

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

УДК 621.982.44

DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-3-71-80

**ПРАВКА ЛОКАЛЬНОГО УЧАСТКА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ
ПЕРЕД ОБКАТКОЙ ГЛАДКИМИ ПЛИТАМИ**

Зайдес С.А., Буй М.З., Пономарев Б.Б.

Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

Аннотация. Актуальность работы. Разнообразные нежесткие цилиндрические детали типа валов и осей используют при создании транспортных, сельскохозяйственных, землеройных и других машин. При изготовлении, ремонте, эксплуатации, а в некоторых случаях и при хранении такие детали меняют свою геометрическую форму и размеры, то есть искривляются. Проблемы, связанные с искривлением нежестких деталей, возникают уже на этапе их изготовления. Поэтому на практике применяют неоднократные операции правки для достижения правильной геометрической формы деталей машин. В Иркутском НИТУ разработан способ правки и упрочнения нежестких деталей, основанный на поперечной обкатке гладкими плитами. Однако для реализации этого способа правки необходимо сначала выправить небольшой центральный участок заготовки, при этом сохраняя форму ее поперечного сечения. **Цель работы.** Определить напряженно-деформированное состояние на ограниченном участке цилиндрической заготовки для определения качества правки, параметров процесса и геометрического искажения поперечного сечения заготовки. **Используемый метод.** С помощью программного обеспечения для 3D-проектирования (Solid work 2019) и вычислительного моделирования (Ansys workbench 19.2) построена модель процесса деформирования центральной части заготовки перед правкой и выполнен расчет величины радиальной силы, необходимой для выправления искривленной заготовки на локальном участке. **Результаты.** На основе анализа результатов конечно-элементного моделирования установлена величина радиальной силы, равная 600 Н, для выправления цилиндрической заготовки из стали 3 диаметром $D = 10$ мм, длиной $l = 200$ мм с исходным прогибом $f_0 = 0,5$ мм на центральном участке шириной 20 мм. При таком значении радиальной силы не нарушается геометрическая форма поперечного сечения заготовки и максимальное значение напряжений в поперечном сечении меньше предела текучести материала, что обеспечивает процесс дальнейшей ее обкатки между гладкими плитами.

Ключевые слова: радиальная сила, искривленный вал, прогиб, степень относительного обжатия, напряженно-деформированное состояние, интенсивность напряжений, упругопластическая деформация, правка, плоские плиты

© Зайдес С.А., Буй М.З., Пономарев Б.Б., 2024

Для цитирования

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. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-3-71-80>



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

STRAIGHTENING A LOCAL AREA OF CYLINDRICAL PARTS BEFORE ROLLING WITH SMOOTH PLATES

Zaides S.A., Bui M.D., Ponomarev B.B.

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. Relevance. A variety of non-rigid cylindrical parts such as shafts and axles are used to manufacture transport, agricultural, earth-moving and other machines. Manufacturing, repair, operation, and in some cases storage of such parts result in changes in their geometric shape and dimensions, that is, they become bent. Problems associated with bending of non-rigid parts arise already at the stage of their manufacturing. Therefore, in practice, repeated straightening operations are used to achieve the correct geometric shape of machine parts. Irkutsk National Research Technical University developed a method for straightening and strengthening non-rigid parts based on transverse rolling with smooth plates. However, to implement this straightening method, at first it is necessary to straighten a small central section of the workpiece, while maintaining the shape of its cross-section. **Objectives.** The research is aimed at determining the stress and strain state in a limited area of a cylindrical workpiece to assess the quality of straightening, process parameters and geometric distortion of the cross section of the workpiece. **Methods Applied.** Using 3D design software (Solidworks 2019) and computational modeling (Ansys Workbench 19.2), the authors built a model of the deformation process of the workpiece central part before straightening and calculated radial force to straighten the curved workpiece in a local area. **Results.** Having analyzed the results of finite element modeling, the authors established that radial force was 600 N for straightening a cylindrical workpiece made of steel 3 with diameter D of 10 mm, length l of 200 mm at initial deflection f_0 of 0.5 mm in the central area, 20 mm wide. This value of radial force does not entail defects of the geometric shape of the workpiece cross section and the maximum value of stresses in the cross section is less than yield strength of the material, ensuring the process of its downstream rolling with smooth plates.

Keywords: radial force, curved shaft, deflection, percentage reduction, stress and strain state, stress intensity, elastoplastic deformation, straightening, smooth plates

For citation

Zaides S.A., Bui M.D., Ponomarev B.B. Straightening a Local Area 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, vol. 22, no. 3, pp. 71-80. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-3-71-80>

Введение

В настоящее время нежесткие цилиндрические детали типа валов и осей составляют большую номенклатуру среди всех видов изделий, которые используются в авиационной, автомобильной, сельскохозяйственной, горнорудной и бытовой технике [1-3]. Во время эксплуатации, транспортирования, а также при хранении таких деталей происходит нарушение их геометрической формы и размеров ввиду внешнего механического и температурного воздействия, в результате которого нарушается работоспособность машин и механизмов. Особенно это касается нежестких деталей, у которых соотношение длины к диаметру превышает 10 и более раз. Как правило, вследствие искривления деталей максимальный прогиб может достигать 5-7 мм и более [4, 5].

Для восстановления геометрической формы цилиндрических деталей с большим прогибом традиционные способы правки исчерпали свои технологические возможности, так как при обработке нежестких цилиндрических деталей с малыми диаметрами (от 5 до 15 мм) обычно происходит нарушение прямолинейности ввиду воздействия одностороннего радиального давления [6, 7].

