

Технология и технологические машины

УДК 621.787.4

DOI 10.18698/0536-1044-2017-9-38-45

Упрочнение цилиндрических втулок поперечной обкаткой плоскими плитами

С.А. Зайдес, Дак Фьонг ФамИркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, Иркутск,
Российская Федерация, ул. Лермонтова, д. 83

Strengthening of Cylindrical Bushings by Transverse Burnishing with Flat Plates

S.A. Zaides, Pham Dac Phuong

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

 e-mail: zsa@istu.edu, dacphuong.ru88@gmail.com

i Рассмотрен новый способ отделочно-упрочняющей обработки цилиндрических втулок поперечной обкаткой плоскими плитами. С помощью программного комплекса ANSYS определено напряженно-деформированное состояние цилиндрических втулок при поперечной обкатке плоскими плитами. Получены пластическая деформация и точность формы втулок после обкатки, а также распределение остаточных напряжений в поперечном сечении втулок. Исследовано влияние относительного обжатия на формирование остаточных напряжений после поперечной обкатки втулок. Выявлено, что основными параметрами, от которых зависит напряженно-деформированное состояние втулки, являются толщина стенки, относительное обжатие и число оборотов заготовки. Результаты работы позволяют рекомендовать предложенный способ поперечной обкатки плоскими плитами для внедрения в технологию изготовления цилиндрических втулок с определенной толщиной стенки.

Ключевые слова: упрочнение втулок, поперечная обкатка, относительное обжатие, напряженно-деформированное состояние, пластическая деформация, толщина стенки

i A new method of finish-strengthening cylindrical bushings by transverse burnishing with flat plates is considered. Using the ANSYS software package, the stress-strain state of the cylindrical bushings under transverse rolling by flat plates is defined. The plastic deformation and the shape accuracy of the bushings after the transverse burnishing are determined. The distribution of residual stresses in the cross section of the bushings is obtained. The influence of the degree of percentage reduction on the formation of residual stresses of the bushings after transverse burnishing is analyzed. It is established that the wall thicknesses, the degree of percentage reduction and the number of the billet rotations are the main factors affecting the stress-strain state of the bushings. The results of the study allow the authors to recommend the proposed method of transverse burnishing by flat plates for introduction into the technology of manufacturing cylindrical bushings with a certain wall thickness.

Keywords: strengthening of bushings, transverse burnishing, percentage reduction, stress-strain state, plastic deformation, wall thickness

Постановка вопроса. Пустотелые оси и втулки обладают высокими эксплуатационными показателями прежде всего потому, что, имея меньшую массу, чем сплошные, удовлетворяют жестким требованиям к массе оборудования. Пустотелые оси имеют большие удельную прочность и жесткость, так как наружные слои таких деталей играют основную роль при сопротивлении изгибу и кручению. Кроме того, втулки позволяют осуществлять рациональную компоновку узлов путем пропуска через них и размещения внутри других деталей, что находит достаточно широкое распространение в машиностроении [1, 2].

Качество и степень использования пустотелых осей и втулок можно повысить применением упрочняющих технологий, основанных на методах поверхностного пластического деформирования (ППД), которые способны улучшить их эксплуатационные свойства. Этот наиболее доступный и относительно простой способ финишной обработки цилиндрических деталей дает возможность улучшать качество поверхности и формировать в поверхностном слое благоприятную схему распределения остаточных сжимающих напряжений [3–5]. Однако обработка пустотелых осей и втулок традиционными методами ППД имеет специфические особенности, обусловленные главным образом наличием продольного отверстия, которое существенно влияет на напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя. Наличие отверстия придает заготовке повышенную податливость, тем самым уменьшая эффективность обработки ППД. Поэтому упрочнение пустотелых осей и втулок путем ППД требует специального технологического и инструментального обеспечения.

В Иркутском национальном исследовательском техническом университете разработан новый способ и технологическое оснащение для отдельно-упрочняющей обработки цилиндрических деталей обкаткой плоскими плитами [6].

