



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.787.4

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-3-24-34>

## АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ПРАВКИ МАЛОЖЕСТКИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ ПОПЕРЕЧНОЙ ОБКАТКОЙ ПЛОСКИМИ ПЛИТАМИ

© С.А. Зайдес<sup>1</sup>, Лэ Хонг Куанг<sup>2</sup>

Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

**РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ.** Определить основные параметры процесса правки мало жестких цилиндрических деталей поперечной обкаткой плоскими плитами: допускаемый исходный прогиб заготовки, общий прогиб заготовки перед поперечной обкаткой и степень относительного обжатия. **МЕТОДЫ.** В работе использован математический аппарат, основанный на законах теории упругости твердого тела. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** В результате аналитических расчетов установлены основные параметры процесса правки цилиндрических деталей поперечной обкаткой плоскими плитами. Общий прогиб заготовки перед поперечной обкаткой зависит от ширины выступа плиты, механических свойств материалов и размеров заготовки. Предельный исходный прогиб зависит от материала, диаметра и жесткости заготовки. Предельное относительное обжатие зависит от коэффициента трения между заготовкой и плоскими плитами. **ВЫВОДЫ.** Для правки небольших мало жестких цилиндрических деталей типа валов и осей предложена схема поперечной обкатки плоскими плитами. Обработка происходит за счет упругого изгиба заготовки в направлении, противоположном исходной остаточной деформации и изменения напряженного состояния путем вращения заготовки между плоскими плитами. Разработанная математическая модель дает вполне достоверные значения деформаций изгиба, которые возникают после правки деталей методом поперечной обкаткой плоскими плитами. Аналитическая зависимость для расчетного определения предельного исходного прогиба, общего прогиба при изгибе и величины относительного обжатия может быть рекомендована к практическому использованию в производстве для достижения прецизионной точности мало жестких деталей типа валов.

**Ключевые слова:** правка, поперечная обкатка, прогиб, относительное обжатие.

**Информация о статье.** Дата поступления 9 февраля 2018 г.; дата принятия к печати 13 марта 2018 г.; дата онлайн-размещения 31 марта 2018 г.

**Формат цитирования.** Зайдес С.А., Лэ Хонг Куанг. Аналитический расчет основных параметров процесса правки мало жестких цилиндрических деталей поперечной обкаткой плоскими плитами // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 3. С. 24–34. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-3-24-34

## ANALYTICAL CALCULATION OF THE MAIN PARAMETERS OF SMALL LOW RIGID CYLINDRICAL PARTS STRAIGHTENING BY TRANSVERSE BURNISHING BY FLAT PLATES

S.A. Zaides, Le Hong Quang

Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russian Federation

**ABSTRACT. The PURPOSE** of the paper is determination of the main parameters of the straightening process of low rigid cylindrical parts by transverse burnishing by flat plates that include the permissible initial deflection of the workpiece, general deflection of the workpiece before the transverse burnishing and the degree of relative reduction. **METHODS.** The work uses the mathematical apparatus based on the laws of the theory of elasticity of a solid. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** The analytical calculations resulted in the determination of the main parameters of the process of straightening cylindrical parts by transverse burnishing by flat plates. The general deflection of the workpiece before

<sup>1</sup>Зайдес Семен Азикович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой машиностроительных технологий и материалов, e-mail: zsa@istu.edu

Semen A. Zaides, Doctor of technical sciences, Professor, Head of the Department of Machine-Building Technologies and Materials, e-mail: zsa@istu.edu

<sup>2</sup>Лэ Хонг Куанг, аспирант, e-mail: mybo91@gmail.com

Le Hong Quang, Postgraduate, e-mail: mybo91@gmail.com



transverse burnishing depends on the width of the plate overhang, mechanical properties of material and workpiece dimensions. The ultimate initial deflection depends on the material, diameter and rigidity of the workpiece. The limiting relative reduction depends on the friction coefficient between the workpiece and flat plates. **CONCLUSIONS.** A scheme of transverse burnishing by flat plates is proposed for straightening of small low rigid cylindrical parts of the shaft and axle-type. The straightening is performed due to the elastic bending of the workpiece in the direction opposite to the initial residual deformation and change in the stressed state by workpiece rotation between the flat plates. The developed mathematical model provides reliable values of bending deformations that arise after the straightening of parts by transverse burnishing by flat plates. The analytical dependence for the calculated determination of the limiting initial deflection, general deflection under bending and the value of relative reduction can be recommended for practical use in industry to achieve the precision accuracy of low rigid parts of the shaft type.

**Keywords:** *straightening, transverse burnishing, deflection, relative reduction*

**Information about the article.** Received February 9, 2018, 2018; accepted for publication March 13, 2018; available online March 31, 2018.