Не менее важной проблемой является механическая обработка нежестких деталей машин. В современном машиностроении достаточно эффективно применяют различные способы отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием (ППД) для получения благоприятного напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя деталей, а также для достижения более высокого качества изделий. Широкое применение данного метода обработки объясняется его техническими достоинствами (простотой реализации, сравнительно высокой производительностью, универсальностью, стойкостью и надежностью рабочего инструмента) [8, 9]. Но при упрочнении деталей малых размеров и малой жесткости тоже имеют место проблемы, связанные с сохранением их прямолинейной формы, поскольку радиальная внешняя нагрузка от деформирующего инструмента вызывает искривление изделий.

Таким образом, при механической обработке деталей малой жесткости возникают две важные проблемы: это правка деталей и их упрочнение. Одним из путей решения вышеизложенных проблем является восстановление формы искривленных цилиндри-

ческих деталей за счет создания уравновешенного равномерного радиального давления для формирования в поверхностном слое напряженного состояния, которое позволяет повысить и стабилизировать физико-механические свойства, а также эксплуатационные характеристики изделий машиностроения [4, 10, 11].

В Иркутском национальном исследовательском техническом университете разрабатываются новые способы 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 [12], предназначен в основном для обработки деталей из пластичных металлов и сплавов. Заготовки таких деталей имеют искривленную форму, причем в разных плоскостях, и выправлять их эффективно известными способами правки не представляется возможным.

Предлагаемый способ обработки основан на обкатке деталей гладкими плитами. Процесс включает в себя предварительное упругопластическое деформирование и правку с одновременной отделочно-упрочняющей обработкой поверхностным пластическим деформированием. Чтобы осуществить такой процесс, необходимо сначала выправить центральный участок заготовки для последующей ее обкатки гладкими плитами. Качество такой операции зависит от напряженного состояния в заготовке, которое должно обеспечить и процесс выправления искривленного участка, и минимальное искажение цилиндрической формы поперечного сечения самой заготовки, так как в противном случае обкатку невозможно будет реализовать, поскольку вместо процесса качения произойдет процесс скольжения между заготовкой и плитами [5, 7].

Цель исследования заключается в определении напряженно-деформированного состояния на ограниченном участке цилиндрической заготовки для определения качества правки, параметров процесса и геометрического искажения поперечного сечения заготовки. В работе рассмотрена методика правки локального участка цилиндрической детали с конкретными геометрическими и физико-механическими свойствами.

Конечно-элементная модель процесса правки искривленных валов плоскими плитами

Схема процесса правки центральной части заготовки представлена на рис. 1. Заготовку 2 вогнутой стороной устанавливают на нижнюю плиту 3 шириной b . Величина максимального прогиба в центральном сечении заготовки относительно нижней плиты обозначена f_1 . Этот прогиб в процессе правки необходимо устранить за счет приложения некоторой радиальной силы F к верхней плите, при этом цилиндрическая форма заготовки практически не должна измениться.

Для исследования напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя при упрочнении различными способами ППД и для определения максимальной интенсивности напряжений успешно применяется компьютерная программа моделирования, сущность которой заключается в использовании метода конечных элементов. Одной из известных и широко используемых программ, эффективно реализующих данный метод, является программа ANSYS [13, 14], которая и была использована в данной работе. Для проведения расчетов при статическом нагружении цилиндрической заготовки радиальной силой построена геометрическая модель для работы в программе ANSYS.

Характеристики образца: в качестве заготовки был использован цилиндр диаметром $D = 10$ мм, длиной $l = 200$ мм с исходным прогибом $f_0 = 0,5$ мм, материал образца – сталь 3 – упругопластический, 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 $\sigma_B = 490$ МПа, модуль упрочнения $E_T = 1,45 \cdot 10^3$ МПа). В качестве материала, используемого для плоских плит, применена конструкционная сталь высокой прочности. При моделировании рабочий инструмент принят как абсолютно жесткое тело. Коэффициент трения скольжения в зоне контакта заготовки с плитами $f = 0,1$.

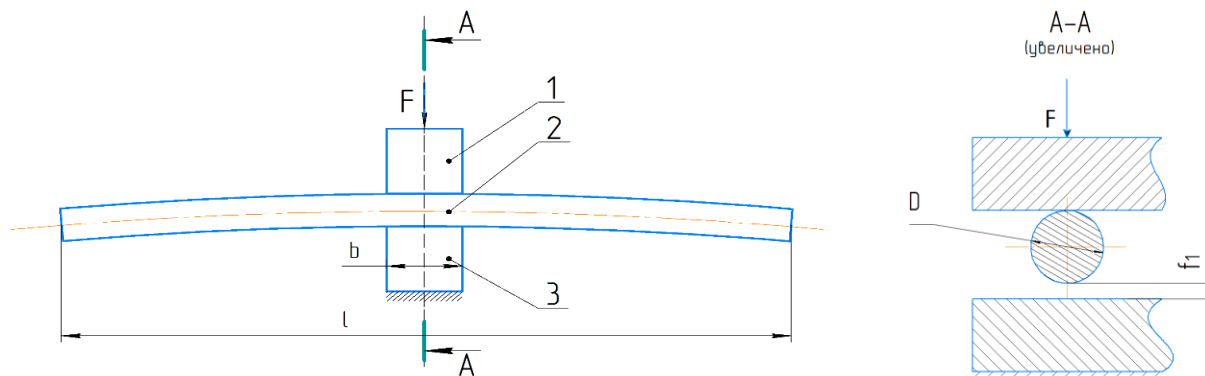


Рис. 1. Схема правки центрального участка искривленного вала гладкими плитами:

