



УДК 621.787.4

DOI 10.17073/0368-0797-2026-3-294-304



Оригинальная статья

Original article

ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ ПРОЦЕССЕ ПРАВКИ И УПРОЧНЕНИЯ НЕЖЕСТКИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

С. А. Зайдес, Буй Мань Зунг

Иркутский национальный исследовательский технический университет (Россия, 664074, Иркутск, ул. Лермонтова, 83)

manhdungbuik52@gmail.com

Аннотация. В статье рассмотрено напряженно-деформированное состояние нежестких цилиндрических деталей при комбинированном процессе правки и упрочнении плоскими клиновыми плитами. Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения геометрической точности и эксплуатационной надежности длинномерных мало жестких валов, которые подвержены значительным деформациям в процессе изготовления и термообработки. Разработан новый способ для правки и упрочнения нежестких цилиндрических деталей типа валов и осей в одной технологической операции, предназначенной в основном для обработки деталей из пластичных металлов и сплавов. Цель работы заключается в определении допустимых геометрических значений искривленных цилиндрических деталей и рациональных технологических параметров процесса правки и упрочнения плоскими клиновыми плитами. В ходе исследования была разработана теоретическая модель, позволившая определить критические условия захвата и стабильного вращения цилиндрической заготовки между рабочими поверхностями плоских клиновых плит. На основании теоретического расчета определено допустимое значение исходного прогиба заготовки, которое не должно превышать 4 мм на длине 200 мм. Для верификации теоретических данных было проведено компьютерное моделирование в программном комплексе ANSYS. Использование метода конечных элементов позволило уточнить границы устойчивого протекания процесса. По результатам моделирования установлено, что для обеспечения прямолинейности оси заготовки без повреждения ее поверхности значение исходного прогиба не должно превышать 3,5 мм на длине 200 мм. Оценка распределения остаточных напряжений и пластических деформаций показала, что рациональная степень относительного обжатия находится в пределах 1,3 – 1,5 %. Полученные результаты могут быть использованы при разработке эффективных технологий обработки нежестких цилиндрических деталей, способствующих повышению их эксплуатационных характеристик и точности изготовления.

Ключевые слова: правка, упрочнение, напряженно-деформированное состояние, нежесткая цилиндрическая деталь, плоская клиновья плита, относительное обжатие, конечно-элементное моделирование

Для цитирования: Зайдес С.А., Буй М.З. Оценка напряженно-деформированного состояния при комбинированном процессе правки и упрочнения нежестких цилиндрических деталей. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2026;69(3):294–304.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2026-3-294-304>

EVALUATION OF STRESS–STRAIN STATE IN THE COMBINED PROCESS OF STRAIGHTENING AND STRENGTHENING OF NON-RIGID CYLINDRICAL PARTS

S. A. Zaides, Bui Manh Dung

Irkutsk National Research Technical University (83 Lermontova Str., Irkutsk 664074, Russian Federation)

manhdungbuik52@gmail.com

Abstract. The article examines the stress-strain state of flexible cylindrical parts during the combined process of straightening and strengthening with flat wedge plates. The relevance of the work is determined by the need to improve the geometric accuracy and operational reliability of long, low-rigid shafts subjected to significant deformations during manufacturing and heat treatment. The authors developed a new method for straightening and strengthening flexible cylindrical parts such as shafts and axles in a single technological operation. It is intended primarily for machining parts made of ductile metals and alloys. The objective of the study was to determine the permissible geometric values of curved cylindrical parts and rational technological parameters for the straightening and strengthening process with flat wedge plates. A theoretical model was developed during the study, which made it possible to determine the critical conditions for gripping and stable rotation of a cylindrical billet

between the working surfaces of flat wedge plates. Based on the theoretical calculation, the permissible value of the billet initial deflection was determined, which should not exceed 4 mm over a length of 200 mm. To verify the theoretical data, computer simulations were conducted using the ANSYS software package. Using the finite element method, the process's stable boundaries were clarified. The simulation results revealed that, to ensure the straightness of the billet axis without damaging the surface, the initial deflection should not exceed 3.5 mm over a length of 200 mm. An assessment of the distribution of residual stresses and plastic deformations revealed that the optimal relative reduction ratio is within the range of 1.3 – 1.5 %. The obtained results can be used in development of effective technologies for machining flexible cylindrical parts, contributing to improved performance and manufacturing accuracy.

Keywords: straightening, strengthening, stress–strain state, non-rigid cylindrical part, flat wedge plate, percent reduction, finite element modeling

For citation: Zaides S.A., Bui M.D. Evaluation of the stress–strain state in the combined process of straightening and strengthening of non-rigid cylindrical parts. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2026;69(3):294–304. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2026-3-294-304>

ВВЕДЕНИЕ

Нежесткие детали, изготовленные из конструкционных материалов, к которым относятся валы роторов, гребные валы, ходовые винты и пр., являются наиболее технологически сложными для механической обработки. Это ответственные детали, во многом определяющие ресурс и надежность технического изделия, требуемые эксплуатационные показатели которых обеспечиваются высокой точностью изготовления, эксплуатационной стабильностью размеров и качеством поверхностных слоев рабочих элементов [1–3]. Однако достижение данных высоких показателей сопряжено со значительными трудностями ввиду возникающих погрешностей обработки, которые обусловлены технологическими упругими и остаточными деформациями [4]. Поэтому обеспечение высокой точности нежестких валов, обусловленной пространственной погрешностью, является весьма сложной технологической задачей, решение которой зависит исключительно от возможности эффективного управления напряженно-деформированным состоянием заготовки в процессе обработки [5; 6].

Современное машиностроение предъявляет повышенные требования к точности геометрических параметров и надёжности конструктивных элементов, особенно в отношении длинномерных цилиндрических деталей, таких как валы, оси, штоки и направляющие. Эти элементы широко применяются в транспортной, авиационной, энергетической, станкостроительной и других отраслях промышленности. Однако в процессе их изготовления часто возникают начальные геометрические отклонения от прямолинейности, обусловленные остаточными напряжениями после механической и термической обработки, нарушениями условий хранения, либо деформацией при транспортировке [7–9]. Искривление деталей существенно осложняет дальнейшую обработку, снижает точность сборки и может приводить к вибрациям, неравномерному износу, снижению ресурса и выходу узлов из строя при эксплуатации [10; 11].

