-1>
16. 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*. 2024;65:106711.
17. Zaides S.A., Fong D. Fam Roughness of Cylindrical Parts in Transverse Burnishing by Flat Plates. *Russian Engineering Research*. 2018;38(12):921-925. DOI: 10.3103/S1068798X18120420.

References

1. Suslov A.G., et al. *Technologicheskoe obespechenie i povyshenie ekspluatatsionnykh svoystv detaley i ikh soedineniy* [Technological support and improvement of operational properties of parts and their connections]. Moscow: Mashinostroenie, 2006, 448p. (In Russ.)
2. Zaydes S.A., Vu K.H. The influence of spatial orientation of a toroidal roller on the stress-strain state of a cylindrical workpiece. *Uprochnyayushchiye tekhnologii i pokrytiya* [Hardening technologies and coatings], 2024;20(11(239)):489-495. (In Russ.)
3. Rahman Seifi, Kaveh Abbasi. Friction coefficient estimation in shaft/bush interference using finite element model updating. *Engineering Failure Analysis*. 2015;57:310-322.
4. Zaydes S.A., Bui M.Z., Ponomaryov B.B. Correction of a local section of cylindrical parts before rolling with smooth plates. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G. I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2024;22(3):71-80. (In Russ.)

Поступила 05.03.2025; принята к публикации 16.04.2025; опубликована 30.09.2025
Submitted 05/03/2025; revised 16/04/2025; published 30/09/2025

Зайдес Семен Азикович – доктор технических наук, профессор,
Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия.
Email: zsa@istu.edu. ORCID 0000-0001-9416-7749

Буй Мань Зунг – аспирант,
Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия.
Email: manhdungbuik52@gmail.com. ORCID 0009-0003-6390-105X

Semen A. Zaides – DrSc (Eng.), Professor,
Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.
Email: zsa@istu.edu. ORCID 0000-0001-9416-7749

Bui Manh Zung – Postgraduate Student,
Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.
Email: manhdungbuik52@gmail.com. ORCID 0009-0003-6390-105X