Поперечная обкатка плоскими плитами представляет собой перспективную технологию ППД [7]. К отличительным особенностям такой упрочняющей обработки относятся высокая производительность, возможность автоматизации технологического процесса и обкатки тонких (мало жестких) деталей, доступность пол-

ной обработки цилиндрической поверхности без переустановки детали, отсутствие центральных отверстий и изгиба при упрочнении, а также необходимости закрепления детали перед обкаткой.

В ранее выполненных исследованиях [8–9] установлено, что ППД обкаткой заготовки плоскими плитами является эффективным технологическим процессом, обеспечивающим высокое качество деталей типа сплошных валов и осей небольших размеров.

Цель работы — оценка возможности использования технологии обкатки плоскими плитами для упрочнения пустотелых цилиндрических деталей типа осей и втулок. Особый интерес в исследовании представляет толщина стенки втулки, при которой можно получить заданные параметры качества поверхностного слоя.

Моделирование процесса обкатки плоскими плитами. Такой процесс по кинематике аналогичен поперечно-клиновой прокатке [10]. Рабочий инструмент при поперечной обкатке имеет вид плоской плиты с малым углом заходной части α_1 (рис. 1, а). Небольшой угол α_2 в выходной части рабочего инструмента служит для уменьшения концентрации напряжений при выходе детали из зоны обработки.

В данной работе рассмотрено напряженно-деформированное состояние втулки при поперечной обкатке в зависимости от толщины стенки t и числа оборотов n заготовки. Расчет проведен с помощью прикладной программы ANSYS [11], предназначенной для математического моделирования различных физических процессов на основе метода конечных элементов. Для выполнения вычислений в программе ANSYS построены геометрические модели в виде втулки и двух плит (рис. 1, б). При поперечной обкатке ожидалась пластическая деформация и остаточные напряжения в поверхностных слоях заготовки, поэтому в процессе моделирования цилиндра была построена неравномерная — сгущающаяся к поверхности сетка. Локальное измельчение сетки в поверхностных слоях выполнено заданием средней длины сторон элементов на поверхности и количества сгущающихся слоев, причем сетка меняет размер, становясь более грубой к оси

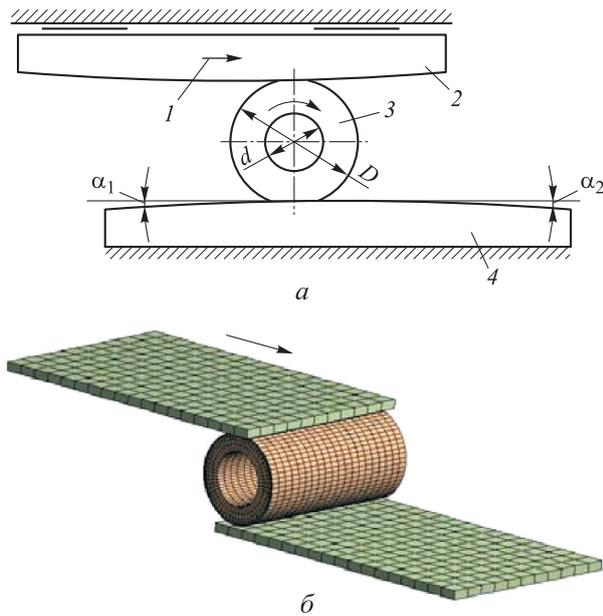


Рис. 1. Схема (а) и конечно-элементная модель (б) поперечной обкатки цилиндрических втулок плоскими плитами:
1 — направление перемещения подвижной плиты;
2 — подвижная плита; 3 — заготовка;
4 — неподвижная плита

цилиндра. Для моделирования выбраны рабочие плиты размером $22 \times 2 \times 35$ мм, принятые абсолютно жесткими, а также втулки, выполненные из стали Ст45 (предел текучести $\sigma_T = 360$ МПа) с наружным диаметром $D = 10$ мм, длиной 20 мм и отверстиями разного диаметра.

В схеме, приведенной на рис. 1, нижняя плита неподвижна, а верхняя опускается вниз до необходимой степени обжатия заготовки и перемещается вправо до тех пор, пока втулка не совершит один полный оборот. После этого верхняя плита поднимается в исходное поло-

жение, и происходит полная разгрузка заготовки. Таким образом, во всем объеме цилиндра формируются остаточные деформация и напряжения.