Существующие методы устранения прогиба, включая правку на прессах, ударную правку или термическую правку, во многих случаях не обеспечивают необходимой точности, требуют ручной настройки и не позволяют совместить процессы правки и повы-

шения прочности в одной технологической операции [12]. В этой связи особый интерес представляют методы поверхностного пластического деформирования (ППД), которые позволяют не только скорректировать геометрию детали, но и значительно улучшить её эксплуатационные характеристики за счёт формирования остаточных сжимающих напряжений упрочнённого слоя в приповерхностной зоне [13; 14].

В Иркутском национальном исследовательском техническом университете разрабатываются новые способы и устройства для правки и упрочнения нежестких цилиндрических деталей типа валов и осей. Способ правки и упрочнения в одной технологической операции, техническая новизна которого подтверждена патентом РФ на изобретение [15], предназначен в основном для обработки деталей из пластичных металлов и сплавов. Разработанные способы основаны на обкатке деталей плоскими плитами. Плоско-обкатные станы обладают рядом преимуществ: простота изготовления и невысокая стоимость рабочего инструмента, стабильное положение детали на плоскости инструмента, высокая стойкость рабочего инструмента и высокая производительность процесса. Поскольку рабочий инструмент выполнен в виде плоских клиновых плит, то можно совместить процессы правки и упрочнения в одной технологической операции и выправлять цилиндрические детали, искривленные в разных плоскостях. Такой геометрической формой рабочего инструмента можно упрочнять даже весьма тонкие цилиндрические детали типа валов и осей [16].

Цель работы: на основе анализа прямолинейности оси и напряженно-деформированного состояния заготовки определить допустимые геометрические значения искривленных цилиндрических деталей и рациональные технологические параметры процесса правки и упрочнения плоскими клиновыми плитами.

КОМБИНИРОВАННЫЙ СПОСОБ ПРАВКИ И УПРОЧНЕНИЯ ИСКРИВЛЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ НЕЖЕСТКИХ ДЕТАЛЕЙ

Схема разработанного способа правки и упрочнения искривленных нежестких цилиндрических деталей представлена на рис. 1.

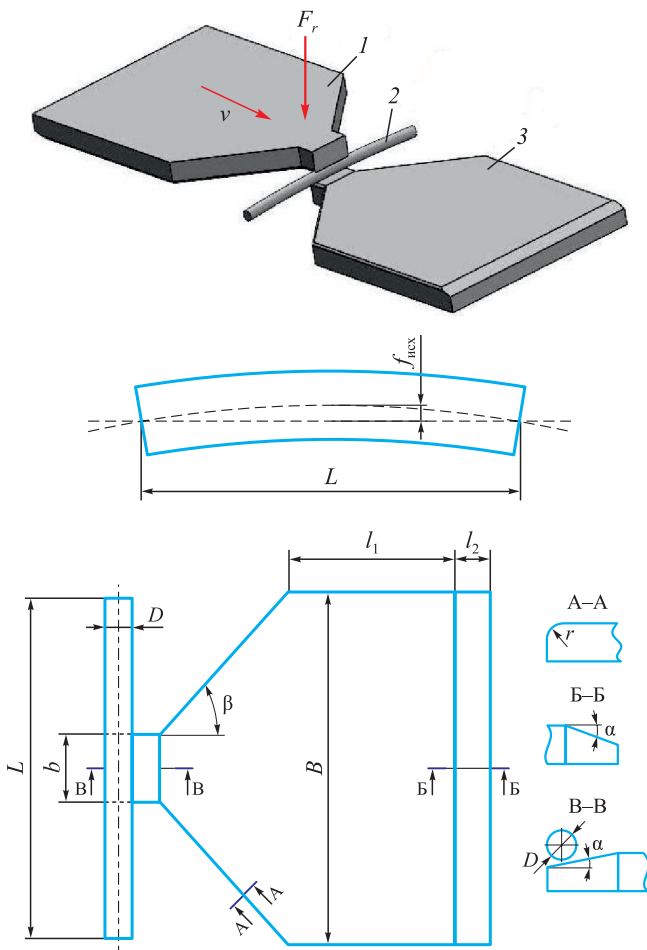


Рис. 1. Схема комбинированного процесса правки и упрочнения искривленных цилиндрических деталей плоскими клиновыми плитами:

1 – верхняя плита; 2 – заготовка; 3 – нижняя плита

Fig. 1. Schematic diagram of the combined process of straightening and strengthening of curved cylindrical parts using flat wedge plates: 1 – upper plate; 2 – billet; 3 – lower plate

Процесс правки и упрочнения искривленных цилиндрических деталей реализуется при помощи двух клиновидных плит, направленных узкой частью навстречу друг другу, одна из которых жестко закреплена, а другая перемещается в вертикальном и горизонтальном направлениях. Заготовка диаметром D и длиной L с исходным прогибом $f_{исх}$ устанавливается на заходный участок нижней плиты ширины b с углом подъема α , вогнутость при этом обращена к нижней плите. Со стороны верхней плиты на заготовку действует радиальная сила F_r для выправления локального участка заготовки. Далее верхняя плита перемещается в горизонтальном направлении со скоростью v . За счет контакта с верхней плитой и сил трения цилиндрическая заготовка получает вращательный момент, начинает поворачиваться вокруг своей оси и одновременно испытывает изгиб, направленный против начального искривления. Клиновидная форма плоских плит с углом β осуществляет постепенное выправление заготовки по всей длине.

На калибрующем участке длиной l_1 происходит выравнивание напряжений по всей длине заготовки, что обеспечивает необходимое качество процесса упрочнения поверхностным пластическим деформированием. После упрочнения заготовка переходит на выходной участок с длиной l_2 и углом наклона α . Во избежание концентрации напряжений по краям плит сделаны скругления радиусом r .

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ УСЛОВИЯ ВРАЩЕНИЯ ИСКРИВЛЕННОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ДЕТАЛИ НА ПЛОСКИХ КЛИНОВЫХ ПЛИТАХ

Для анализа условий, при которых вращение цилиндрической заготовки действительно начинается (а не происходит проскальзывание), был выполнен оценочный расчет момента сопротивления вращению. Вращение возникает за счет касательной силы трения между верхней плитой и искривленной заготовкой при ее горизонтальном перемещении. Кривизна заготовки является сопротивлением вращению на плитах. Однако если моменты, создаваемые трением $M_{тр}$ и радиальной силой M_{Fr} , меньше сопротивления вращению $M_{сопр}$, заготовка начнет скользить по поверхности плит, не поворачиваясь. Поскольку радиальная сила F_r действует на заготовку в вертикальном направлении, поэтому при вращении заготовки вокруг своей оси ею можно пренебречь. Условие вращающего момента можно выразить следующим условием:

$$M_{тр} \geq M_{сопр}. \quad (1)$$

На рис. 2 представлена схема силы трения, действующей на заготовку в процессе правки и упрочнения на клиновом участке.