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

Fig. 1. Diagram of straightening the central section of a curved shaft with smooth plates:

1 is a top plate; 2 is a workpiece; 3 is a bottom plate

Для формирования конечно-элементной сетки при моделировании их формы были взяты из справочника использования программы ANSYS 19.1 с учетом механического взаимодействия заготовки из стали с абсолютно жестким телом (для заготовки использованы конечные элементы тетраэдрического типа, для двух плоских плит – прямоугольного типа). Сетка использовалась с постоянным размером (в нашем случае 0,5 мм) и одного типа по всему объему заготовки.

Для определения максимального прогиба f_1 на участке контакта заготовки с нижней плитой использована формула, полученная по теореме Пифагора:

$$f_1 = R - \frac{1}{2} \sqrt{4R^2 - b^2}, \quad (1)$$

где b – ширина плоских плит, мм; R – радиус кривизны искривленного вала, мм.

Для указанных выше размеров заготовки и ширине плоских плит, равных 20 мм, максимальный прогиб на участке контакта заготовки с гладкими плитами составляет $f_1 = 0,05$ мм.

После приложения к заготовке радиальной силы, которая направлена перпендикулярно к контактной площадке, ее поперечное сечение сместится вниз к нижней плите (см. рис. 1). Расстояние между плитами при этом станет меньше исходного диаметра цилиндра на величину абсолютного обжатия. Отношением величины абсолютного обжатия к первоначальному диаметру сечения заготовки представляет собой степень относительного обжатия Q , которая определяется по формуле [2, 11]

$$Q = \frac{D - d}{D} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где D – начальный диаметр заготовки, мм; d – высота поперечного сечения заготовки после приложения радиальной силы, мм.

Для оценки влияния степени относительного обжатия на напряженно-деформированное состояние заготовки к верхней плите были приложены различные значения радиальной силы и определены величины перемещения верхнего и нижнего контура центрального поперечного сечения заготовки с помощью программы моделирования ANSYS. Исходные значения радиальной силы для расчета определены в соответствии с условием [2, 4]

$$F < \frac{4I_x \sigma_T}{R}, \quad (3)$$

где σ_T – предел текучести материала заготовки, МПа; I_x – момент инерции поперечного сечения заготовки, мм⁴; R – радиус поперечного сечения заготовки, мм.

Для заданных параметров заготовки определено предельное значение радиальной силы ($F < 1100$ Н) для выправления ее центральной части.

На рис. 2 показана схема осадки искривленной заготовки между гладкими плитами. На рис. 2, а показано начальное положение центрального поперечного сечения заготовки, имеющей максимальный прогиб $f_1 = 0,05$ мм. Вследствие кривизны заготовка опирается по краям нижней плиты, а в центральной части остается прогиб (зазор) величиной f_1 . На рис. 2, б показана схема перемещения и деформации поперечного сечения заготовки под действием радиальной силы F . Плоскость касания верхней плиты (А) с заготовкой в процессе нагружения перемещается на некоторую величину x_1 , а плоскость, проходящая через нижний контур поперечного сечения заготовки (Б), перемещается на величину x_2 . Вследствие воздействия радиальной силы F заготовка деформируется и в зоне контакта с плитами сжимается на величины a_1 и a_2 (см. рис. 2, б). Если бы заготовка была изготовлена из абсолютно жесткого тела, то $x_1 = x_2$. Но в данном случае рассматриваются детали из пластичных материалов, поэтому $x_1 \neq x_2$. Задача исследования заключается в том, чтобы установить зависимость между этими перемещениями и найти оптимальную величину радиальной силы для устранения начального прогиба, при этом не нарушая геометрической формы поперечного сечения заготовки.

После воздействия радиальной силы диаметр заготовки становится меньше на величину абсолютного обжатия ($D - d$), которая определяется в зависимости от перемещений x_1 и x_2 и прогиба f_1 по формуле

$$D - d = x_1 + x_2 - 2 \cdot f_1. \quad (4)$$

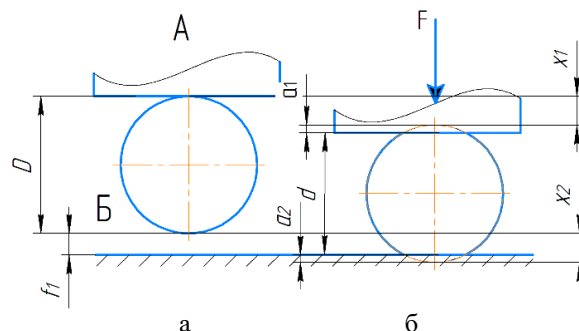


Рис. 2. Схема перемещения и деформации поперечного сечения заготовки при силовой осадке плоскими плитами: а – начальное положение поперечного сечения; б – положение поперечного сечения после приложения радиальной силы

Fig. 2. Diagram of movement and deformation of the cross section of the workpiece during loaded upsetting with flat plates: а is an initial position of the cross section; б is a position of the cross section after applying radial force

В табл. 1 представлены значения перемещений и деформаций центрального поперечного сечения заготовки после радиального воздействия плоских плит. Для исследования величины силы F в более широком диапазоне в программе ANSYS заданы ее значения от 400 до 1100 Н. На основе полученных результатов выполнен расчет величины абсолютного обжатия, а также степени относительного обжатия (см. табл. 1).