Влияние толщины стенки втулки на ее напряженно-деформированное состояние при поперечной обкатке. При малой относительной толщине стенки втулки ($t/R = 0,2$, где R — наружный радиус втулки) при ее обкатке в поперечном сечении возникает радиальная деформация в двух противоположных направлениях: в одном диаметр детали увеличивается, а в другом — уменьшается (рис. 2, а). При этом обработанные детали приобретают овальную форму, и отклонение от круглости является значительным. При большой относительной толщине стенки ($t/R = 0,5$) радиальная деформация происходит в одном направлении (к центру), причем идентичная радиальная деформация поверхностных слоев обеспечивает высокую точность обработки (рис. 2, б).

Отклонение от круглости наружной поверхности цилиндра Δ определяется сопоставлением радиальных деформаций всех точек на его поверхности по формуле $\Delta = u_{r \max} - u_{r \min}$, где $u_{r \max}$ — максимальная радиальная деформация; $u_{r \min}$ — минимальная радиальная деформация (рис. 3).

На рис. 4 показаны зависимости отклонения от круглости Δ и радиальной деформации u_r от относительной толщины стенки втулки. При малой толщине стенки ($t/R = 0,2$) пластическая деформация оказывается незначительной, что приводит к отсутствию геометрического искажения после разгрузки втулки.

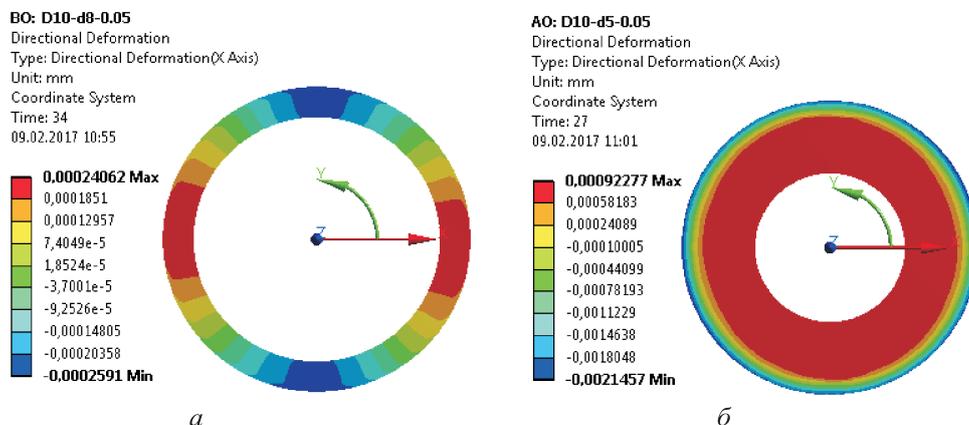


Рис. 2. Поля распределения радиальных деформаций, мм, при поперечной обкатке втулок плоскими плитами для разных значений относительной толщины стенки:
а — $t/R = 0,2$; б — $t/R = 0,5$

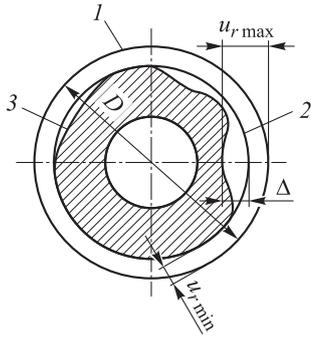


Рис. 3. Схема отклонения от круглости втулки при ее обкатке:

- 1 — исходная окружность поперечного сечения втулки;
- 2 — номинальная окружность после обкатки;
- 3 — реальная окружность после обкатки