Поскольку плоские плиты имеют клиновидную форму, контакт между ними и цилиндрической заготовкой не

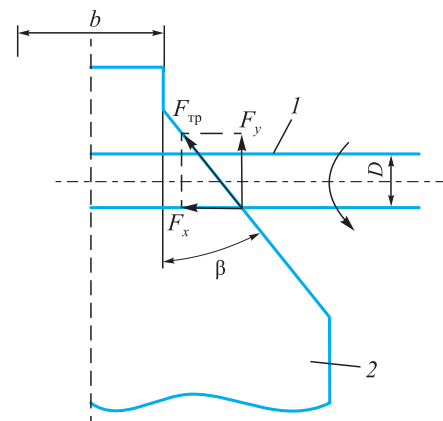


Рис. 2. Схемы трения между цилиндрической заготовкой (1) и плоской клиновидной плитой (2) в процессе правки

Fig. 2. Diagrams of friction between cylindrical billet (1) and flat wedge plate (2) during straightening

прямолинейный. При этом касательная составляющая трения будет направлена не только вдоль оси заготовки F_x , но и по окружности её поверхности F_y , которая создает вращающий момент. Тогда формула момента от силы трения будет следующая:

$$M_{\text{тр}} = F_y D = F_{\text{тр}} D \cos \beta = \mu F_{\text{тр}} D \cos \beta. \quad (2)$$

Момент сопротивления вращению возникает за счет искривления цилиндрической детали и определен по формуле [4]

$$M_{\text{сопр}} = EIk, \quad (3)$$

где F_r – радиальная сила, Н; μ – коэффициент трения между заготовкой и клиновыми плитами; D – диаметр заготовки, мм; β – угол развала клинового участка плит, град; E – модуль упругости материала, МПа; I – момент инерции поперечного сечения, мм⁴; k – начальная кривизна заготовки, мм⁻¹.

Значения начальной кривизны k и момента инерции поперечного сечения I для цилиндра можно принять как [17]:

$$k = \frac{8f_{\text{исх}}}{L^2}, \quad I = \frac{\pi D^4}{64}, \quad (4)$$

где $f_{\text{исх}}$ – начальное максимальное отклонение оси заготовки (исходный прогиб детали), мм; L – длина заготовки, мм.

Подставив уравнение (4) в (3), получим:

$$M_{\text{сопр}} = \frac{E\pi D^4 f_{\text{исх}}}{8L^2}. \quad (5)$$

Подставив уравнения (2) и (5) в условие (1), получим:

$$\mu F_r D \cos \beta \geq \frac{E\pi D^4 f_{\text{исх}}}{8L^2}. \quad (6)$$

Из уравнения (6) следует, что условие вращения заготовки действительно зависит от величины ее начальной кривизны. При увеличении начальной кривизны заготовки контакт между инструментом и ее поверхностью становится менее равномерным, а сопротивление изгибу возрастает. Это приводит к тому, что момент, передаваемый через силы трения, возможно не будет вызывать вращение детали. Вместо этого наблюдается проскальзывание на плоских плитах, что снижает эффективность правки. Таким образом, существует критическое значение начальной кривизны, выше которого разработанный метод становится неэффективным без увеличения нормальной силы или коэффициента трения. Преобразовав уравнение (6), получаем максимальное допустимое значение отклонения от оси заготовки (исходный прогиб):

$$f_{\text{исх}} \leq \frac{8\mu F_r L^2 \cos \beta}{E\pi D^3}. \quad (7)$$

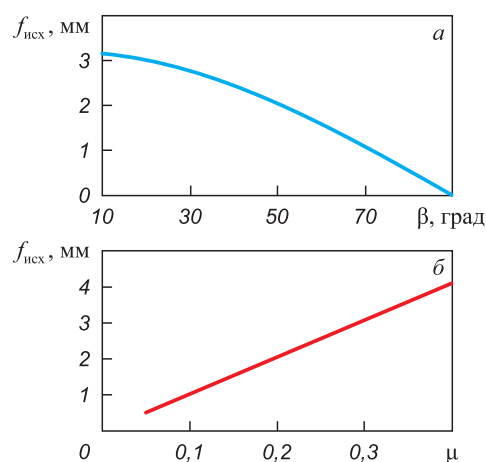


Рис. 3. Зависимость максимального исходного прогиба заготовки от угла клинового участка плит (а) и коэффициента трения (б)

Fig. 3. Dependence of the billet maximum initial deflection on the angle of plates wedge section (а) and on friction coefficient (б)

Согласно работе [18], предельное значение радиальной силы F_r для выправления центрального участка без повреждения поверхностного слоя заготовки определяется как

$$F_r \leq \frac{8I\sigma_T}{D^2} = \frac{\pi D^2 \sigma_T}{8}, \quad (8)$$

где σ_T – предел текучести исследуемого материала, МПа. Подставив уравнение (8) в (7), получим:

$$f_{\text{исх}} \leq \frac{\mu L^2 \sigma_T \cos \beta}{ED}. \quad (9)$$

На основе выражения (9) построим зависимости максимального исходного прогиба заготовки $f_{\text{исх}}$ от угла клинового участка плоских плит β и коэффициента трения μ между заготовкой и плитами для конструкционной стали Ст3 при постоянной длине и диаметре заготовки (рис. 3).

Из рис. 3 видно, что значение $f_{\text{исх}}$ находится в обратной зависимости от угла β клинового участка плоских плит и в прямой зависимости от коэффициента трения. Из теоретического расчета установлено, что максимальное значение исходного прогиба заготовки должно составлять не более 4 мм. При превышении этого значения вращение заготовки не будет происходить, а будет просто проскальзывание. Далее для оценки качества процесса правки и упрочнения проведено исследование с помощью компьютерного моделирования.

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРАВКИ И УПРОЧНЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ИСКРИВЛЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ

На основе приведенного выше расчета определено предельно допустимое отклонение оси заготовки, при

котором разработанный метод правки и упрочнения остается эффективным. Для оценки реального поведения заготовки в условиях взаимодействия с плоскими клиновыми плитами, а также для оценки напряженно-деформированного состояния заготовки, проведен ряд численных экспериментов в среде ANSYS. Применение численного моделирования является удобным методом представления сложного поведения материала и дает возможность выявить оптимальные параметры обработки без проведения дорогостоящих экспериментальных испытаний, а также предсказать потенциальные дефекты, возникающие при правке и упрочнении таких деталей [19].