Таблица 1. Результаты деформаций и перемещений заготовки в зависимости от величины радиальной силы F
 Table 1. Results of deformation and movements of the workpiece depending on radial force F

Величина радиальной силы F , Н	Перемещение плоскости А заготовки x_1 , мм	Перемещение плоскости Б заготовки x_2 , мм	Величина абсолютного обжатия $D - d$, мм	Степень относительного обжатия Q , %
400	0,037	0,026	0	0
500	0,048	0,035	0	0
600	0,056	0,051	0,007	0,07
700	0,065	0,058	0,023	0,23
800	0,079	0,064	0,043	0,43
900	0,085	0,068	0,053	0,53
1000	0,097	0,07	0,067	0,67
1100	0,13	0,074	0,104	1,04

Из табл. 1 следует, что при радиальной силе, равной 600 Н, что соответствует абсолютному обжатию заготовки величиной 0,007 мм, удается устранить начальный прогиб $f_1 = 0,05$ мм на центральном участке шириной b . Дальнейшее повышение радиальной силы от 650 до 1100 Н влияет уже на изменение формы (круга) заготовки, то есть происходит ее сжатие, что влияет на способность заготовки к дальнейшему перемещению между плитами.

На рис. 3 показаны зависимости перемещения касательных линий x_1 и x_2 к заготовке с плитами и степени относительного обжатия от величины радиальной силы. Анализируя рис. 3, можно сделать вывод о том, что с увеличением усилия от 400 до 1100 Н величины перемещений плавно возрастают. Расстояние между сечением заготовки и нижней плитой f_1 исчезает при силе 600 Н и дальнейшее ее повышение приводит к деформации заготовки в зоне соприкосновения ее с плитами. Величина деформации в месте контакта заготовки с верхней плитой значительно увеличивается при радиальной силе более 1000 Н (см. табл. 1). Вследствие воздействия радиальной силы в зоне контакта плит с заготовкой создается интенсивность напряжений. Если величина этих напряжений превышает предел текучести материала заготовки в процессе обработки, то происходит значительное отклонение геометрической формы цилиндрических деталей [15].

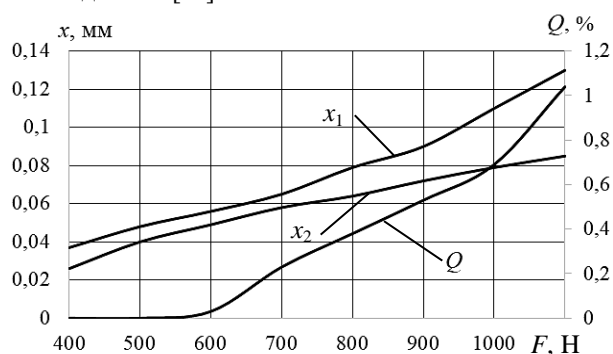


Рис. 3. Зависимости величины перемещений x_1 и x_2 и степени относительного обжатия от величины радиальной силы F

Fig. 3. Dependences between displacements x_1 and x_2 and percentage reduction, and radial force F

Влияние степени относительного обжатия на напряженное состояние заготовки

В теории и практике обработки металлов давлением известно, что радиальное воздействие на цилиндрическую заготовку, особенно при обкатке, может привести к формированию в осевой зоне тела значительных растягивающих напряжений, которые вызывают повреждения материала [16].

Для оценки напряженного состояния в разных точках цилиндрических образцов определена интенсивность напряжений по Мизесу (von – Mises) и компоненты напряжений по осям O_z (осевые σ_z), O_x (радиальные σ_r), O_y (тангенциальные σ_ϕ). Временные напряжения возникают при непосредственном воздействии внешних сил от действия рабочего инструмента, и они оказывают влияние на энергосиловые характеристики процесса и глубину упрочненного слоя, давление в зоне деформации, а также оказывают влияние на прочность и износостойкость деформирующего инструмента. Напряженное состояние цилиндрической детали по Мизесу при использовании главных напряжений определяется по интенсивности напряжений σ_i [8, 17]:

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot [(\sigma_z - \sigma_\phi)^2 + (\sigma_\phi - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_z)^2]}. \quad (5)$$

На рис. 4 представлено влияние величины радиальной силы на интенсивность напряжений в цилиндрической заготовке.

Результаты моделирования показали (см. рис. 4), что при увеличении радиальной силы (соответственно, и степени относительного обжатия) интенсивность напряжения также увеличивается и достигает предела текучести (для исследуемого материала равно 255 МПа) при величине радиальной силы, приблизительно равной 1040 Н. Когда максимальный прогиб f_1 в центральном сечении заготовки еще существует, то при постоянном увеличении радиальной силы значения напряжений плавно растут, и как только f_1 исчезает (при $F = 600$ Н), в это время заготовка деформируется с двух стороны и напряжения равномерно повышаются (см. рис. 4).