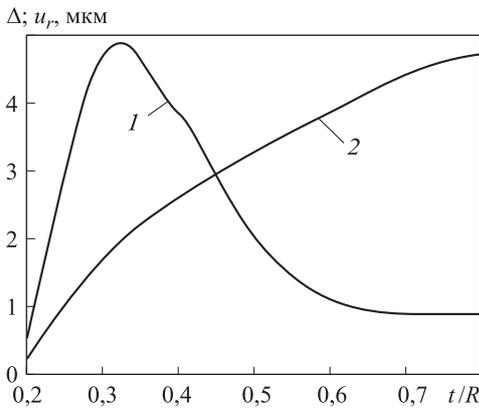


Рис. 4. Зависимость отклонения от круглости Δ (1) и радиальной деформации u_r (2) от относительной толщины t/R стенки втулки

Отсутствие металла в центральной зоне детали позволяет подповерхностным слоям упруго деформироваться в радиальном направлении, в результате чего на металл поверхностных слоев в зоне контакта действует малое давление со стороны плиты. Поэтому наблюдается небольшая остаточная радиальная деформация. С увеличением относительной толщины стенки втулки пластическая деформация происходит более интенсивно и монотонно возрастает. Максимальное отклонение соответствует толщине $t \approx 0,32R$. При дальнейшем росте толщины стенки происходит резкое уменьшение параметра Δ .

При обкатке втулок необходимо учитывать возможное изменение диаметра отверстия Δd , так как большое Δd приводит к необходимости повторной обработки втулок. Зависимость изменения диаметра отверстия после обкатки втулки плоскими плитами от относительной толщины стенки показана на рис. 5. Изменение диаметра отверстия оказалось достаточно ма-

лым ($\Delta d = 0,5 \dots 5,0$ мкм), и при $t/R > 0,5$ оно незначительно влияет на точность обработанных отверстий.

После полной разгрузки в детали появляются радиальные σ_r , тангенциальные σ_ϕ и осевые σ_z остаточные напряжения. Для втулок с толщиной стенки $t = 0,5R$ после обкатки формируются остаточные напряжения, показанные на рис. 6.

При обкатке втулок радиальные остаточные напряжения σ_r по всему сечению детали оказываются растягивающими и обращаются в нуль на поверхности. Тангенциальные σ_ϕ и осевые σ_z напряжения являются сжимающими в периферийных слоях заготовки и приобретают максимальное значение на некоторой глубине от поверхности. В отличие от напряженного состояния сплошного цилиндра, при поперечной

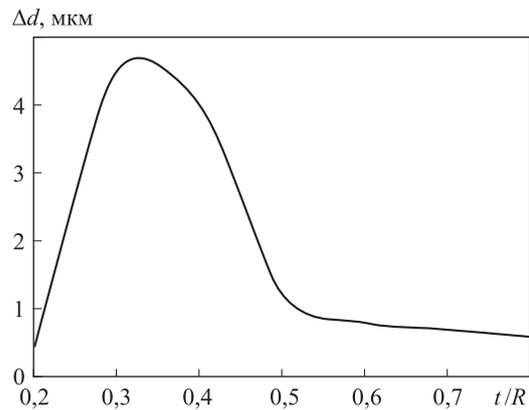


Рис. 5. Зависимость изменения диаметра отверстия Δd после обкатки втулки плоскими плитами от относительной толщины t/R ее стенки

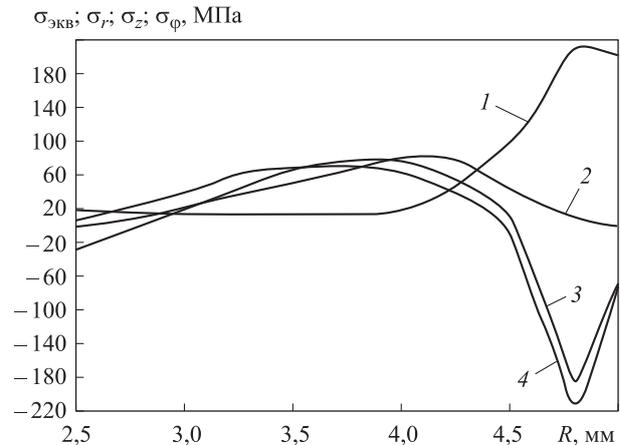


Рис. 6. Распределение эквивалентных $\sigma_{экв}$ (1), радиальных σ_r (2), осевых σ_z (3) и тангенциальных σ_ϕ (4) остаточных напряжений по радиусу R втулки после обкатки плоскими плитами ($t = 0,5R$)