Для моделирования использован модуль *ANSYS Transient Structural*, учитывающий контактное взаимодействие, трение и упругопластические свойства материала. Моделирование позволило определить, насколько эффективно устранение начальной кривизны, как распределяются остаточные напряжения, глубину упрочнения и минимальное обжатие, необходимое для достижения процесса правки.

Исследуемая заготовка представляет собой цилиндр длиной $L = 200$ мм и диаметром $D = 10$ мм, выполненный из конструкционной стали с линейным изгибом оси (одинарная кривизна). Искривление задано в одной плоскости, форма отклонения приближена к синусоидальному или дуговому профилю, что характерно для заготовок после термообработки, неравномерного охлаждения или внутренних напряжений. Величины исходного прогиба $f_{исх}$ заготовки заданы от 0,5 мм до 5 мм.

Материал заготовки – углеродистая конструкционная сталь Ст3 (упругопластический, модуль Юнга $E = 1,8 \cdot 10^5$ 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). Материал для плоских клиновых плит – конструкционная сталь высокой прочности и жесткости. При моделировании рабочий инструмент принят как абсолютно жесткое тело. Коэффициент трения для пары сталь–

сталь в зоне контакта цилиндрической заготовки с плитами $\mu = 0,1$. 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 $v = 10$ мм/с. Из работ [16; 20] взяты основные геометрические параметры инструмента: ширина заходного участка плит $b = 40$ мм, угол клинового участка плит $\beta = 45^\circ$. Конечно-элементная модель процесса правки и упрочнения цилиндрической искривленной детали плоскими клиновыми плитами показана на рис. 4.

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПРОЦЕССА ПРАВКИ И УПРОЧНЕНИЯ ППД ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЗАГОТОВКИ

Для оценки эффективности разработанного способа правки и упрочнения цилиндрической заготовки с исходным искривлением использован ряд параметров, позволяющих количественно и качественно охарактеризовать степень восстановления геометрической формы детали и уровень упрочнения после комбинированного процесса. Основные критерии исследования: остаточная кривизна оси детали, равномерность распределения интенсивности остаточных напряжений и пластических деформаций по длине и сечению заготовки, глубина упрочнения и т. д. [21].

Основным технологическим параметром процесса является степень относительного обжатия ($Q, \%$). На рис. 5 представлена геометрия центральной оси цилиндрической заготовки длиной $L = 200$ мм с исходным прогибом $f_{исх} = 1$ мм до и после правки с обжатием величиной $Q = 1,5 \%$.

Для оценки прямолинейности оси цилиндрических деталей использован показатель остаточной кривизны (λ), который оценивается как максимальное отклонение продольной оси детали от прямолинейного положения после завершения процесса правки и определяется как отношение максимального остаточного отклонения к длине детали ($\lambda = f_{ост}/L$) [22; 23]. Результат компьютерного моделирования процесса показал, что после правки заготовки длиной 200 мм с исходным

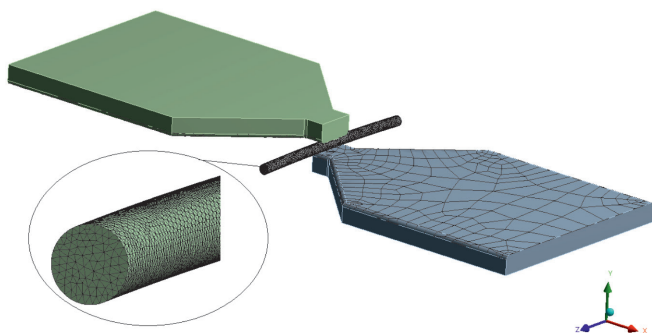


Рис. 4. Конечно-элементная модель процесса правки и упрочнения искривленной цилиндрической детали

Fig. 4. Finite element model of straightening and strengthening of curved cylindrical part

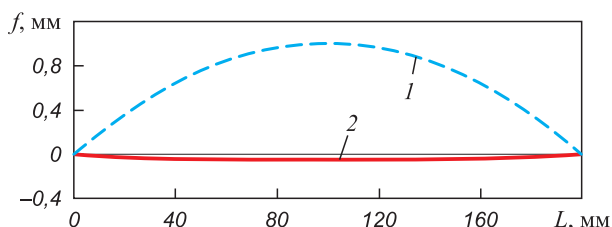


Рис. 5. Геометрия центральной оси цилиндрической заготовки до (1) и после (2) правки клиновыми плитами

Fig. 5. Geometry of central axis of cylindrical billet before (1) and after (2) straightening with wedge plates

прогибом 1 мм при величине относительного обжатия $Q = 1,5\%$ создается перегиб заготовки в сторону, противоположную начального искривления, и максимальный остаточный прогиб составляет 0,04 мм (рис. 5). В этом случае величина остаточной кривизны $\lambda = 0,2$ мм/м является допустимым значением для валов общего машиностроения [2].

Для оценки качества выправления оси проведены исследования заготовки с разными исходными прогибами. На рис. 6 показана зависимость остаточной кривизны λ от исходного прогиба заготовок $f_{исх}$ при одинаковых условиях процесса (постоянном относительном обжатии Q).

График позволяет определить область исходных прогибов, при которых правка эффективна (остаточная кривизна стремится к допустимому значению), и установить критическое значение исходного прогиба, выше которого правка не приводит к удовлетворительному результату. Из рис. 6 следует, что при фиксированном условии правки (постоянное обжатие) увеличение начального прогиба $f_{исх}$ приводит к возрастанию остаточной кривизны λ . При значении $f_{исх}$ больше 2 мм наблюдается остаточная кривизна больше 0,5 мм/м, что выше допустимого значения. Поэтому при правке заготовок с большими искривлениями для получения положительного результата необходимо увеличить величину относительного обжатия Q , которая определяется как отношение глубины вдавливания верхней плиты к диаметру заготовки D .

На рис. 7 показана зависимость величины относительного обжатия от исходного прогиба заготовки, необходимого для получения допустимой остаточной кривизны.

Из рис. 7 следует, что при увеличении исходного прогиба заготовки требуется все большая величина относительного обжатия для достижения допустимой остаточной кривизны ($\lambda \leq 0,5$ мм/м), что отражает повышенное сопротивление изгибу при больших начальных деформациях. В работе [20] установлено рациональное значение

относительного обжатия в процессе упрочнения, величина которого находится в диапазоне 1,3 – 1,5 %, что соответствует значению исходного прогиба заготовки $f_{исх} \leq 2$ мм (рис. 7). При чрезмерной величине обжатия возможно возникновение перенапряжения, которое сопровождается увеличением внутренних напряжений и риском локальных повреждений поверхности детали. Поэтому для оценки эффективности правки и упрочнения необходимо учитывать напряженно-деформированное состояние в процессе и после разгрузки в зависимости от величины относительного обжатия при разных геометрических формах цилиндрической заготовки.

