

Машиностроение и машиноведение

УДК 621.982.44

doi: 10.18698/0536-1044-2019-12-5-13

Определение качества поверхностного слоя мало жестких цилиндрических изделий после правки поперечной обкаткой гладкими плитами

С.А. Зайдес, Хонг Куанг Лэ

Иркутский национальный исследовательский технический университет

Determining the Quality of the Surface Layer of Low-Stiff Cylindrical Products after Straightening with Transverse Burnishing with Smooth Plates

S.A. Zaides, Hong Quang Le

Irkutsk National Research Technical University

Для восстановления формы мало жестких цилиндрических деталей типа валов и осей предложена правка поперечным изгибом с последующей обработкой заготовок способом поверхностного пластического деформирования, основанного на поперечной обкатке гладкими плитами. Приведены экспериментальные и расчетные результаты по определению влияния абсолютного обжата на основные характеристики качества поверхностного слоя деталей: шероховатость поверхности и остаточные напряжения. Анализ данных экспериментального исследования по оценке деталей после правки поперечной обкаткой гладкими плитами выявил следующие положительные изменения: резкое уменьшение исходной шероховатости, формирование равновесных сжимающих остаточных напряжений в поверхностных слоях и обеспечение стабилизации точности обработанной детали по размерам и форме. В зависимости от абсолютного обжата качество поверхности повышается на 2–3 класса, образуются достаточно большие (до 375 МПа) сжимающие остаточные напряжения. Результаты работы позволяют рекомендовать предлагаемый способ правки поперечной обкаткой гладкими плитами для внедрения в технологию восстановления деталей машин.

Ключевые слова: восстановление деталей машин, абсолютное обжатие, поперечная обкатка, шероховатость поверхности, остаточные напряжения, цилиндрическая заготовка

To restore the shape of low-stiff cylindrical parts such as shafts and axles, straightening by transverse bending with the subsequent processing of workpieces by the method of surface plastic deformation based on the transverse burnishing with smooth plates is proposed. The experimental and calculated results are presented to determine the effect of absolute

compression on the main characteristics of the quality of the surface layer of parts such as surface roughness and residual stresses. The analysis of experimental data for the evaluation of the parts after straightening by transverse burnishing showed the following positive changes: a sharp decrease in the initial roughness, the formation of equilibrium residual compressive stresses in the surface layers and ensuring stabilization of the accuracy of the processed part in size and shape. Depending on the magnitude of the absolute reduction, the surface quality increases by 2–3 classes, and rather large compressive residual stresses are formed (up to 375 MPa). The results of the work justify recommending the proposed method of straightening by transverse burnishing with smooth plates for implementation into the technology of machine part restoration.

Keywords: restoration of machine parts, absolute compression, transverse burnishing, surface roughness, residual stresses, cylindrical workpiece

Среди деталей машин цилиндрической формы сформировался класс мало жестких валов, изготовление которых на современном этапе развития техники и технологии представляет определенные трудности. Одной из них является обеспечение точности на этапах производства или ремонта деталей малой жесткости. Поэтому в технологические процессы изготовления и сборки не жестких деталей с отношением длины к диаметру более 10 обычно включают несколько операций правки [1–5].

Правка — это традиционный способ восстановления геометрической формы искривленных деталей. Большой вклад в развитие теории и технологии правки цилиндрических изделий внесли Я.Д. Вишняков, А.С. Донсков, В.Н. Емельянов, Г.В. Мураткин, И.И. Манило, Н.П. Шапов и другие ученые.

Однако в некоторых случаях распространенные способы такой обработки, например правка изгибом или растяжением, не обеспечивают должного результата. Они дают временный эффект либо приводят к повреждению поверхности, что недопустимо при восстановлении прямолинейности деталей машин [3–6].

Кроме того, неравномерность и неустойчивость напряженного состояния деталей после правки служит ограничением для включения этой технологической операции в изготовление особо точных конструкций [7–9].