Таблица 1

Значения рабочих и максимальных остаточных напряжений при разных значениях толщины стенки втулки

Толщина стенки втулки t , мм	Напряжение, МПа				
	$\sigma_{\text{раб}}$	$\sigma_{r\text{max}}$	$\sigma_{\varphi\text{max}}$	$\sigma_{z\text{max}}$	$\sigma_{\text{экв max}}$
1,0	361	0,5	-8	-7	10
1,5	366	15	-87	-50	84
2,0	382	36	-105	-60	127
2,5	398	81	-212	-184	209
3,0	405	102	-285	-221	242
3,5	412	135	-299	-254	263
4,0	415	143	-315	-262	275

обкатке втулки растягивающие остаточные напряжения уменьшаются в прилегающей к отверстию зоне. Эквивалентные напряжения $\sigma_{\text{экв}}$ монотонно уменьшаются от поверхности к центру детали. Для втулок со стенками другой толщины получено аналогичное распределение остаточных напряжений. При разной толщине стенки формируются разные максимальные значения сжимающих напряжений в тангенциальном и осевом направлениях и растягивающего радиального напряжения. В табл. 1 приведены значения рабочих $\sigma_{\text{раб}}$ и максимальных остаточных напряжений при разных значениях толщины стенки после одного оборота втулки.

Согласно результатам расчета, способ поперечной обкатки можно использовать для упрочнения втулок со стенкой достаточной толщины, так как эффект упрочнения металла резко падает при снижении t . Например, втулки диаметром 10 мм при относительном обжатии 1 % желательно обкатывать при толщине стенки не менее 2,5 мм ($t = 0,5R$).

Влияние относительного обжатия на формирование остаточных напряжений после поперечной обкатки втулок. Втулки с наружным диаметром $D = 10$ мм и стенкой толщиной $t = 2,5$ мм, выполненные из стали Ст45, упрочняли поперечной обкаткой при разных значениях относительного обжатия Q , определяемого по формуле

$$Q = \frac{F_{\text{и}} - F_{\text{пр}}}{F_{\text{пр}}} = \left(1 - \frac{D_{\text{вн}}^2}{D^2}\right) \cdot 100 \%,$$

где $F_{\text{и}}$ — площадь исходного сечения заготовки; $F_{\text{пр}}$ — площадь поперечного сечения за-

готовки после обкатки; $D_{\text{вн}}$ — внешний диаметр втулки после обработки.

Значение относительного обжатия при поперечной обкатке выбрано с учетом рационального диапазона $Q = 0,6 \dots 2$ %. Увеличение относительного обжатия приводит к росту рабочих напряжений в очаге деформации с 370 до 420 МПа.

Зависимость максимальных остаточных напряжений и доли пластической деформации цилиндра от относительного обжатия показана на рис. 7. Максимальные эквивалентные остаточные напряжения резко растут при увеличении относительного обжатия Q с 0,6 до 1 %, при дальнейшем повышении Q они возрастают в меньшей степени. Уровень пластической деформации втулки после поперечной обкатки оценивается долей пластической деформации δ (%), представляющей собой отношение пластической деформации к абсолютному обжатию ΔH ($\delta = (\Delta D / \Delta H) \cdot 100$ %). С увеличением Q пластическая деформация непрерывно возрастает. Следовательно, эффект упрочнения будет оптимальным при относительном обжатии $Q = 1 \dots 2$ %.