Для оценки напряженно-деформированного состояния в разных точках цилиндрического образца после правки и упрочнения на клиновых плитах определены интенсивность временных и остаточных напряжений σ_i , интенсивность относительной пластической деформации ε_i с учетом главных компонент тензора напряжений и деформаций по осям координат.

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{2}(\sigma_z - \sigma_\varphi)^2 + (\sigma_\varphi - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_z)^2}, \quad (10)$$

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

По аналогии определяется интенсивность относительной пластической деформации ε_i по формуле

$$\varepsilon_i = \sqrt{\frac{2}{9}(\varepsilon_z - \varepsilon_\varphi)^2 + (\varepsilon_\varphi - \varepsilon_r)^2 + (\varepsilon_r - \varepsilon_z)^2}, \quad (11)$$

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

По результатам моделирования построена зависимость интенсивности максимальных временных и остаточных напряжений от степени относительного обжатия Q (рис. 8).

Из рис. 8 следует, что увеличение степени относительного обжатия соответствует росту максимальной

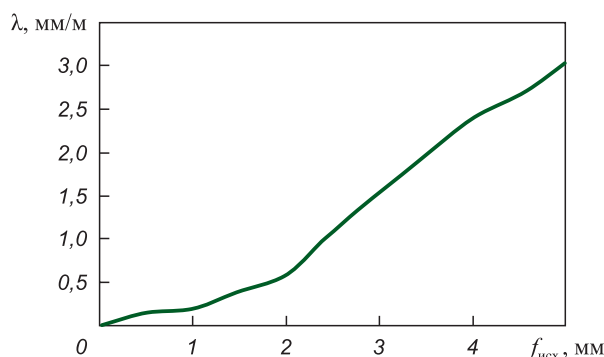


Рис. 6. Зависимость остаточной кривизны λ от исходного прогиба цилиндрической заготовки $f_{исх}$

Fig. 6. Dependence of residual curvature λ on the initial deflection of cylindrical billet $f_{исх}$

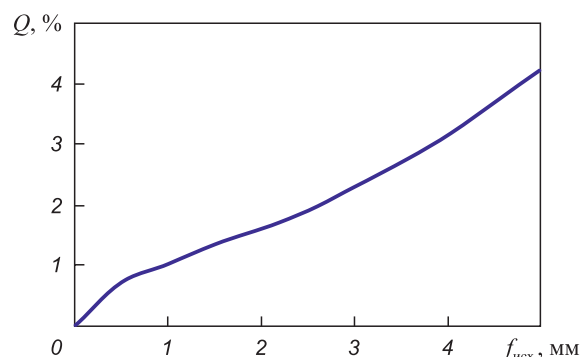


Рис. 7. Зависимость величины относительного обжатия Q от исходного прогиба заготовки $f_{исх}$

Fig. 7. Dependence of relative compression value Q on the initial deflection of the billet $f_{исх}$

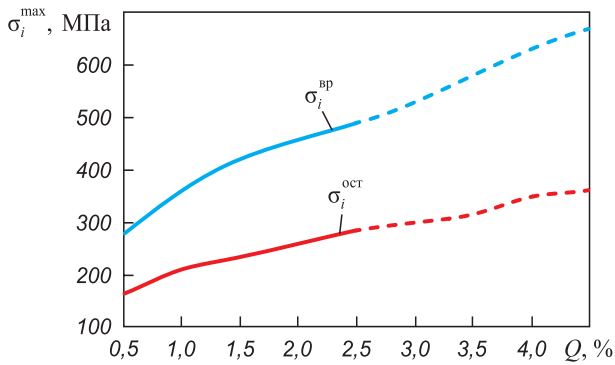


Рис. 8. Зависимость интенсивности максимальных временных и остаточных напряжений от степени относительного обжатия Q

Fig. 8. Dependence of intensity of maximum temporary and residual stresses on degree of relative compression Q

интенсивности временных и остаточных напряжений. При большом обжатии ($Q > 2,5\%$) максимальное временное напряжение превышает предел прочности материала ($\sigma_B = 490$ МПа), а остаточное напряжение превышает предел текучести ($\sigma_T = 255$ МПа) на 25 %, что характеризуется возможным повреждением поверхностного слоя. Такие режимы для механической обработки не рекомендуется. Сопоставляя результаты исследования на рис. 7 и 8, можно сделать вывод о том, что для обеспечения прямолинейности оси заготовки без повреждения ее поверхности значение исходного прогиба не должно превышать 3,5 мм.

На рис. 9 представлено распределение по радиусу поперечного сечения заготовки интенсивности остаточных напряжений и компонент тензора остаточных напряжений при разной степени относительного обжатия Q .

Как и для других схем упрочнения цилиндрических заготовок ППД, при упрочнении деталей плоскими клиновыми плитами необходимо исследовать остаточные напряжения в поверхностной зоне цилиндрической заготовки, так как при больших пластических деформациях они могут достигать величин предела пластичности материала. Максимальные значения интенсивности остаточных напряжений находятся на глубине 0,5 мм от поверхности цилиндра, и чем больше степень относительного обжатия, тем больше интенсивность остаточных напряжений. При большом обжатии ($Q = 2,5\%$) максимальная величина интенсивности напряжений превышает предел текучести материала на 25 %, что можно привести к повреждению детали (рис. 9, а). Компоненты тензора остаточных напряжений по радиусу цилиндра распределяются со знакопеременным характером. Радиальные остаточные напряжения являются растягивающими по всему сечению образца, имеют максимальное значение в центре цилиндра и снижаются в направлении поверхностного слоя. В зоне подповерхностного слоя радиальные остаточные напряжения довольно низкие, а на поверхности детали они равны нулю, что незначительно сказывается на величине интенсивности остаточных напряжений