**For citation.** Zaides S.A., Le Hong Kuang. Analytical calculation of the main parameters of small low rigid cylindrical parts straightening by transverse burnishing by flat plates. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 3, pp. 24–34. (In Russian). DOI: 10.21285/1814-3520-2018-3-24-34

## Введение

Среди различных деталей машин свыше 30% составляют тела вращения, из них наиболее трудоемкими и сложными в изготовлении являются детали, обладающие малой жесткостью. Мало жесткие цилиндрические детали типа валов и осей широко используются в сельскохозяйственной, горнорудной, автомобильной, авиационной промышленности, а также при изготовлении бытовой техники. Одной из проблем, возникающих при изготовлении таких деталей, является искажение их прямолинейной геометрической формы. На всех стадиях технологического процесса при изготовлении не жестких деталей типа валов и осей с отношением длины к диаметру более 10, в технологический процесс изготовления обычно включают несколько операций правки [1, 2].

Традиционным способом восстановления геометрической формы искривленных деталей является правка. Большой вклад в развитие теории и технологии правки цилиндрических изделий внесли отечественные и зарубежные ученые: Я.Д. Вишняков, А.С. Донсков, В.Н. Емельянов, Н.П. Щапов и др. Однако в некоторых

случаях распространенные способы правки, например, правка изгибом или растяжением, не дают должного результата. Известные способы правки дают временный эффект либо приводят к повреждению поверхности, что недопустимо при восстановлении прямолинейности деталей<sup>3</sup> [3, 4].

Для правки мало жестких изделий целесообразен отход от традиционных схем обработки. В качестве перспективного направления можно рассматривать правку поперечной обкаткой плоскими плитами как эффективный способ, в значительной степени лишенный вышеуказанных недостатков. Для практической реализации нового способа правки поперечной обкаткой плоскими плитами возникла необходимость расчета основных параметров этого процесса.

Целью данной работы является определение основных параметров процесса правки поперечной обкатки плоскими плитами (допускаемый исходной прогиб заготовки, общий прогиб заготовки перед поперечной обкаткой и степень относительного обжатия).

<sup>3</sup>Икрин В.А. Сопротивление материалов с элементами теории упругости и пластичности: учебник для студентов, обучающихся по направлению 653500 "Строительство". М.: Изд-во АСВ, 2004. 424 с. / Ikrin V.A. Material strength with the elements of the theory of elasticity and plasticity: Textbook for students trained in the direction 653500 "Civil Engineering". Moscow: ACB Publ., 2004, 424 p.



## Схема процесса правки

На рис. 1 представлена геометрическая модель процесса правки мало жестких цилиндрических деталей поперечной обкаткой плоскими плитами. Конструкция для правки состоит из нижней жестко закрепленной плиты 3 и верхней плиты 1, перемещающейся в горизонтальном направлении, между плитами размещена заготовка 2. Нижняя плита имеет два упора 5, на которые опирается заготовка 2. Верхняя плита имеет центральный выступ 4, который используют для нагружения заготовки. Выправление детали осуществляются поэтапно.

Изначально заготовку кладут на нижнюю плиту, при этом вогнутость располагается в направлении упоров 5.

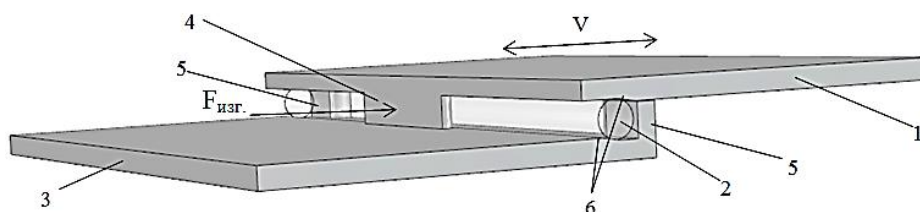
Затем верхняя плита опускается вниз до контакта с заготовкой 2 и перемещается вправо на величину общего прогиба ( $f_{\text{общ}}^{\text{max}}$ ), таким образом реализуется перегиб заготовки, необходимый для ее выправления.

Далее верхняя плита перемещается влево, заготовка принимает прямолинейную форму, верхняя плита перемещается вниз для обеспечения необходимого обжатия.

После этого верхняя плита перемещается влево, клиновой частью захватывает заготовку, которая поворачивается вокруг своей оси и получает пластическую деформацию по всей поверхности.

Сущность правки мало жестких цилиндрических деталей поперечной обкаткой плоскими плитами заключается в создании напряжений в заготовке путем упругого изгиба в противоположном исходному прогибу направлении (рис. 2) и изменении напряженного состояния в процессе поперечной обкатки плоскими плитами при постоянных параметрах режима пластического деформирования (относительная степень обжатия). Поперечная обкатка необходима для обеспечения стабильности прямолинейной формы заготовки и формирования равновесных остаточных напряжений по объему заготовки. При этом упрочнению подвергают поверхностный слой цилиндрической заготовки.