Для решения перечисленных проблем разработана новая кинематика правки, позволяющая снизить неравномерность напряженного состояния в деталях машин и повысить производительность такой обработки.

В качестве перспективного направления рассмотрена правка поперечным изгибом при воздействии распределенной нагрузки с последующим упрочнением цилиндрической заготовки

поверхностным пластическим деформированием (ППД), основанным на поперечной обкатке заготовки гладкими плитами [10, 11]. Кинематика и режимы правки поперечной обкаткой гладкими плитами изложены в работах [10, 12]. Эта технологическая операция аналогична поперечно-клиновой прокатке [13–16].

Правка поперечной обкаткой гладкими плитами является новым способом обработки мало жестких цилиндрических деталей [12], поэтому состояние деталей имеет значение для внедрения такой операции в процесс изготовления и восстановления деталей машин.

Для внедрения правки поперечной обкаткой гладкими плитами в технологию восстановления деталей машин необходимо оценить основные характеристики качества поверхностного слоя — шероховатость и остаточные напряжения (ОН). Результаты определения ОН в деталях упрочненным ППД приведены в работах [17–19], а напряжение в очаге деформации при ППД — в публикациях [20, 21].

Цель работы — определение показателей качества цилиндрических деталей после правки — шероховатости и ОН.

Методика выполнения экспериментов. Объекты и параметры исследования. В качестве исследуемых деталей использованы пять цилиндрических образцов диаметром 10 мм, длиной 200 мм с максимальным прогибом 0,5 мм, выполненных из конструкционной углеродистой стали Ст45.

Основными параметрами экспериментов, влияющими на качество правки (геометрическую точность деталей и качество поверхностного слоя) приняты коэффициент изгиба и абсолютное обжатие [10, 12, 22]. Качество деталей после правки оценивали по ОН и параметрам шероховатости.

Параметры процесса правки. Правка изгибом осуществляется путем упругопластического изгиба до значения общего прогиба в направлении, противоположном исходному прогибу. Зависимость между исходным $f_{исх}$ и общим $f_{общ}$ прогибами можно представить в виде

$$f_{общ} = \xi f_{исх},$$

где ξ — коэффициент изгиба.

Из материалов работы [12, 22] выбраны коэффициенты изгиба в пределах 5,3...5,5 и значения абсолютного обжатия, не превышающие 0,4 мм.

Каждый образец после выправления поперечным изгибом на правильно-обкатном станке обкатывали с абсолютным обжатием $\Delta H = 0,07; 0,10; 0,15; 0,20; 0,25$ мм. После такой правки все детали подвергали обкатке за четыре полных оборота перед выходом из зоны обработки.

Последовательность процесса правки. В соответствии с кинематической схемой (рис. 1, а) правильно-обкатной станок работает следующим образом. Вращение от вала электродвигателя 2 передается через червячный редуктор 1 на рабочий винт 3. С помощью резьбового отверстия в подвижной плите 5 вращательное движение винта преобразуется в поступательное, вследствие чего плита 5 перемещается влево на значение общего прогиба, измеряемое индикатором 4 (т. е. реализуется перегиб заготовки, необходимый для ее выправления).

Далее подвижная плита сдвигается вправо (разгрузка), и заготовка принимает прямую форму. После этого плита 5 продолжает перемещаться вправо, реализуя поперечную обкатку обрабатываемой детали 7. Изменение значения абсолютного обжатия осуществляется путем подъема вверх или вниз неподвижной плиты 8. Обратное движение подвижной плиты происходит вследствие реверсирования вращения электродвигателя.

Внешний вид правильно-обкатного станка для правки маложестких цилиндрических деталей поперечной обкаткой гладкими плитами показан на рис. 1, б, где привод, состоящий из мотора и редуктора, находится под защитным кожухом.