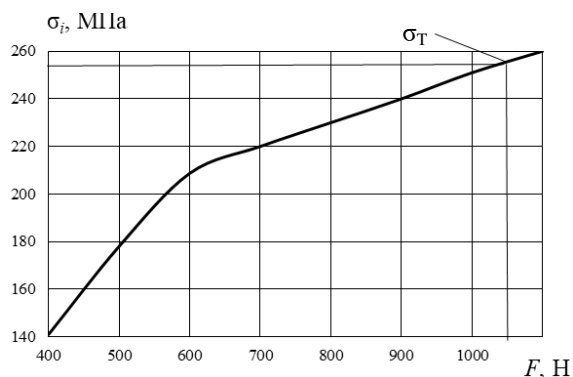


Рис. 4. Влияние величины радиальной силы F на интенсивность напряжений в цилиндрической заготовке

Fig. 4. The influence of radial force F on the stress intensity in a cylindrical workpiece

На рис. 5 представлено распределение полей интенсивности напряжений по центральному поперечному сечению заготовки при разных величинах радиальной силы. На рис. 5, а при $F = 400$ Н (соответственно $f_1 > 0$) максимальное напряжение возникает только в зоне контакта заготовки с верхней плитой. При $F = 600$ Н заготовка входит в контакт с нижней плитой и напряжения в этой зоне начинают тоже формироваться. При дальнейшем увеличении радиальной силы напряжения растут и охватывают все сечение заготовки. При большом значении радиальной силы происходит не только рост напряжений, но и отклонение от круглости цилиндрических деталей [16].

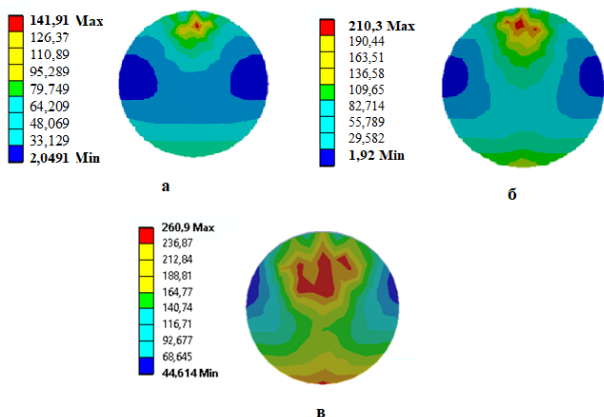


Рис. 5. Распределение полей интенсивности напряжений по поперечному сечению заготовки: а – при $F = 400$ Н; б – при $F = 600$ Н; в – при $F = 1100$ Н

Fig. 5. Distribution of stress intensity fields over the cross section of the workpiece: а is at $F = 400$ N; б is at $F = 600$ N; в is at $F = 1100$ N

На рис. 6 показано распределение интенсивности напряжений по длине заготовки при разных значениях радиальной силы. Очевидно, что при непосредственном воздействии радиальной силы на центральную часть искривлённого вала напряжения форми-

руются в основном в зоне контакта заготовки с плитами (рис. 6, а). После устранения максимального прогиба в центральном сечении при увеличении силы F до 1100 Н напряжения начинают неравномерно распределяться по длине заготовки и при этом максимальное значение в зоне центральной части превышает предел текучести исследуемого материала (рис. 6, б).

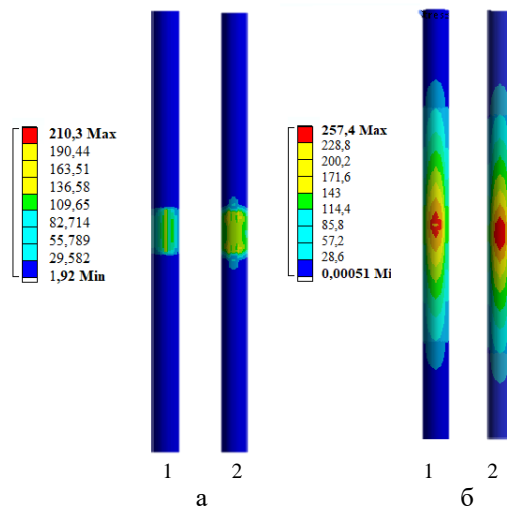


Рис. 6. Распределение интенсивности напряжения по длине заготовки: а – при $F = 600$ Н; б – при $F = 1100$ Н; 1 – вид сверху; 2 – вид снизу

Fig. 6. Distribution of stress intensity along the length of the workpiece: а is at $F = 600$ N; б is at $F = 1100$ N; 1 is a top view; 2 is a bottom view

На рис. 7 показано распределение главных компонент тензора временных напряжений вдоль радиуса поперечного сечения цилиндрического образца в процессе выправления центральной части искривленного вала при величине радиальной силы 600 Н. В результате моделирования установлено, что при значении силы, равной 600 Н, заготовка касается нижней плиты и радиальные, тангенциальные, осевые напряжения носят знакопеременный характер. В зоне контакта они сжимающие и максимальное их значение достигает в месте контакта заготовки с плитами. По мере приближения к центру они меняют свой знак и переходят в растягивающие.

Полученные результаты расчета временных напряжений подтверждают известный из практики факт, что при больших значениях радиальной силы в центральной зоне заготовки возможно разрыхление и разрушение материала [10, 18]. Следовательно, необходимо выбрать рациональные режимы для процесса правки валов гладкими плитами. Для получения рациональных растягивающих временных напряжений в центральной зоне цилиндра при сохранении благоприятных сжимающих напряжений на периферии необходимо использовать оптимальное значение силы деформации F , равное 600 Н.