Статистическая обработка экспериментальных данных позволила установить, что 68% валов из обрабатываемой партии деталей имеют изогнутую ось, форма которой наиболее близко аппроксимируется уравнением параболы второй степени<sup>4</sup> [5]:



**Рис. 1. Геометрическая модель процесса правки мало жестких цилиндрических деталей поперечной обкаткой плоскими плитами:**

**1 – подвижная верхняя плита; 2 – заготовка; 3 – неподвижная нижняя плита;**

**4 – выступ верхней плиты; 5 – упоры нижней плиты; 6 – клиновой участок плит**

**Fig. 1. Geometrical model of the straightening process of low rigid cylindrical parts by transverse burnishing by flat plates:**

**1 – moving top plate; 2 – workpiece; 3 – stationary bottom plate;**

**4 – upper plate overhang; 5 – bottom plate stops; 6 – wedge section of plates**

<sup>4</sup>Зайдес С.А., Мураткин Г.В. Упрочнение, восстановление, правка валов: учебное пособие / под ред. С.А. Зайдеса. Иркутск: Изд-во ИргТУ. 2005. 336 с. / Zaides S.A., Muratkin G.V. Hardening, restoration, straightening of shafts: Learning aids / under edition of S.A. Zaides. Irkutsk: Irkutsk State Technical University Publ., 2005, 336 p.



$$f_{исх}(z) = \frac{4f_{исх}^{max}}{L} \left(1 - \frac{z}{L}\right) z. \quad (1)$$

У 24% деталей кривая изогнутой оси аппроксимируется по закону синуса<sup>4</sup> [6]:

$$f_{исх}(z) = f_{исх}^{max} \sin \frac{\pi}{L} z, \quad (2)$$

где  $f_{исх}(z)$  – текущее значение исходного прогиба;  $f_{исх}^{max}$  – исходный прогиб в середине заготовки;  $L$  – общая длина заготовки;

$z$  – текущая координата по длине заготовки.

Остальные 8% деталей имеют винтообразное закручивание вдоль продольной оси<sup>4</sup>. При этом среднее арифметическое значение угла закручивания  $\Psi$  сечений относительно друг друга составляет около  $8^\circ$  [5].

### Определение максимального общего прогиба заготовки перед поперечной обкаткой плоскими плитами

Для принятой схемы нагружения вала (рис. 2) величины напряжения и прогиба вала определяются по уравнениям, приведенным в [7–9].

Наибольшее напряжение изгиба (в середине вала) определяется как

$$\sigma_{max} = \frac{F_{изг} L}{8W} \left(2 - \frac{l}{L}\right). \quad (3)$$

Прогиб вала на расстоянии  $z$  от упора:

$$f_{общ}(z) = \frac{F_{изг} L^3}{48EI} \left\{ \left[ 3 - \left(\frac{l}{L}\right)^2 \right] \frac{z}{L} - 4 \left(\frac{z}{L}\right)^3 + \right. \\ \left. + 2 \frac{L}{l} \left[ \frac{z}{L} + \frac{1}{2} \left(\frac{l}{L} - 1\right) \right]^4 \right\}. \quad (4)$$

Наибольший прогиб вала (в середине вала):

$$f_{общ}^{max} = f_{общ} \left(\frac{L}{2}\right) = \\ = \frac{F_{изг} L^3}{48EI} \left[ 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{l}{L}\right)^2 + \frac{1}{8} \left(\frac{l}{L}\right)^3 \right] = \frac{F_{изг} L^3 A_1}{48EI}. \quad (5)$$

Прогиб вала на краю выступа верхней плиты:

$$f_{кр} = \frac{F_{изг} L^3}{48EI} \left[ 1 - 2 \left(\frac{l}{L}\right)^2 + \left(\frac{l}{L}\right)^3 \right] = \frac{F_{изг} L^3 A_2}{48EI}, \quad (6)$$

где  $F_{изг}$  – усилие изгиба вала от давления выступа верхней плиты;  $W$  – осевой момент сопротивления поперечного сечения вала;  $I$  – осевой момент инерции поперечного сечения вала;  $l$  – ширина выступа верхней плиты;  $E$  – модуль упругости I рода материала.

$$A_1 = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{l}{L}\right)^2 + \frac{1}{8} \left(\frac{l}{L}\right)^3;$$