Влияние числа оборотов втулки на ее напряженно-деформированное состояние при поперечной обкатке. При такой обработке сплошного цилиндра число его оборотов несущественно влияет на напряженно-деформированное состояние [8]. Рассмотрим, как меняется эта закономерность при поперечной обкатке втулок с относительной толщиной стенки $t/R = 0,5$ при разных значениях

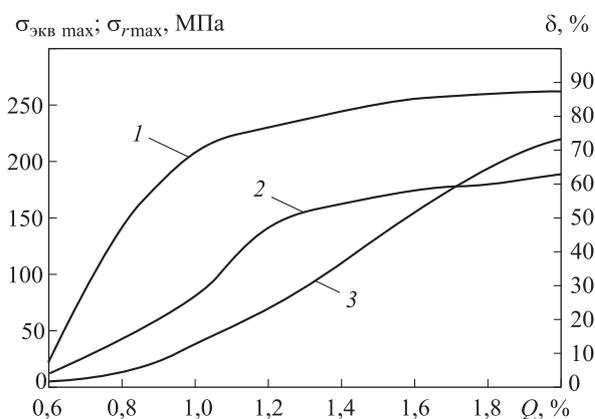


Рис. 7. Зависимость максимальных эквивалентных $\sigma_{\text{экв max}}$ (1), растягивающих радиальных $\sigma_{r\text{max}}$ (2) остаточных напряжений и доли пластической деформации δ (3) цилиндра от относительного обжатия Q при $t = 0,5R$

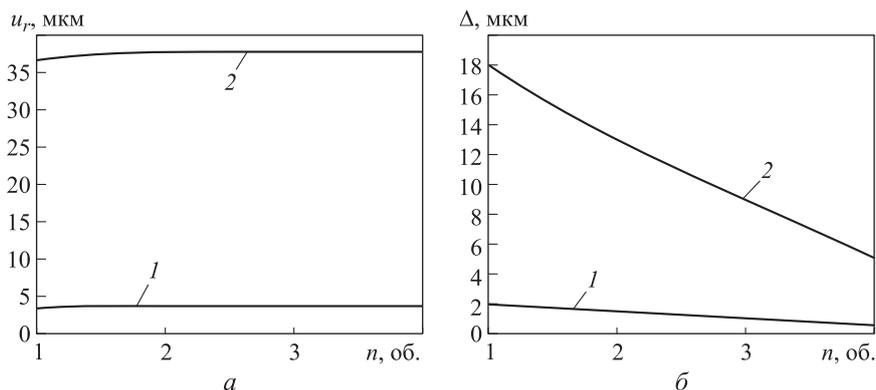


Рис. 8. Зависимости радиальной деформации u_r (а) и отклонения от круглости Δ (б) от числа оборотов n втулки при различных значениях относительного обжатия: 1 — $Q = 1\%$; 2 — $Q = 2\%$

числа оборотов ($n = 1, 2, 4$) и относительном обжатии $Q = 1\%$.

При первом обороте втулки рабочие напряжения, вызывающие основную пластическую деформацию, оказываются максимальными (397 МПа). При последующих оборотах рабочие напряжения снижаются и остаются постоянными (365 МПа).

Анализируя зависимости радиальной деформации (рис. 8, а) и остаточных напряжений (табл. 2) от числа оборотов втулки, можно сделать вывод, что дополнительные обороты детали несущественно влияют на изменение ее диаметра и значения остаточных напряжений. При увеличении числа оборотов отклонение от круглости втулки значительно уменьшается (рис. 8, б). Таким образом, дополнительные обороты способствуют устранению отклонений формы втулки, возникших на предыдущем обороте. Чем больше относительное обжатие, тем выше эффективность устранения отклонения от последующих оборотов.

Увеличение числа оборотов при поперечной обкатке цилиндров и втулок не ухудшает

Таблица 2

Значения остаточных напряжений при относительном обжатии $Q = 1\%$ и различных значениях числа оборотов втулки

Число оборотов n	Напряжение, МПа			
	σ_r	σ_ϕ	σ_z	$\sigma_{\text{экв}}$
1	81/-1,7	65/-212	76/-184	209/12
2	85/1,6	67/-221	78/-178	215/15
4	76/1,3	64/-210	73/-182	210/13

Примечание. В числителе указаны максимальные значения напряжения, в знаменателе — минимальные.

благоприятную схему распределения остаточных напряжений и позволяет значительно снизить отклонение от круглости деталей. Однако с повышением n существенно возрастает длина рабочих плит, усложняется изготовление рабочих инструментов и одновременно уменьшается производительность процесса.