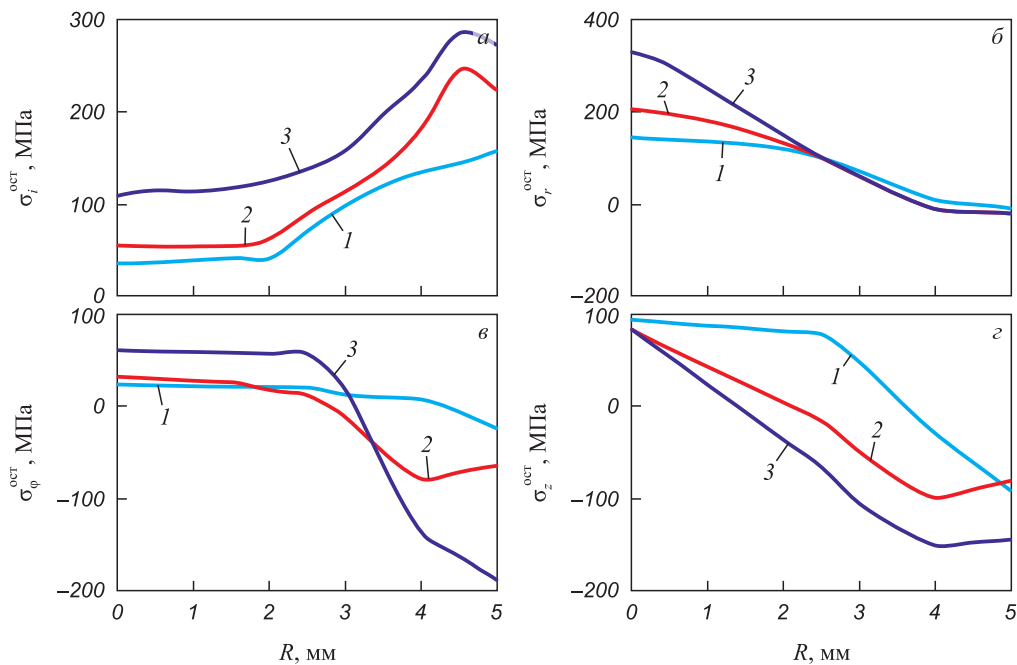


Рис. 9. Распределение по радиусу заготовки интенсивности остаточных напряжений $\sigma_i^{\text{ост}}$ (а), компонент тензора радиальных напряжений σ_r (б), тангенциальные σ_ϕ (в) и осевые σ_z (г) напряжения при разных степенях относительного обжатия Q : 1 – 0,5 %; 2 – 1,5 %; 3 – 2,5 %

Fig. 9. Distribution of residual stress intensity $\sigma_i^{\text{ост}}$ (a) and tensor components of radial σ_r (б), tangential σ_ϕ (в) and axial σ_z (г) over the billet radius at different degrees of relative compression Q : 1 – 0.5 %; 2 – 1.5 %; 3 – 2.5 %

(рис. 9, б). На поверхности деталей формируются сжимающие остаточные тангенциальные и осевые напряжения и переходят в растягивающие к центру поперечного сечения заготовки. При этом максимальная величина сжимающих остаточных напряжений находится в прямой зависимости от степени относительного обжатия.

На рис. 10 представлено распределение интенсивности остаточных напряжений по длине цилиндрических заготовок после обработки при разных степенях относительного обжатия Q .

Из рис. 10 видно, что при малой степени относительного обжатия ($Q = 0,5\%$) значения остаточных напряжений относительно низкие и распределяются они практически равномерно по длине детали, однако их уровень недостаточен для эффективного упрочнения. При средней величине обжатия ($Q = 1,5\%$) формируется устойчивое и достаточно равномерное остаточное напряженное состояние, разность значений остаточных напряжений составляет 15–20 МПа (7–8% от среднего значения напряжения), что соответствует оптимальному режиму правки. При высокой величине степени относительного обжатия ($Q = 2,5\%$) наблюдаются значительные колебания интенсивности остаточных напряжений по длине детали, что может быть связано с тем, что большая величина относительного обжатия приводит к усилению напряженного состояния в зоне деформации и, как следствие, к неравномерным остаточным напряжениям по длине детали. Равномерность распределения интенсивности остаточных напряжений вдоль длины детали оказывает решающее влияние на качество как правки, так и упрочнения. Однородное напряжённое состояние обеспечивает стабильную геометрию после разгрузки, исключает появление остаточного прогиба и формирует равномерно упрочнённый поверхностный слой. В противном случае наличие неравномерности и зон сниженной интенсивности напряжений может указывать на нестабильность технологического процесса, что снижает надежность деталей при эксплуатации [10; 24].

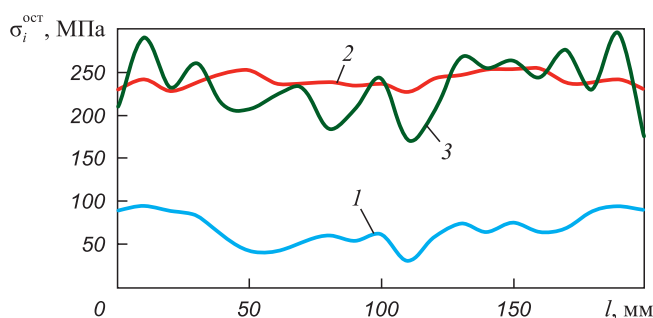


Рис. 10. Распределение интенсивности остаточных напряжений по длине детали при разных степенях относительного обжатия Q : 1 – 0,5%; 2 – 1,5%; 3 – 2,5%

Fig. 10. Distribution of residual stress intensity along the part length at different degrees of relative compression Q : 1 – 0.5%; 2 – 1.5%; 3 – 2.5%

На рис. 11 показаны изополосы распределения интенсивности остаточных напряжений по поперечному сечению и длине детали при средней степени относительного обжатия ($Q = 1,5\%$). Видно, что напряжение распределено достаточно равномерно как по длине, так и по поперечному сечению заготовки. При этом максимальное значение интенсивности остаточных напряжений (191 МПа) на 25% меньше предела текучести материала, что является убедительным доказательством эффективности процесса правки и упрочнения цилиндрических деталей.

Полученные результаты исследования распределения напряжений дают возможность более глубоко понять механизм и характер формирования остаточных напряжений в материале детали. Однако для комплексного анализа и полноценной оценки качества процесса упрочнения необходимо учитывать также и деформационные характеристики материала. Именно деформация непосредственно отражает степень изменения геометрии детали и позволяет оценить, в какой мере возникающие напряжения влияют на конечную форму и эксплуатационные свойства деталей. На рис. 12 показано распределение интенсивности относительных пластических деформаций по радиусу и длине деталей после обработки при разных степенях относительного обжатия Q .