Результаты экспериментальных исследований. Шероховатость и волнистость поверхности изделий. Измерение параметров шероховатости

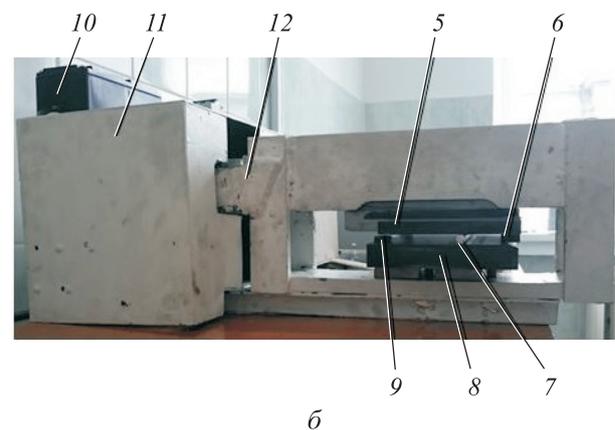
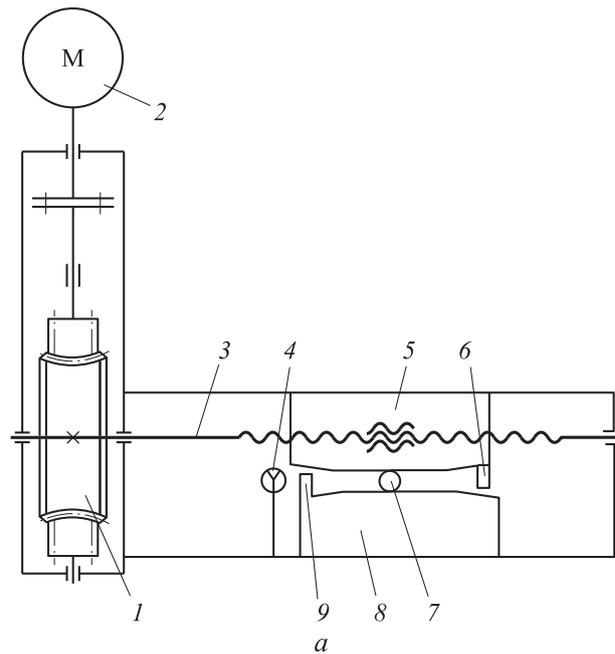


Рис. 1. Кинематическая схема (а) и внешний вид (б) правильно-обкатного станка:

- 1 — червячный редуктор; 2 — электродвигатель;
- 3 — рабочий винт; 4 — индикатор; 5 и 6 — подвижная плита и ее выступ; 7 — обрабатываемая деталь;
- 8 — неподвижная плита; 9 — упоры нижней плиты;
- 10 — переключатель; 11 — привод станка (под защитным кожухом); 12 — станина

выполнено на профилометре Taylor Hobson Form Talysurf i200 с компьютерным управлением. Исходную и получаемую шероховатости каждого образца измеряли на трех разных участках по окружности. Результаты средних значений из трех измерений показаны на рис. 2. При увеличении абсолютного обжатия шероховатость поверхности деталей уменьшается.

Профилограммы поверхности образца до и после правки показаны на рис. 3, где h и l — высота и длина профиля. Исходная шероховатость поверхности деталей составляет около 5,0 мкм (класс 6). После правки поперечной об-

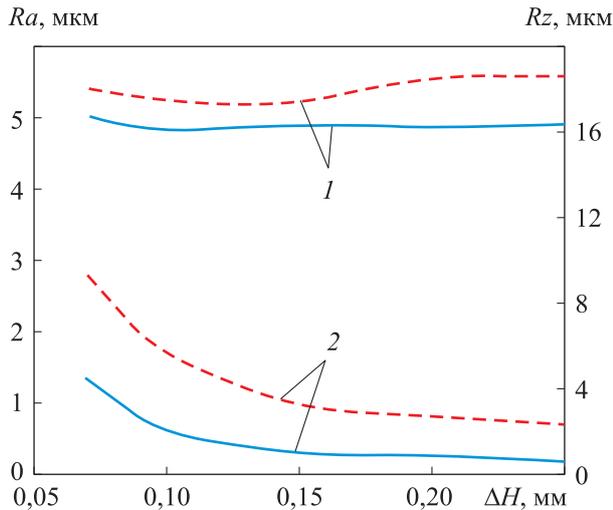


Рис. 2. Зависимость параметров шероховатости обкатанной поверхности Ra (—) и Rz (- -) от абсолютного обжата ΔH до (1) и после (2) правки