В связи с этим при поперечной обкатке необходимо стремиться к уменьшению числа оборотов при обеспечении заданной точности обработанных деталей.

Выводы

1. Предложена новая отделочно-упрочняющая обработка пустотелых деталей типа втулок, основанная на обкатке деталей плоскими плитами. С помощью программы ANSYS рассмотрено напряженно-деформированное состояние втулок при поперечной обкатке.

2. Выявлено, что толщина стенки и число оборотов заготовки оказывают большое влияние на эффект упрочнения и точность обработанных втулок. Полученные результаты позволяют рекомендовать необходимую толщину стенки детали при поперечной обкатке плоскими плитами.

3. Проведенные исследования показали, что для упрочненных втулок толщина стенки $t = 0,5R$. При этом рациональное значение относительного обжатия находится в диапазоне 1...2 %.

4. Число оборотов заготовки не способствует повышению благоприятной схемы распределения остаточных напряжений, но существенно улучшает геометрическую точность обработанных втулок.

Литература

- [1] Манило И.И., Ерофеев В.В., Клочков А.С. Совмещение процессов правки полых сварных валов изгибом и контроля герметичности швов. *Современная наука — агропромышленному производству. Сб. науч. тр.*, Тюмень, ГАУ Северного Зауралья, 2014, т. 2, с. 169–171.
- [2] Абакумова С.Ю., Гуляев А.В., Сидякин Ю.И., Трунин А.В. О выборе глубины наклепа при упрочняющей обкатке полых валов роликами. *Известия ВолгГТУ*, 2013, № 7, с. 5–8.
- [3] Смелянский В.М. *Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием*. Москва, Машиностроение, 2002. 300 с.
- [4] Блюменштейн В.Ю., Смелянский В.М. *Механика технологического наследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин*. Москва, Машиностроение, 2007. 399 с.
- [5] Зайдес С.А., Емельянов В.Н., Попов М.Е. *Деформирующая обработка валов*. Иркутск, Изд-во ИрГТУ, 2013. 452 с.
- [6] Зайдес С.А., Фам Дак Фыонг. Пат. 2600302 РФ, МПК-В21Н 1/18. *Устройство для обкатывания цилиндрических изделий плоскими инструментами*, бюл. № 29, 2016.
- [7] Фам Дак Фыонг, Зайдес С.А., Нгуен Ван Хуан. Определение условий поперечной обкатки при поверхностном пластическом деформировании. *Вестник ИрГТУ*, 2015, № 4, с. 48–52.
- [8] Зайдес С.А., Фам Дак Фыонг. Поверхностное пластическое деформирование поперечной обкаткой плоскими плитами. *Упрочняющие технологии и покрытия*, 2016, № 5, с. 6–12.
- [9] Зайдес С.А., Фам Дак Фыонг. Оценка качества цилиндрических деталей после поперечной обкатки плоскими плитами. *Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации)*. Матер. докл. VI Всерос. науч.-техн. конф., Иркутск, 25–27 апреля 2016, Иркутск, Изд-во ИрГТУ, 2016, с. 74–85.
- [10] Кожевникова Г.В. *Теория и практика поперечно-клиновой прокатки*. Минск, Беларус Наука, 2010. 291 с.
- [11] Басов К.А. *ANSYS в примерах и задачах*. Москва, Компьютер Пресс, 2002. 224 с.