$$A_2 = 1 - 2 \left(\frac{l}{L}\right)^2 + \left(\frac{l}{L}\right)^3.$$

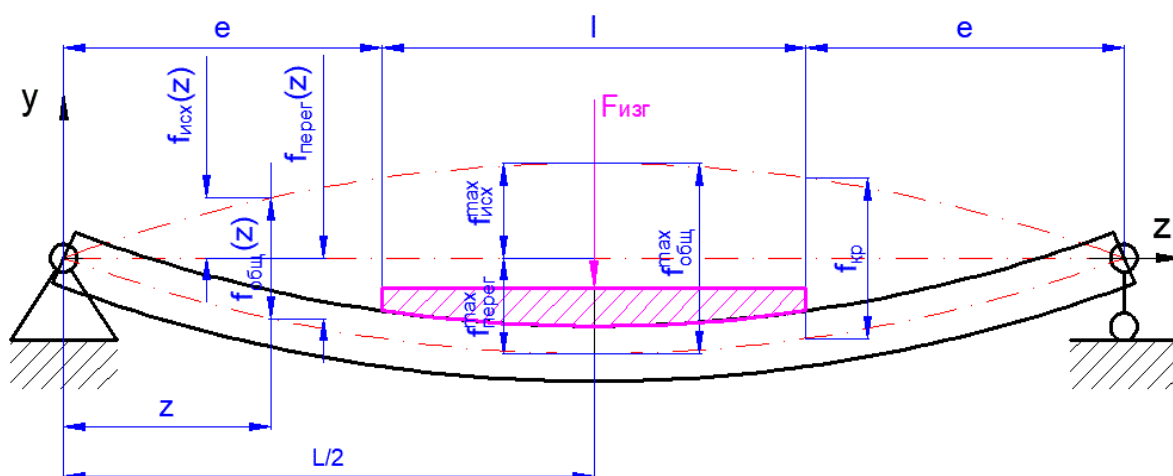


Рис. 2. Схема деформации заготовки перед обработкой поперечной обкаткой плоскими плитами  
Fig. 2. Deformation diagram of a workpiece before transverse burnishing by flat plates



Для упрощения расчетов прогиба по уравнениям (5) и (6) значения коэффициентов  $A_1$  и  $A_2$  представлены графически на рис. 3.

При создании изгиба заготовки в направлении, противоположном исходной остаточной деформации, максимальное напряжение изгиба не должно значительно превышать предел текучести материала заготовки:

$$\sigma_{max} \leq \sigma_T, \quad (7)$$

где  $\sigma_T$  – предел текучести материала.

Из равенств (3) и (7) получаем

$$\frac{F_{изг}L}{8W} \left(2 - \frac{l}{L}\right) \leq \sigma_T.$$

Отсюда

$$F_{изг} \leq \frac{8W\sigma_T}{(2L-l)}. \quad (8)$$

Из уравнения (5) получен максимально допустимый прогиб вала перед поперечной обкаткой плоскими плитами:

$$[f_{общ}^{max}] = \frac{8W\sigma_T L^3 A_1}{48EI(2L-l)} = \frac{\sigma_T L^3 A_1}{6ER(2L-l)}, \quad (9)$$

где  $R$  – радиус заготовки.

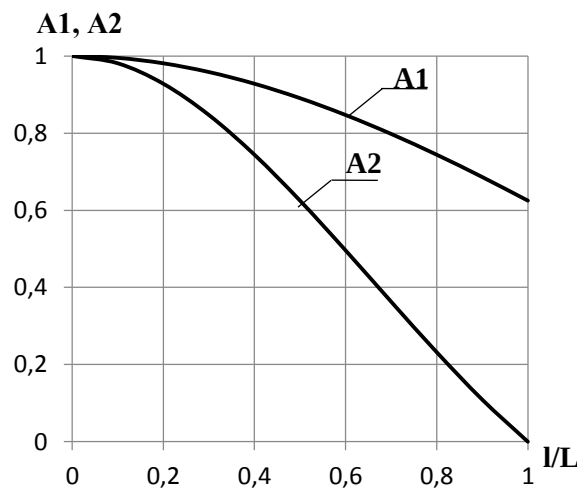


Рис. 3. Зависимость коэффициентов  $A_1, A_2$  от отношения  $l/L$   
Fig. 3. Dependence of the coefficients  $A_1, A_2$  on the ratio  $l/L$

### Определение предельного исходного прогиба и перегиба при правке маложестких цилиндрических деталей поперечной обкаткой плоскими плитами

Технологические возможности предлагаемого способа правки ограничены тем обстоятельством, что при большой величине деформации от воздействия поперечной силы в крайних сечениях обрабатываемого вала может начаться пластическое течение поверхностного слоя материала.

Следовательно, было необходимо просчитать максимальную величину исходного прогиба заготовки, который можно устранить в процессе правки.

Предварительное упругое деформирование заготовки осуществляется путем приложения поперечной силы, позво-

ляющей в каждом поперечном сечении обрабатываемого участка выполнить следующее условие (см. рис. 2):

$$f_{общ}(z) = f_{исх}(z) + f_{перг}(z), \quad (10)$$

где  $f_{общ}(z)$  – общая деформация заготовки перед поперечной обкаткой, отсчитываемая от линии центров в текущем поперечном сечении  $z$ ;  $f_{перг}(z)$  – текущее значение перегиба, отсчитывается от линии центров:

$$f_{перг}(z) = \xi f_{исх}(z), \quad (11)$$



где  $\xi$  — коэффициент перегиба;

$$\xi = \frac{f_{\text{общ}}^{\text{max}} - f_{\text{исх}}^{\text{max}}}{f_{\text{исх}}^{\text{max}}}.$$

При  $z = e$ , поставив в уравнение (1), имеем

$$f_{\text{исх}}(e) = \frac{4f_{\text{исх}}^{\text{max}}}{L} \left(1 - \frac{e}{L}\right) e. \quad (12)$$

Поставив  $z = e$  в уравнение (10), получаем

$$f_{\text{общ}}(e) = f_{\text{исх}}(e) + f_{\text{перег}}(e);$$

или

$$f_{\text{кр}} = f_{\text{исх}}(e) + f_{\text{перег}}(e), \quad (13)$$

где

$$e = (L - l)/2, \quad (14)$$

где  $e$  — расстояние от торца заготовки до края выступа верхней плиты.