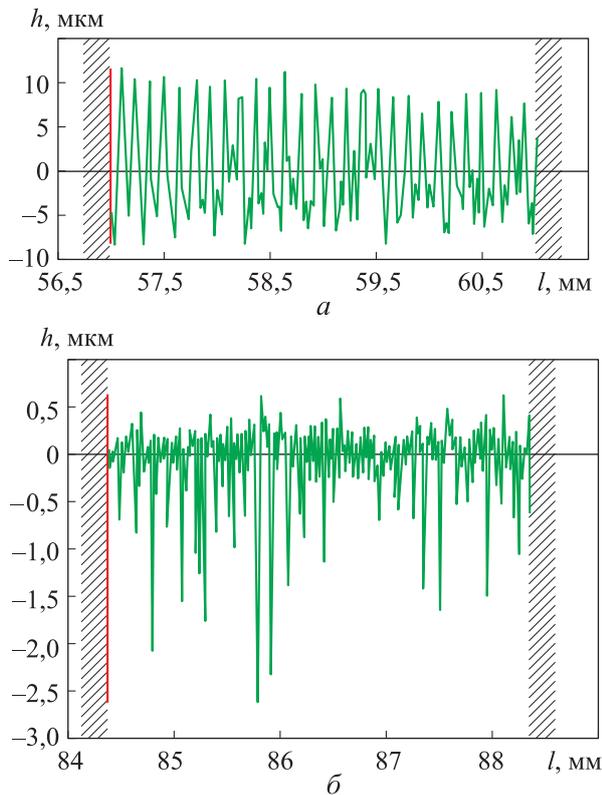


Рис. 3. Профилограммы поверхности образца:
 а — до правки в масштабе 1:1 ($Ra = 4,92$ мкм, $Rz = 18,07$ мкм, высота волнистости $W_z = 15,33$ мкм);
 б — после правки с абсолютным обжатием $\Delta H = 0,25$ мм в масштабе 10:1 ($Ra = 0,19$ мкм, $Rz = 2,36$ мкм, $W_z = 3,24$ мкм)

каткой шероховатость уменьшается до 0,19 мкм (до класса 9).

Правка поперечной обкаткой позволяет существенно снизить шероховатость поверхности деталей. Это объясняется тем, что в отличие от

локальных методов правки при поперечной обкатке очаг деформации распространен на всю длину образующей линии цилиндра. Это дает более благоприятное условие выглаживания микронеровностей в направлении оси цилиндра.

При увеличении абсолютного обжата силы прижима инструментов к обрабатываемой поверхности повышаются. При малом значении абсолютного обжата происходит неполное выглаживание неровностей, так как небольшое удельное давление не позволяет полностью деформировать микронеровности поверхности.

Правка поперечной обкаткой также приводит к резкому уменьшению (более чем в 3–4 раза) высоты волнистости W_z (рис. 4). Эффективность снижения высоты волнистости незначительно изменяется при возрастании абсолютного обжата.

Для локальных способов правки цилиндрических деталей методом ППД при нежесткой системе станок — приспособление — инструмент — деталь (СПИД) вследствие появления вынужденных колебаний волнистость поверхности может увеличиваться.

При правке поперечной обкаткой гладкими плитами длинный очаг деформации вдоль оси заготовки в сочетании с высокой жесткостью системы СПИД обеспечивает высокую геометрическую стабильность обработки. Поэтому такой способ правки приводит к снижению волнистости.