References

- [1] Manilo I.I., Erofeev V.V., Klochkov A.S. Sovmeshchenie protsessov pravki polykh svarnykh valov izgibom i kontrolia germetichnosti shvov [Matching dressing process welded hollow shaft control twists and sealed seams]. *Sovremennaiia nauka — agropromyshlennomu proizvodstvu. Sb. nauch. tr.* [Modern science — for agricultural production: collection of scientific papers]. Tyumen, GAU Severnogo Zaural'ia publ., 2014, vol. 2, pp. 169–171.
- [2] Abakumova S.Iu., Guliaev A.V., Sidiakin Iu.I., Trunin A.V. O vybore glubiny naklepa pri uprochniaiushchei obkatke polykh valov rolikami [On the choice of the depth of hardening at hardening the running rollers of the hollow shaft]. *Izvestiia VolgGTU* [The news of Volgograd state technical University]. 2013, no. 7, pp. 5–8.
- [3] Smelianskii V.M. *Mekhanika uprochneniia detalei poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem* [Mechanics hardening of parts surface plastic deformation]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2002. 300 p.
- [4] Bliumenshtein V.Iu., Smelianskii V.M. *Mekhanika tekhnologicheskogo nasledovaniia na stadiakh obrabotki i ekspluatatsii detalei mashin* [Mechanics of technological inheritance on the stages of processing and exploitation of machine parts]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2007. 399 p.
- [5] Zaides S.A., Emel'ianov V.N., Popov M.E. *Deformiruiushchaia obrabotka valov* [Deforming shaft machining]. Irkutsk, IrSTU publ., 2013. 452 p.
- [6] Zaides S.A., Fam Dak Fyong. *Ustroistvo dlia obkatyvaniia tsilindricheskikh izdelii ploskimi instrumentami* [The device of orbital cylindrical products-tools]. Patent RF no. 2600302. 2016.
- [7] Fam Dak Fyong, Zaides S.A., Nguen Van Khuan. Opredelenie uslovii poperechnoi obkatki pri poverkhnostnom plasticheskom deformirovanii [Determination of transverse burnish-
ing conditions at surface plastic deformation].

- ing conditions under surface plastic deformation]. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2015, no. 4, pp. 48–52.
- [8] Zaides S.A., Fam Dak Fyong. Poverkhnostnoe plasticheskoe deformirovanie poperechnoi obkatkoi ploskimi plitami [Surface plastic deformation by transverse burnishing with flat plates]. *Uprochniaiushchie tekhnologii i pokrytiia* [Strengthening Technologies and Coatings]. 2016, no. 5, pp. 6–12.
- [9] Zaides S.A., Fam Dak Fyong. Otsenka kachestva tsilindricheskikh detalei posle poperechnoi obkatki ploskimi plitami. [Assessment of the quality of cylindrical parts after the lateral running of flat plates]. *Zhiznennyi tsikl konstruktsionnykh materialov (ot polucheniia do utilizatsii)*. *Materialy dokladov 6 Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [The life cycle of structural materials (from receipt to disposal). Proceedings of the 6 All-Russian scientific and technical conference]. Irkutsk, 25–27 April 2016, Irkutsk, IrSTU publ., 2016, pp. 74–85.
- [10] Kozhevnikova G.V. *Teoriia i praktika poperechno-klinovoi prokatki* [Theory and practice of cross-wedge rolling]. Minsk, Belarus Nauka publ., 2010. 291 p.
- [11] Basov K.A. *ANSYS v primerakh i zadachakh* [ANSYS in examples and tasks]. Moscow, Kompiuter Press, 2002. 224 p.

Статья поступила в редакцию 24.04.2017

Информация об авторах

ЗАЙДЕС Семен Азикович (Иркутск) — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Машиностроительные технологии и материалы». Иркутский национальный исследовательский технический университет (664074, Иркутск, Российская Федерация, ул. Лермонтова, д. 83, e-mail: zsa@istu.edu).

ФАМ Дак Фыонг (Иркутск) — аспирант кафедры «Машиностроительные технологии и материалы». Иркутский национальный исследовательский технический университет (664074, Иркутск, Российская Федерация, ул. Лермонтова, д. 83, e-mail: dacphuong.ru88@gmail.com).

Information about the authors

ZAIDES Semen Azikovich (Irkutsk) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of Mechanical Engineering Technologies and Materials Department. Irkutsk National Research Technical University (664074, Irkutsk, Russian Federation, Lermontov St., Bldg. 83, e-mail: zsa@istu.edu).

PHAM Dac Phuong (Irkutsk) — Postgraduate, Mechanical Engineering Technologies and Materials Department. Irkutsk National Research Technical University (664074, Irkutsk, Russian Federation, Lermontov St., Bldg. 83, e-mail: dacphuong.ru88@gmail.com).