Из рис. 12, а видно, что при $Q = 2,5\%$ формируется выраженная зона пластической деформации в поверхностных слоях, что соответствует эффективному упрочнению. При среднем обжатии ($Q = 1,5\%$) зона

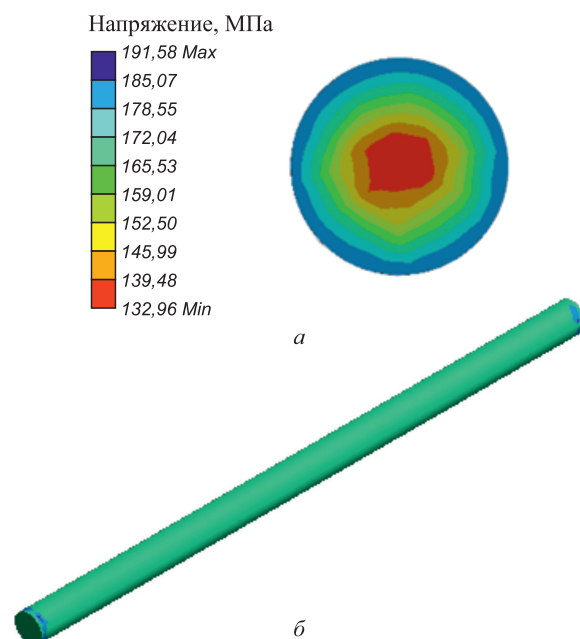


Рис. 11. Изополосы распределения интенсивности остаточных напряжений по поперечному сечению (а) и длине (б) детали при $Q = 1,5\%$

Fig. 11. Isobands of intensity distribution of residual stresses across the cross-section (a) and along the length (b) of the part at $Q = 1.5\%$

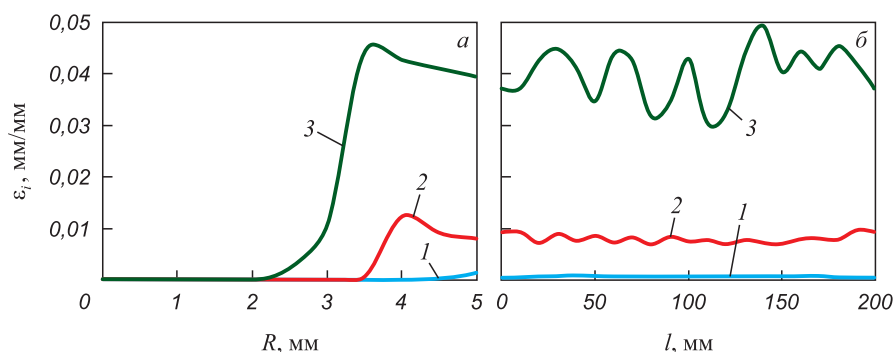


Рис. 12. Распределение интенсивности пластической деформации по сечению (а) и длине (б) детали при разных степенях относительного обжатия Q :
1 – 0,5 %; 2 – 1,5 %; 3 – 2,5 %

Fig. 12. Distribution of plastic deformation intensity across the section (а) and along the length (б) of the part at different degrees of relative compression Q :
1 – 0.5 %; 2 – 1.5 %; 3 – 2.5 %

упрочнения менее глубокая, но достаточно стабильная. При $Q = 0,5\%$ пластическая деформация практически отсутствует, что подтверждает низкую эффективность обработки. По длине заготовки (рис. 12, б) наилучшая равномерность относительной пластической деформации наблюдается при $Q = 1,5\%$, а при $Q = 2,5\%$ возникают колебания, указывающие на возможную неравномерность упрочнения. Таким образом, при степени относительного обжатия в пределах $Q = 1,5\%$ достигается компромисс между глубиной упрочнения и равномерностью распределения остаточных напряжений в заготовке, обеспечивая рациональный режим совмещения правки и упрочнения цилиндрических заготовок.

Выводы

В настоящей работе рассмотрен комбинированный процесс правки и поверхностного пластического деформирования цилиндрических заготовок, обладающих начальными отклонениями от прямолинейности.

По результатам теоретического анализа условий вращения искривленной заготовки между клиновыми плитами установлено максимальное значение исходного прогиба заготовки $f_{исх}$, которое не должно превышать 4 мм на длине 200 мм. При превышении этого значения вместо вращения заготовки между плитами будет происходить проскальзывание, которое исключает реализацию процесса правки и упрочнения.

На основе конечно-элементного моделирования процесса правки и упрочнения в среде ANSYS Workbench определены значения остаточной кривизны заготовки λ . Установлены зависимости остаточной кривизны λ от исходного прогиба $f_{исх}$, а также степени относительного обжатия. Результаты моделирования показали, что максимальная величина исходного прогиба для эффективности правки и упрочнения составляет 3,5 мм на длине 200 мм.

Определена рациональная величина степени относительного обжатия $Q = 1,5\%$, которая обеспечивает равномерность распределения остаточных напряжений и пластической деформации, а также качественное выправление искривленной детали без повреждения поверхностного слоя.

Исследование подтвердило перспективность совмещенного процесса правки и упрочнения ППД для устранения начальных прогибов и повышения прочности цилиндрических деталей. Полученные результаты могут быть использованы при разработке технологий упрочняющей правки в машиностроении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Antimonov A.M., Pushkareva N.B., Reshetnikov E.G. Cylindrical shell edges bending process technological features. In: *Proceedings of the 4th Int. Conf. on Industrial Engineering. ICIE 2018*. Springer; 2019:811–817. https://doi.org/10.1007/978-3-319-95630-5_84
2. Мураткин Г.В., Сарафанова В.А. Правка валов поверхностным пластическим деформированием с упругим изгибом заготовки в процессе обработки. *Вестник машиностроения*. 2020;(5):62–66. <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2020-5-62-66>
Muratkin G.V., Sarafanova V.A. Straightening of shafts by surface plastic deformation with elastic flexure of the workpiece. *Russian Engineering Research*. 2020;40(8):637–641. <https://doi.org/10.3103/S1068798X20080183>
3. Swic A., Gola A., Sobaszek L., Smidova N. 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;32: 1939–1951. <https://doi.org/10.1007/s10845-020-01733-4>
4. Xing S. Analytical modeling for mechanical straightening process of case-hardened circular shaft. *Applied Mechanics*. 2023;4(2):715–728. <https://doi.org/10.3390/applmech4020036>
5. Lu H., Zang Y., Zhang X., Zhang Y., Li L. A general stroke-based model for the straightening process of D-type