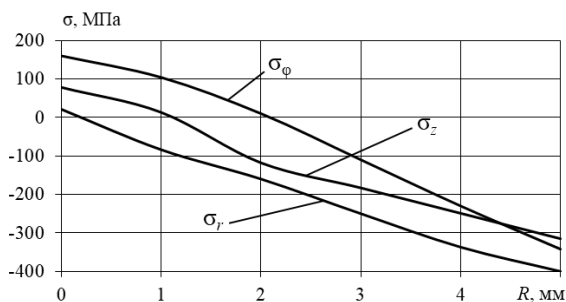


Рис. 7. Распределение компонент временных напряжений по радиусу цилиндра при величине радиальной силы 600 Н (в плоскости вертикального нагружения)
 Fig. 7. Distribution of temporary stress components along the radius of the cylinder at 600 N (in the plane of vertical loading)

Влияние величины радиальной силы на деформированное состояние заготовки

На рис. 8 показана зависимость относительной упругой и пластической деформации ϵ от величины приложенной радиальной силы F , а на рис. 9 показаны изополосы деформаций на поверхности заготовки в процессе выправления ее центральной части при устранении исходного максимального прогиба ($F = 600$ Н).

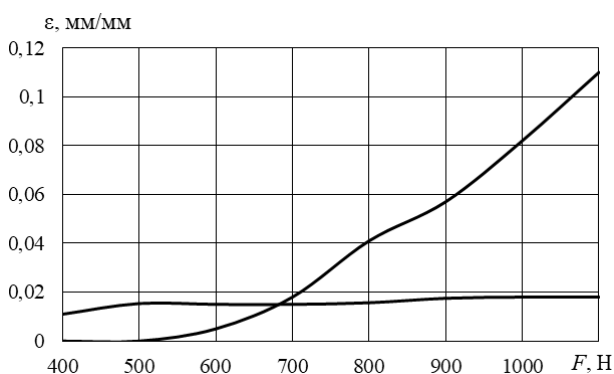


Рис. 8. Зависимость относительных деформаций от величины радиальной силы F :
 1 – пластическая деформация;
 2 – упругая деформация
 Fig. 8. Dependence between relative deformation and radial force F : 1 is plastic deformation; 2 is elastic deformation

В результате моделирования установлено, что при действии на заготовку внешней радиальной силы она испытывает разные виды деформаций. При этом значения упругой деформации остаются практически неизменными с увеличением радиальной силы. Пластическая деформация возникает при определенной величине радиальной силы и далее с учетом ее роста она тоже растет (см. рис. 8). При этом зона пластической деформации возникает только в месте контакта детали с плоскими плитами,

а зона упругой деформации распределяется по всему участку шириной b (рис. 9).

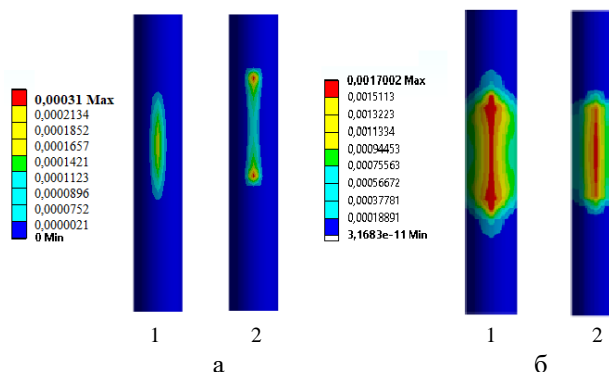


Рис. 9. Распределение изополос относительных деформаций по длине детали (при $F = 600$ Н): а – зона пластической деформации; б – зона упругой деформации; 1 – вид сверху; 2 – вид снизу
 Fig. 9. Distribution of isobands of relative deformation along the length of the part (at $F = 600$ Н): а is a zone of plastic deformation; б is a zone of elastic deformation; 1 is a top view; 2 is a bottom view

В результате компьютерного моделирования функции пластической деформации в программе ANSYS определена глубина упрочненных зон путем анализа очага распространения интенсивности деформации. Глубина пластической деформации характеризуется зоной, в которой интенсивность напряжений достигает предела текучести материала [10, 11].

Распределение изополос пластических деформаций по центральному поперечному сечению заготовки при воздействии на ее разных по величине радиальных сил представлено на рис. 10.

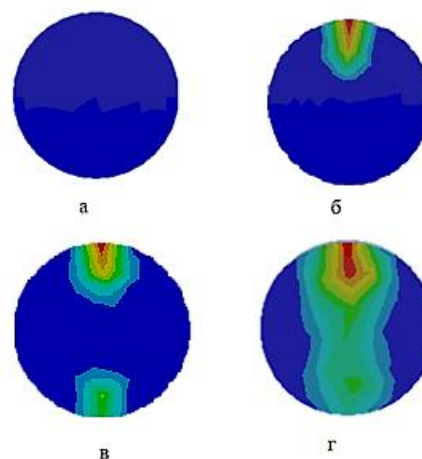


Рис. 10. Изополосы пластических деформаций при разных значениях радиальной силы F : а – $F = 400$ Н; б – $F = 600$ Н; в – $F = 800$ Н; г – $F = 1100$ Н
 Fig. 10. Isobands of plastic deformation for different values of radial force F : а is $F = 400$ Н; б is $F = 600$ Н; в is $F = 800$ Н; г is $F = 1100$ Н

Из рис. 10 следует что, зона пластической деформации повышается с увеличением значения радиальной силы, приложенной к верхней плите. При небольшой величине радиальной силы центральная часть заготовки не выпрямляется и в сечении не наблюдается пластической деформации (рис. 10, а). Как только заготовка коснется нижней плиты, пластическая деформация появляется в зоне контакта с верхней плитой (рис. 10, б). Далее с увеличением радиальной силы повышается и, соответственно, расширяется зона пластической деформации (см. рис. 10, в) и достигает центра поперечного сечения цилиндра (рис. 10, г).