Подставив (6), (11), (12) и (14) в (13), получим равенство

$$f_{\text{исх}}^{\text{max}} = \frac{F_{\text{изг}} L^5 A_2}{48EI(\xi + 1)(L^2 - l^2)}. \quad (15)$$

Подставив (8) в (14), можно рассчитать величину предельно допустимой исходной деформации (прогиба), которую можно устранить данным способом правки:

$$[f_{\text{исх}}^{\text{max}}] = \frac{\sigma_T L^5 A_2}{6ER(\xi + 1)(L^2 - l^2) \cdot (2L - l)},$$

или

$$[f_{\text{исх}}^{\text{max}}] = \frac{\sigma_T L^2 A_2}{3ED(\xi + 1)(1 - \frac{l^2}{L^2}) \cdot (2 - \frac{l}{L})}, \quad (16)$$

где  $D$  — диаметр заготовки.

По формуле (16) построены графики зависимости предельного исходного прогиба от диаметра  $D$  и жесткости заготовки (отношение  $L/D$ ) при  $l/L = 0,25$ ;  $\xi = 1$ ; предел текучести  $\sigma_T$  для Ст45 равен 360 МПа (рис. 4).

По формулам (9), (11), (16) построена кривая зависимости предельного значения перегиба от значения исходного прогиба, при  $D = 10$  мм и  $L/D = 20$  (рис. 5).

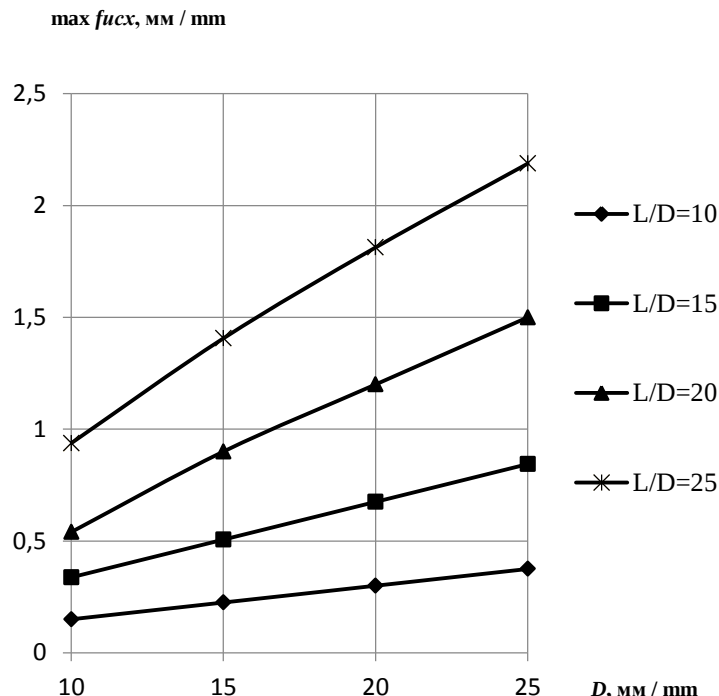
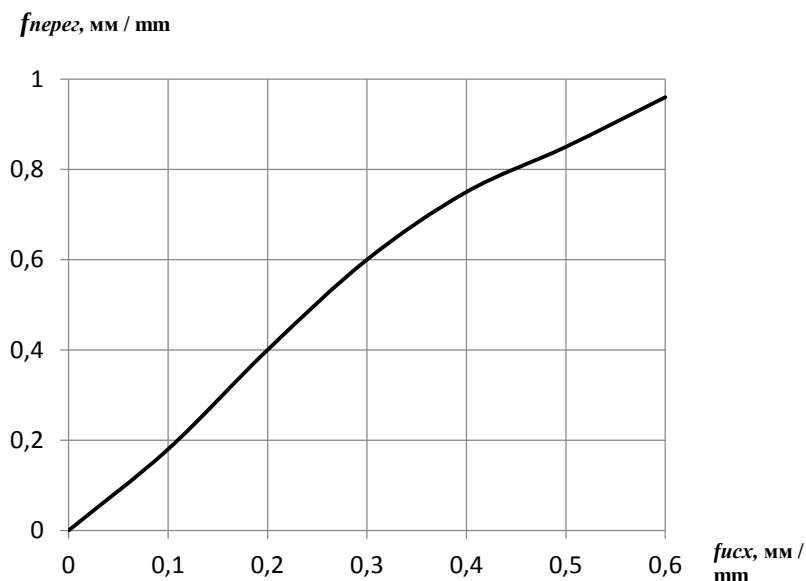


Рис. 4. Зависимость предельного исходного прогиба заготовки от величины диаметра и жесткости заготовки при правке поперечной обкаткой плоскими плитами

Fig. 4. Dependence of the limit initial deflection of a workpiece on its diameter and hardness when straightening by transverse burnishing by flat plates