Остаточные напряжения на поверхности деталей. Для измерения ОН использовали прибор XStressG3/G3R. С его помощью определяли ОН методом рентгеноструктурного анализа напряжений, основанным на излучении дифракционной стоячей волны большой интен-

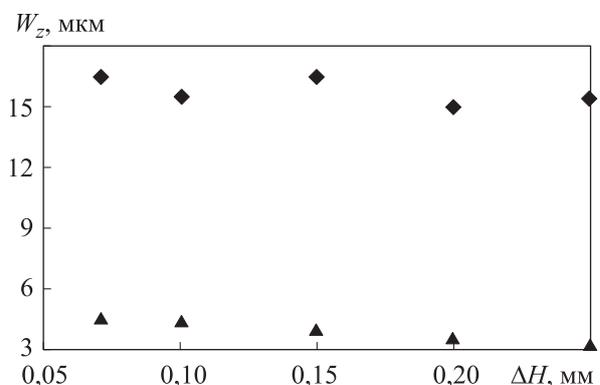


Рис. 4. Зависимость высоты волнистости W_z от абсолютного обжата ΔH до (◆) и после (▲) правки

сивности при различных значениях угла падения рентгеновских лучей на поверхность металла. Этот неразрушающий метод служит для оценки напряжений в поверхностном слое металла.

Остаточные напряжения на обработанной поверхности измеряли в четырех точках 1–4 по окружности на поверхности сечений А–А, Б–Б, В–В (рис. 5), после чего вычисляли их среднеарифметические значения.

В каждой точке получены ОН в двух направлениях: вдоль оси — осевые ОН σ_z и поперек оси — тангенциальные ОН σ_θ . Результаты измерения ОН после правки изгибом приведены в табл. 1, а среднеарифметические значения ОН после поперечной обкатки гладкими плитами — в табл. 2.

После правки поперечным изгибом формируются неравновесные напряжения по сечению и длине заготовки (см. табл. 1), поэтому со временем форма детали может снова исказиться. Для выравнивания неравновесных напряженных состояний в маложестких цилиндрических деталях предлагается дополнительно обрабатывать заготовки методом ППД, основанным на поперечной обкатке гладкими плитами.

Экспериментально установлено, что после правки поперечной обкаткой гладкими плитами на поверхности детали формируются равновесные ОН, а в поверхностных слоях заготовки — сжимающие ОН (см. табл. 2). Эти напряжения, суммируясь с напряжениями от эксплуатационных нагрузок, смещают среднее напряжение цикла в сторону сжатия.

Если учесть, что сталь Ст45 (как и все конструкционные материалы) значительно лучше сопротивляется сжатию, чем растяжению, то сжимающие ОН в поверхностном слое многократно повышают усталостную долговечность

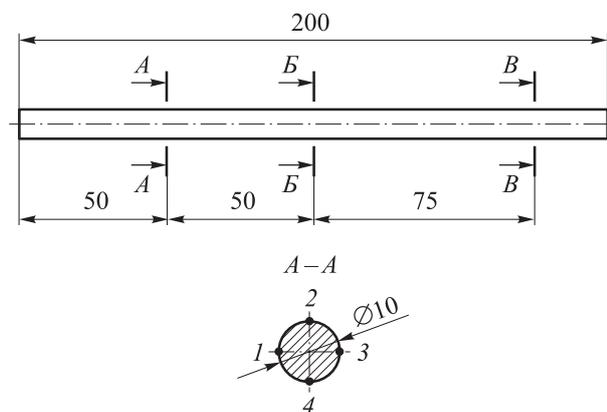


Рис. 5. Схема измерения ОН

Таблица 1

Остаточные напряжения на поверхности деталей после правки поперечным изгибом

Точка	ОН, МПа, в сечениях					
	А – А		Б – Б		В – В	
	σ_z	σ_θ	σ_z	σ_θ	σ_z	σ_θ
1	-71	-2	-179	-9	-15	-1,5
2	-1	0	+2	+1	0	0
3	+75	3	+180	+8	+16	1,2
4	+2	0	-6	+1	0	0