Таким образом, в работе представлена методика выбора параметров правки цилиндрической детали на локальном участке. Для конкретной детали определены условия деформирования, обеспечивающие ее выправление без существенного искажения формы поперечного сечения. Способ правки гладкими плитами можно рекомендовать для деталей из пластичных материалов диаметром от 5 до 20 мм и длиной до 500 мм.

Заключение

Таким образом, результаты статического моделирования процесса выправления центральной части искривленной заготовки перед правкой ее плоскими плитами позволяет сделать следующие выводы:

1. При воздействии радиальной силы на центральном участке искривленной заготовки наблюдается устранение максимального исходного прогиба. С увеличением радиальной силы соответственно увеличивается степень относительного обжатия и значение начального прогиба уменьшается. Выпрямление центральной части позволяет в дальнейшем обкатывать заготовку между плитами в процессе правки.

2. Установлено значение радиальной силы F , равное 600 Н, для предварительного деформирования центральной части цилиндрической заготовки, изготовленной из стали 3, диаметром $D = 10$ мм, длиной $l = 200$ мм с исходным прогибом $f_0 = 0,5$ мм на центральном участке шириной 20 мм. При величине этой силы не нарушается геометрическая форма поперечного сечения заготовки и максимальное значение напряжений, возникающих в зоне контакта заготовки с плитами, не превышает предела текучести материала.

Список источников

1. Иванов В.П., Кастрюк А.П. Основные направления ресурсосбережения в ремонтном производстве // Труды ГОСНИТИ: Техническое обслуживание, ремонт. М.: ГОСНИТИ, 2013. Т. 112. Ч. 2. С. 15-18.
2. Блюменштейн В.Ю., Смелянский В.М. Механика технологического наследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин. М.: Машиностроение, 2007. 399 с.
3. Бабичев А.П., Мотренко П.Д. Виброударная отделочно-упрочняющая обработка деталей нетрадиционных форм и размеров наукоемких изделий (на

примере силовых деталей вертолета) // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2021. №1. С. 38-43.

4. Бубнов А.С. Технологические возможности процесса правки маложестких цилиндрических деталей стесненным сжатием // Вестник ИрГТУ. 2006. №4. С. 68-75.
5. Клушин В.А., Рудович А.О. Технология и оборудование поперечно-клиновой прокатки: монография. Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2020. 300 с.
6. Повышение точности ориентации валов с дефектами поверхности при их правке на прессах / И.И. Манило, С.Г. Тютрин, А.А. Городских и др. // Инновации и исследования в транспортном комплексе: материалы Первой междунар. научн.-практ. конф. Курган: Российская транспортная академия, 2013. С. 86-87.
7. Королев А.В., Решетников М.К., Савран С.А. Конструктивные и технологические решения реализации способа правки и механической стабилизации длиномерных цилиндрических деталей // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2018. №7 (85). С. 9-16.
8. Зайдес С.А., Емельянов В.Н. Влияние поверхностного пластического деформирования на качество валов: монография. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2017. 380 с.
9. Попова В.В. Поверхностное пластическое деформирование и физико-химическая обработка. Рубцовск: Рубцовский индустриальный институт, 2013. 98 с.
10. Особенности формирования глубины упрочнения при обработке деталей поверхностным пластическим деформированием / Отений Я.Н., Привалов Н.И., Щеголев Н.Г., Муравьев О.П., Ткачева Ю.О. // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2019. №12-3. С. 452-455.
11. Суслов А. Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. М.: Машиностроение, 2019. 320 с.
12. Зайдес С.А., Лэ Х.К. Способ правки маложестких цилиндрических деталей. Патент на изобретение RU 2685826 C1, 23.04.2019. Заявка № 2018117414 от 10.05.2018. Бюл. №12.
13. Басов К.А. ANSYS в примерах и задачах / под общ. ред. Д.Г. Красковского. М.: Компьютер Пресс, 2002. 224 с.
14. Study of the oil geopermeation patterns: A case study of ANSYS CFX software application for computer modeling / Iryna Ablicieva, Leonid Plyatsuk, Ihor Roi, Oleh Chekh, Sabina Gabbassova, Kseniia Zaitseva, Serhii Lutsenko // Journal of Environmental Management. 2021, vol. 287, 112347. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112347>.
15. Мураткин Г.В., Катова И.В. Математическая модель процесса правки деталей методом поверхностного пластического деформирования с предварительным изгибом заготовки // Обработка металлов давлением. 2022. №6. С. 27-31.