**Рис 5. Зависимость предельного перегиба от исходного прогиба заготовки при правке поперечной обкаткой плоскими плитами ( $D = 10$  мм и  $L/D = 20$ )**  
**Fig. 5. Dependence of the limit bend on the initial deflection of the workpiece when straightening by transverse burnishing by flat plates ( $D = 10$  mm and  $L/D = 20$ )**

### Определение предельного обжатия при поперечной обкатке плоскими плитами

На рис. 6 приведена схема процесса поперечной обкатки плоскими плитами. Как видно из рисунка, ось вращения обкатываемого цилиндрического тела перпендикулярна направлению движения верхней плиты. Расстояние между плитами меньше исходного диаметра цилиндра на величину  $2y$ , за счет этого диаметр заготовки при обкатке уменьшается. Со стороны каждой из плит к заготовке приложены усилия, которые направлены нормально к контактной площадке. Равнодействующую этих усилий  $P$  будем считать приложенной в середине отрезка, соответствующего зоне контакта заготовки с плитами. Нормальные усилия вызывают появление на площадке контакта заготовки с плитами сил трения, равнодействующую которых обозначим через  $F$ . Силы трения  $F$  приложены в тех же точках, что и нормальные усилия  $P$ , и направлены по касательным к площадке контакта.

Согласно [9], ширина площадки соприкосновения заготовки с плитами  $b$  при поперечной обкатке рассчитывается как

$$b = \sqrt{yd + 2y^2}. \quad (17)$$

Предельная ширина площадки соприкосновения заготовки и плит определяется как

$$b = \mu \cdot d, \quad (18)$$

где  $\mu$  – коэффициент трения.

Для определения предельного обжатия за один оборот заготовки при поперечной обкатке воспользуемся формулой (17). Возведя обе части равенства в квадрат, получаем

$$b^2 = yd + 2y^2.$$

После простых преобразований приходим к следующему квадратному уравнению относительно  $y$ :

$$y^2 + \frac{d}{2}y - \frac{b^2}{2} = 0.$$

Из этого уравнения

$$y_{1,2} = -\frac{d}{4} \pm \sqrt{\frac{d^2}{16} + \frac{b^2}{2}}.$$

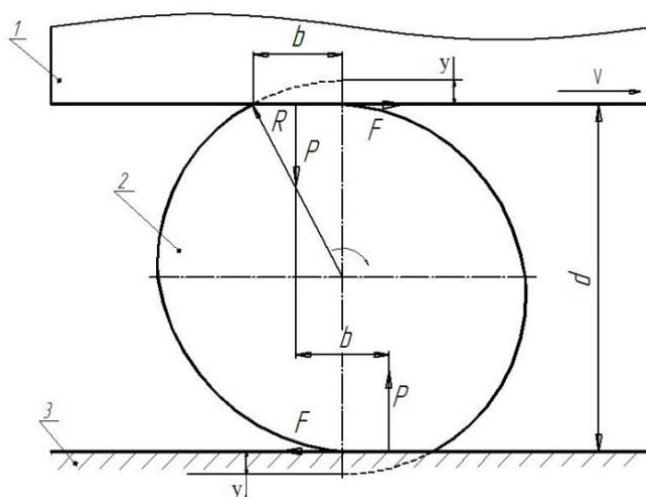


Рис. 6. Схема обжатия цилиндра при поперечной обкатке плоскими плитами [9]:

1 – подвижная плита; 2 – заготовка; 3 – неподвижная плита

Fig. 6. Diagram of cylinder reduction under transverse burnishing by flat plates [9]:

1 – moving plate; 2 – workpiece; 3 – stationary plate

Вынося из-под радикала первый член, получаем:

$$y_{1,2} = -\frac{d}{4} \pm \frac{d}{4} \sqrt{1 + 8 \left(\frac{b}{d}\right)^2}. \quad (19)$$

Величина  $\frac{b}{R}$  всегда значительно меньше единицы. Воспользовавшись биномиальным разложением в ряд и отбросив все члены ряда начиная с третьего, получим:

$$\begin{aligned} \sqrt{1 + 8 \left(\frac{b}{R}\right)^2} &= 1 + \frac{1}{2} \cdot 8 \left(\frac{b}{R}\right)^2 - \\ &- \frac{1}{2 \cdot 4} \cdot 8^2 \left(\frac{b}{R}\right)^4 + \\ &+ \frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4 \cdot 6} \cdot 8^3 \left(\frac{b}{R}\right)^6 - \dots \approx 1 + 4 \left(\frac{b}{R}\right)^2. \end{aligned}$$

Таким образом, приходим к следующему приближенному уравнению:

$$y_{1,2} = -\frac{d}{4} \pm \frac{d}{4} \left(1 + 4 \left(\frac{b}{d}\right)^2\right).$$

Исследование этих двух решений показывает, что корнем уравнения, имеющим физический смысл, является

$$y_1 = -\frac{d}{4} + \frac{d}{4} \left(1 + 4 \left(\frac{b}{d}\right)^2\right).$$

После простых преобразований получаем, что

$$y = \frac{b^2}{d}. \quad (20)$$

Подставляя равенство (18) в выражение (20), имеем

$$y = \frac{\mu^2 \cdot d^2}{d} = \mu^2 \cdot d. \quad (21)$$

По равенству (21) можно определить максимальную величину относительного обжатия заготовки в плитах в зависимости от коэффициента трения.