Таблица 2

Остаточные напряжения на поверхности деталей после правки поперечной обкаткой гладкими плитами

Абсолютное обжатие ΔH , мм	ОН, МПа, в сечениях					
	А – А		Б – Б		В – В	
	σ_z	σ_θ	σ_z	σ_θ	σ_z	σ_θ
0,07	-172	-263	-176	-263	-170	-261
0,10	-209	-280	-211	-279	-210	-281
0,15	-268	-297	-270	-298	-265	-298
0,20	-289	-348	-295	-351	-287	-350
0,25	-323	-375	-327	-374	-317	-372

деталей. При правке поперечной обкаткой с увеличением абсолютного обжатия сжимающие ОН растут. Большие ОН распределены в тангенциальном направлении. В среднем они в 1,5–2 раза превышают осевые ОН.

Расчет ОН в программе ANSYS Workbench.

Влияние абсолютного обжатия на ОН в цилиндрических деталях исследовали также с помощью конечно-элементного моделирования с использованием программы ANSYS Workbench [23, 24]. Для определения ОН в выправленных деталях построена конечно-элементная модель в виде цилиндра и двух плит в программе ANSYS Workbench (рис. 6).

Параметры моделирования. Заготовка представляет собой цилиндр диаметром 10 мм, длиной 200 мм с максимальным прогибом 0,5 мм, выполненный из стали Ст45 (с пределом текучести $\sigma_t = 360$ МПа и модулем упругости $E = 2 \cdot 10^5$ МПа). Рабочие плиты размером 5×205×205 мм приняты абсолютно жесткими. Конечно-элементная форма — гексаэдр, сгущение 9030 элементов, 40 620 узлов. Коэффициент трения между заготовкой и плитами $\mu = 0,15$.

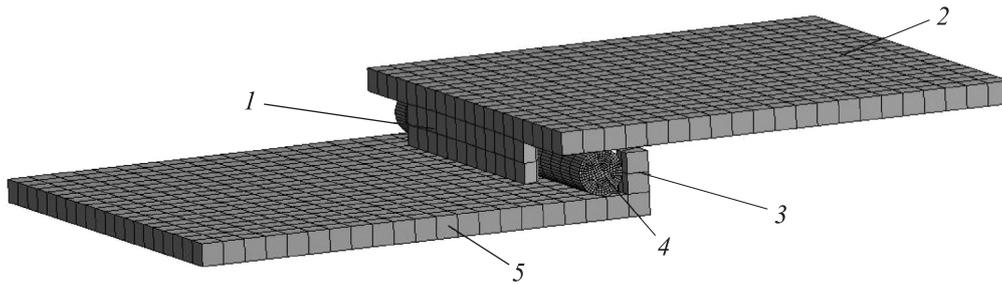


Рис. 6. Конечно-элементная модель для определения ОН:

1 — выступ подвижной плиты; 2 — подвижная плита; 3 — упоры нижней плиты; 4 — заготовка; 5 — неподвижная плита

Граничные условия: жесткое фиксирование неподвижной плиты. Согласно экспериментальным данным [22], для выправления цилиндра диаметром $D = 10$ мм с прогибом 0,5 мм общий прогиб должен составлять 2,65 мм.

Режимы обработки. Подвижная плита перемещается вправо на 2,65 мм (общий прогиб равен 2,65 мм). Осуществляется разгрузка первоначального положения этой плиты, и происходит выправление в направлении заготовки. Подвижная плита смещается вниз на значение абсолютного обжатия ($\Delta H = 0,07; 0,1; 0,15; 0,20; 0,25$ мм). Далее она перемещается влево на 62,83 мм (заготовка поворачивается на один оборот) и поднимается вверх на 1 мм (разгрузка).