16. Зайдес С.А., Хо М.К. Определение напряженно-деформированного состояния цилиндрических деталей при круговой осцилляции секторального рабочего инструмента // Упрочняющие технологии и покрытия. 2022. Т. 18. №1 (205). С. 6-13.
 17. Приходько В.М., Петрова Л.Г., Чудина О.В. Металлофизические основы разработки упрочняющих технологий. М.: Машиностроение, 2003. 384 с.
 18. Зайдес С.А., Нгуен Х.Х. Интенсификация напряженного состояния в очаге деформации при локальном воздействии деформирующего инструмента // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. №4. С. 580-592.
- References**
1. Ivanov V.P., Kastruyk A.P. Key areas of resource saving in repair. *Trudy GOSNITI: Tekhnicheskoe obsluzhivanie, remont* [Transactions of GOSNITI: Maintenance, Repair]. Moscow: GOSNITI (State Research and Development Technological Institute), 2013, vol. 112, part 2, pp. 15-18. (In Russ.)
 2. Blyumenshteyn V.Yu., Smelyanskiy V.M. *Mekhanika tekhnologicheskogo nasledovaniya na stadiyakh obrabotki i ekspluatatsii detaley mashin* [Mechanics of technological inheritance at stages of machining and operation of machine parts]. Moscow: Mashinostroenie, 2007, 399 p. (In Russ.)
 3. Babichev A.P., Motrenko P.D. Vibratory impact finishing and strengthening treatment of parts of non-conventional shapes and sizes of science-intensive parts (using the example of helicopter strength parts). *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii* [Science-Intensive Technologies in Mechanical Engineering]. 2021;(1):38-43. (In Russ.)
 4. Bubnov A.S. Technological capabilities of the strengthening process of low-rigidity cylindrical parts with constrained reduction. *Vestnik IrGTU* [Vestnik of Irkutsk State Technical University]. 2006;(4):68-75. (In Russ.)
 5. Klushin V.A., Rudovich A.O. *Tekhnologiya i oborudovanie poperechno-klinovoy prokatki: monografiya* [Technology and equipment for cross-wedge rolling: monograph]. Minsk: Institute of Physics and Technology, National Academy of Sciences of Belarus, 2020, 300 p. (In Russ.)
 6. Manilo I.I., Tyutrin S.G., Gorodskikh A.A. et al. Increasing accuracy of orientation of shafts with surface defects during their leveling with dies. *Innovatsii i issledovaniya v transportnom komplekse: materialy Pervoy mezhdunar. nauchn.-prakt. konf.* [Innovations and studies in the transportation complex: proceedings of the 1st International Scientific and Practical Conference]. Kurgan: Russian Transport Academy, 2013, pp. 86-87. (In Russ.)
 7. Korolev A.V., Reshetnikov M.K., Savran S.A. Design and technological solutions for applying a method of leveling and mechanical stabilization of long cylindrical parts. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii* [Science-Intensive Technologies in Mechanical Engineering]. 2018;(7(85)):9-16. (In Russ.)
 8. Zaides S.A., Emelyanov V.N. *Vliyanie poverkhnostnogo plasticheskogo deformirovaniya na kachestvo valov: monografiya* [Influence of surface plastic deformation on the quality of shafts: monograph]. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University, 2017, 380 p. (In Russ.)
 9. Popova V.V. *Poverkhnostnoe plasticheskoe deformirovanie i fiziko-khimicheskaya obrabotka* [Surface plastic deformation and physical and chemical treatment]. Rubtsovsk: Rubtsovsk Industrial Institute, 2013, 98 p. (In Russ.)
 10. Oteniy Ya.N., Privalov N.I., Shchegolev N.G., Muravev O.P., Tkacheva Yu.O. Features of forming strengthening depth during surface plastic deformation of parts. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy* [International Journal of Applied and Basic Research]. 2019;(12-3):452-455. (In Russ.)
 11. Suslov A. G. *Kachestvo poverkhnostnogo sloya detaley mashin* [Quality of the surface layer of machine parts]. Moscow: Mashinostroenie, 2019, 320 p. (In Russ.)
 12. Zaides S.A., Le Kh.K. *Sposob pravki malozhestkikh tsilindricheskikh detaley* [Method for straightening low-rigid cylindrical parts]. Patent RU, no. 2685826, 2019.
 13. Basov K.A. *ANSYS v primerakh i zadachakh* [ANSYS examples and tutorials]. Ed. by Kraskovsky D.G. Moscow: Computer Press, 2002, 224 p. (In Russ.)
 14. Iryna Ablieieva, Leonid Plyatsuk, Ihor Roi, Oleh Chekh, Sabina Gabbassova, Kseniia Zaitseva, Serhii Lutsenko. Study of the oil geopermeation patterns: A case study of ANSYS CFX software application for computer modeling. *Journal of Environmental Management*. 2021;287:Article ID 112347. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112347>
 15. Muratkin G.V., Katova I.V. A mathematical model of a part straightening process by a surface plastic deformation method with preliminary bending of workpieces. *Obrabotka metallov davleniem* [Metal Forming]. 2022;(6):27-31. (In Russ.)
 16. Zaides S.A., Ho M.Q. Determining a stress and strain state of cylindrical parts during circular oscillation of a sectorial working tool. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya* [Strengthening Technologies and Coatings]. 2022;18(1(205)):6-13. (In Russ.)
 17. Prikhodko V.M., Petrova L.G., Chudina O.V. *Metallofizicheskie osnovy razrabotki uprochnyayushchikh tekhnologiy* [Metal physics of developing strengthening technologies]. Moscow: Mashinostroenie, 2003, 384 p. (In Russ.)
 18. Zaides S.A., Nguyen H.H. Intensifying the stress state in the deformation zone at local impact of a deforming tool. *iPolytech Journal*. 2022;26(4):580-592. (In Russ.)

Поступила 12.03.2024; принята к публикации 09.04.2024; опубликована 30.09.2024
Submitted 12/03/2024; revised 09/0046/2024; published 30/09/2024

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

Пономарев Борис Борисович – доктор технических наук, профессор,
Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия.
Email: pusw@istu.edu ORCID 0000-0003-1185-8638

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

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

Boris B. Ponomarev – DrSc (Eng.), Professor,
Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.
Email: pusw@istu.edu ORCID 0000-0003-1185-8638