Относительное обжатие при обкатке определяется по формуле

$$Q = \frac{D^2 - d^2}{D^2} \cdot 100\%,$$

Эту формулу можно представить в следующем виде:

$$Q = \left(1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2\right) \cdot 100\%.$$

Исходный диаметр заготовки  $D$  можно выразить через конечный диаметр  $d$ :

$$D = d + 2y = d + 2\mu^2 \cdot d = (1 + 2\mu^2)d.$$

Тогда получим предельное значение



$$Q = \left(1 - \left(\frac{1}{1+2\mu^2}\right)^2\right) \cdot 100\%, \quad (22)$$

и максимальное значение абсолютного обжатия:

$$\Delta H = D - d = 2y = \frac{2\mu^2 D}{(2\mu^2 + 1)}. \quad (23)$$

Значение коэффициента трения для пары сталь–сталь при холодной обкатке

находится в пределах от 0,03 до 0,15 [10–12]. По формуле (22) построена кривая зависимости предельного относительного обжатия от коэффициента трения (рис. 7).

Таким образом, в результате аналитических расчетов установлены основные параметры процесса правки цилиндрических деталей поперечной обкаткой плоскими плитами.

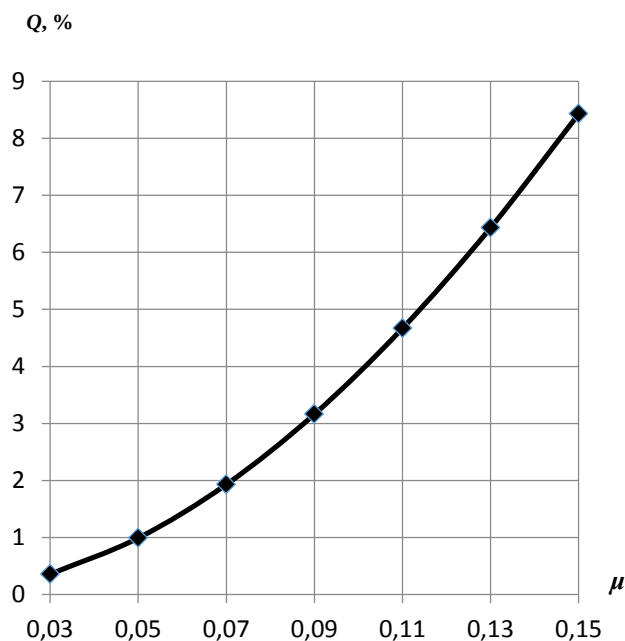


Рис. 7. Зависимость предельного относительного обжатия от коэффициента трения  
Fig. 7. Dependence of the limiting relative reduction on the coefficient of friction

### Выводы

1. Для правки небольших маложестких цилиндрических деталей типа валов и осей предложена схема поперечной обкатки плоскими плитами. Обработка происходит за счет упругого изгиба заготовки в направлении, противоположном исходной остаточной деформации, и изменения напряженного состояния путем вращения заготовки между плоскими плитами.

2. Разработанная математическая модель процесса правки дает вполне достоверные значения деформации изгиба, которые возникают после правки деталей методом поперечной обкатки плоскими плитами. Аналитическая зависимость для расчетного определения предельного ис-

ходного прогиба, общего прогиба при изгибе и степени относительного обжатия может быть рекомендована к практическому использованию в производстве для достижения прецизионной точности маложестких деталей типа валов.

3. Определена величина прогиба заготовки перед поперечной обкаткой, зависящая от ширины выступа плиты, материала и размера заготовки. Предельный исходный прогиб зависит от материала, диаметра и жесткости заготовки. Величина предельного относительного обжатия зависит от коэффициента трения между заготовкой и плоскими плитами.