- shaft. *Processes*. 2020;8(5):528.
<https://doi.org/10.3390/pr8050528>
6. Димов Ю.В. Формирование остаточных напряжений при виброабразивной обработке деталей. *Вестник машиностроения*. 2024;103(10):821–828.
<https://doi.org/10.36652/0042-4633-2024-103-10-821-828>
Dimov Yu.V. Formation of residual stresses during vibroabrasive machining of parts. *Vestnik mashinostroeniya*. 2024;103(10):821–828. (In Russ.).
<https://doi.org/10.36652/0042-4633-2024-103-10-821-828>
 7. Li S., Wei C., Long Y. Deformation analysis of engineering reinforcement straightening based on Bauschinger effect. *International Journal of Steel Structures*. 2020;20:1–12.
<https://doi.org/10.1007/s13296-019-00264-w>
 8. Hwang Y.M., Lin Y.Q., Cheng G. Roller plunge schedule and roller design in straightening of metal H-beams. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2025;136:2245–2262.
<https://doi.org/10.1007/s00170-024-14942-5>
 9. Суслов А.Г. и др. Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений. Москва: Машиностроение; 2006:448.
 10. Мураткин Г.В., Сарафанова В.А., Суворов М.О. Повышение релаксационной стойкости материала поверхностным пластическим деформированием. *Технология металлов*. 2017;(7):19–26.
Muratkin G.V., Sarafanova V.A., Suvorov M.O. Improving on relaxation resistance of material by surface plastic straining methods. *Tekhnologiya metallov*. 2017;(7):19–26. (In Russ.).
 11. Liu C., Dong Z., Ma L., Hou X., Qiao N. Research on optimization of basic rail top bending prediction model. *Scientific Reports*. 2024;14:9844.
<https://doi.org/10.1038/s41598-024-60583-9>
 12. Шинкин В.Н. Расчет сил и моментов семироликовой правильной машины при предварительной правке стального листа. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2016;59(12):870–874.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2016-12-870-874>
Shinkin V.N. Calculation of steel sheet's curvature under preliminary flattening on the seven-roller straightening machine. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2016;59(12):870–874. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2016-12-870-874>
 13. Безязычный В.Ф. Влияние технологических условий обработки на глубину наклепа в поверхностном слое детали при обработке лезвийным инструментом. *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2019;15(8(176)):348–354.
Bezazychnyi V.F. Effect of technological processing conditions on cold-work hardening depth in surface layer of part at machining by blade tool. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*. 2019;15(8(176)):348–354. (In Russ.).
 14. Lammi C.J., Lados D.A. Effects of residual stresses on fatigue crack growth behavior of structural materials: Analytical corrections. *International Journal of Fatigue*. 2008;33(7): 858–867. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2011.01.019>
 15. Пат. № 2827624 С1 РФ. Способ правки и упрочнения цилиндрических деталей / С.А. Зайдес, М.З. Буй; заявлено 15.03.2024; опубликовано 30.09.2024.
 16. Зайдес С.А., Буй М.З. Влияние геометрических параметров цилиндрической заготовки на напряженно-деформированное состояние при выправлении локального участка гладкими плитами. *Технология металлов*. 2025;(3):28–38.
<https://doi.org/10.31044/1684-2499-2025-0-3-28-38>
Zaides S.A., Bui M.Z. Effect of geometrical parameters of cylindrical workpiece on stress-strain state when straightening of local area with flat plates. *Tekhnologiya metallov*. 2025;(3):28–38. (In Russ.).
<https://doi.org/10.31044/1684-2499-2025-0-3-28-38>
 17. Sun J., Li K., Sun M., Lu X., Peng Y. Longitudinal profiled plate straightening process based on curvature integral method. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2021;28:291–302.
<https://doi.org/10.1007/s42243-020-00538-2>
 18. 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;22(3):71–80.
<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-3-71-80>
Zaides S.A., Bui M.Z., Ponomarev B.B. Straightening of a local section of cylindrical parts before rolling with smooth plates. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2024;22(3):71–80. (In Russ.).
<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-3-71-80>
 19. Meng Q., Zhai R., Fu P., Zhang Y., Zhao J. Springback analysis of rotary bending considering strain paths. *Journal of Materials Processing Technology*. 2023;315:117930.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2023.117930>
 20. Зайдес С.А., Буй М.З. Определение напряженного состояния в очаге деформации при обкатке заготовки из углеродистой стали на локальном участке. *Черные металлы*. 2025;(4):41–47. <https://doi.org/10.17580/chm.2025.04.07>
Zaides S.A., Bui M.Z. Determination of the stress state in the deformation zone when rolling rotation of a carbon steel workpiece at a local site. *Chernye Metally*. 2025;(4):41–47. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/chm.2025.04.07>
 21. Shin J.H., Kim S.W., Yoon H.S. A stroke model for straightening partially heat-treated ball screws with complex mechanical properties. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2024;25:1875–1884.
<https://doi.org/10.1007/s12541-024-01012-9>
 22. Мураткин Г.В., Котова И.В. Критерии изгибной жесткости стержневых деталей. *Ремонт, восстановление, модернизация*. 2006;(2):42–45.
Muratkin G.V., Kotova I.V. Criteria for bending rigidity of rod parts. *Remont, vosstanovlenie, modernizatsiya*. 2006;(2):42–45. (In Russ.).
 23. Yi G., Wang Y., Liu X., Wang Ch. Multi-roll levelling for wave defects of metal sheets based on the beam-membrane method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019;105:4783–4795.
<https://doi.org/10.1007/s00170-019-04615-z>
 24. Niu T., Luo Y., Chen F., Baddour N., Li Ch., Peng B. Investigation of rotary straightening process for the rollers of planetary roller screw. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2025;47:116.
<https://doi.org/10.1007/s40430-025-05434-y>

Сведения об авторах

Information about the Authors

Семен Азикович Зайдес, д.т.н., профессор кафедры материаловедения, сварочных и аддитивных технологий, Иркутский национальный исследовательский технический университет

ORCID: 0000-0001-9416-7749

E-mail: zsa@istu.edu

Мань Зунг Буй, аспирант кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств, Иркутский национальный исследовательский технический университет

ORCID: 0009-0003-6390-105X

E-mail: manhdungbuik52@gmail.com

Semen A. Zaides, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair of Materials Science, Welding and Additive Technologies, Irkutsk National Research Technical University

ORCID: 0000-0001-9416-7749

E-mail: zsa@istu.edu

Manh Dung Bui, Postgraduate of the Chair of Technology and Equipment for Mechanical Engineering Production, Irkutsk National Research Technical University

ORCID: 0009-0003-6390-105X

E-mail: manhdungbuik52@gmail.com

Поступила в редакцию 29.12.2025

После доработки 15.01.2026

Принята к публикации 03.04.2026

Received 29.12.2025

Revised 15.01.2026

Accepted 03.04.2026