### Библиографический список

1. Зайдес С.А., Емельянов В.Н. Влияние поверхностного пластического деформирования на качество валов: монография. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2017. 380 с.
2. Драчев О.И., Бобровский А.В., Воронов Д.Ю. Метод снижения коробления маложестких валов // Машиностроитель. 2001. № 6. С. 20–23.
3. Лапшин П.Н., Огнев О.Г., Манило И.И. Правка валов совместным действием поперечных и продольных сил // Аграрная наука: проблемы и перспективы: материалы науч.-практ. конф. (г. Курган, 2002 г.). Курган, 2002. С. 399–401.
4. Бубнов А.С. Технологические возможности процесса правки маложестких цилиндрических деталей стесненным сжатием // Вестник ИрГТУ. 2006. № 4. С. 68–75.
5. Манило И.И. Повышение эффективности правки, длинномерных деталей автотракторной и сельскохозяйственной техники – технологический резерв ремонтного производства // Материалы XLII науч.-техн. конф.: в 3 ч. (Челябинск, 30 января – 1 февраля 2003 г.). Челябинск, 2003. С. 234–240.
6. Смирнов В.С. и др. Поперечная прокатка в машиностроении. М.: Машгиз, 1957. 376 с.
7. Сахненко В.Л. Холодная гибка и правка деталей. М.: Машгиз, 1951. 108 с.
8. Бубнов А.С. Автоматизация процесса правки стесненным сжатием // Вестник ИрГТУ. 2010. № 5 (45). С. 22–26.
9. Фам Дак Фыонг, Зайдес С.А., Нгуен Ван Хуан. Определение условий поперечной обкатки при поверхностном пластическом деформировании // Вестник ИрГТУ. 2015. № 4 (99). С. 48–52.
10. Мураткин Г.В., Катова И.В. Математическая модель процесса правки деталей методом поверхностного пластического деформирования с предварительным изгибом заготовки // Обработка металлов давлением. 2004. № 6. С. 27–31.
11. Иванова Л.Н. Деформация валов и опор цилиндрических редукторов как фактор влияния на нагрузочную способность передачи // Вестник машиностроения. 2002. № 11. С. 17–22.
12. Блюменштейн В.Ю., Смелянский В.М. Механика технологического наследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин. М.: Машиностроение, 2007. 399 с.

### References

1. Zaides S.A., Emelyanov V.N. *Vliyaniye poverkhnostnogo plasticheskogo deformirovaniya na kachestvo valov* [Effect of surface plastic deformation on the quality of shafts]. Irkutsk: Irkutsk State Technical University Publ., 2017, 380 p. (In Russian).
2. Drachev O.I., Bobrovsky O.I., Voronov D.Yu. The method to reduce buckling of low rigidity shafts. *Mashinostroitel'* [Mechanical Engineer], 2001, no. 6, pp. 20–23. (In Russian).
3. Lapshin P.N., Ognev O.G., Manilo I.I. *Pravka valov sovmestnym deystviyem poperechnykh i prodol'nykh sil* [Shaft straightening by the joint action of transverse and longitudinal forces]. *Materialy nauchno-prakticheskoy konferencii Agrarnaya nauka "Problemy i perspektivy"* [Proceedings of the Scientific and Practical Conference "Agrarian Science: Problems and Perspectives" (Kurgan, 2002)]. Kurgan, 2002, pp. 399–401. (In Russian).
4. Bubnov A.S. Technological possibilities of the process of straightening low rigid cylindrical parts by constrained compression. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2006, no. 4. pp. 68–75. (In Russian).
5. Manilo I.I. *Povysheniye jeffektivnosti pravki, dlinnomernykh detalej avtotraktornoy i sel'skohozjajstvennoy tekhniki – tehnologicheskij rezerv remontnogo proizvodstva* [Improving efficiency of straightening long parts of autotractor and agricultural machinery – a technological reserve of repair production]. *Materialy XLII nauchno-tehnicheskoy konferencii Cheljabinskogo gosudarstvennogo agroinzhenerenogo universiteta: v treh chastyah* [Materials of XLII Scientific and Technical Conference of Chelyabinsk State Agroengineering University: in 3 parts, Chelyabinsk, 30 January – 1 February 2003]. Cheljabinsk, 2003, pp. 234–240. (In Russian).
6. Smirnov V.S. and etc. *Poperechnaya prokatka v mashinostroyenii* [Cross-rolling in mechanical engineering]. Moscow: Mashgiz, 1957, 376 p. (In Russian).
7. Sakhnenko V.L. *Kholodnaya gibka i pravka detaley* [Cold bending and straightening of parts]. Moscow: Mashgiz Publ., 1951. 108 p. (In Russian).
8. Bubnov A.S. Automation of the correcting process by constrained compression. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2010, no. 5 (45), pp. 22–26. (In Russian).
9. Pham Dac Phuong, Zaides S.A., Nguyen Van Huan. Determination of transverse burnishing conditions under surface plastic deformation. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2015, no. 4 (99), pp. 48–52. (In Russian).
10. Muratkin G.V., Katova I.V. Mathematical model of



part straightening by the method of surface plastic deformation with the preliminary bending of the billet. *Obrabotka metallov davleniem* [Pressure treatment of metals]. 2004. no. 6, pp. 27–31. (In Russian).

11. Ivanova L.N. Deformation of shafts and supports of cylindrical gearboxes as a factor influencing transmission load capacity. *Vestnik Mashinostroeniya* [Bulletin of Machine Building]. 2002, no. 11, pp. 17–22. (In Russian).

sian).

12. Blyumenshteyn V.YU., Smelyanskiy V.M. *Mekhanika tekhnologicheskogo nasledovaniya na stadiyakh obrabotki i ekspluatatsii detaley mashin* [Mechanics of technological inheritance at the stages of processing and operation of machine parts]. Moscow: Mechanical Engineering Publ., 2007, 399 p. (In Russian).

#### **Критерии авторства**

Зайдес С.А., Лэ Хонг Куанг заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

#### **Authorship criteria**

Zaides S.A., Le Hong Kuang declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

#### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### **Conflict of interests**

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.