Зависимости осевых и тангенциальных ОН от абсолютного обжатия, полученные путем эксперимента и моделирования в среде ANSYS,

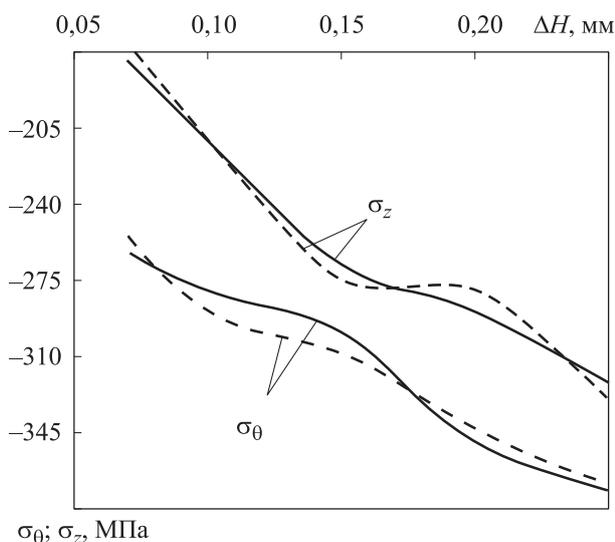


Рис. 7. Расчетные (---) и экспериментальные (—) зависимости осевых σ_z и тангенциальных σ_θ ОН от абсолютного обжатия ΔH

приведены на рис. 7. Расчетные данные подтверждают сделанные ранее выводы о положительном влиянии процесса правки поперечной обкаткой на знак ОН.

Расчетные и экспериментальные данные различаются не более чем на 6 %. Следовательно, результаты определения ОН в конечно-элементной модели достоверны для оценки напряженного состояния деталей из стали Ст45 при правке поперечной обкаткой гладкими плитами.

Кроме того, использование конечно-элементного моделирования позволяет получить более полную информацию об ОН в любой точке деталей (по их сечению и длине), что дает возможность прогнозировать их напряженно-деформированное состояние без длительных и дорогостоящих испытаний на практике.

Выводы

1. Экспериментальные исследования по оценке качества деталей после правки поперечной обкаткой гладкими плитами показали следующие положительные изменения: резкое уменьшение исходной шероховатости и формирование равновесных сжимающих ОН в поверхностных слоях. При поперечной обкатке в зависимости от абсолютного обжатия качество поверхности повышается на 2–3 класса, образуются достаточно большие (до 375 МПа) сжимающие ОН.

2. На основании результатов исследования можно утверждать, что для выправления маложестких цилиндрических деталей типа валов и осей целесообразно использовать предлагаемый метод правки поперечной обкаткой гладкими плитами, позволяющий получать детали высокого качества.

Литература

- [1] Иванов В.П., Кастрюк А.П. Основные направления ресурсосбережения в ремонтном производстве. *Труды ГОСНИТИ*, 2013, т. 112, ч. 2, с. 15–18.
- [2] Мураткин Г.В., Катова И.В. Математическая модель процесса правки деталей методом поверхностного пластического деформирования с предварительным изгибом заготовки. *Металлообработка*, 2004, № 6, с. 27–31.
- [3] Коцюбинский О.Ю., Творогова Р.С., Рубина Е.Э. Правка растяжением стальных заготовок типа стержней. *Станки и инструмент*, 1976, № 5, с. 34–35.
- [4] Емельянов В.Н., Васильев П.Г., Олисов В.Н. Правка прямых валов поверхностным пластическим деформированием. *Автоматизированное проектирование в машиностроении*, 2014, № 2, с. 92–97.
- [5] Arent R.R., Mukai D.J., Robinson P.F. Heat Straightening Rolled Shapes. *Journal of structural engineering New York*, 2000, vol. 126, iss. 7, pp. 755–763, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2000)126:7(755)
- [6] Батищев А.Н., Голубев И.Г., Лялякин В.П. *Восстановление деталей сельскохозяйственной техники*. Москва, Информагротех, 1995. 295 с.
- [7] Бубнов А.С. Технологические возможности процесса правки маложестких цилиндрических деталей стесненным сжатием. *Вестник ИрГТУ*, 2006, № 4, с. 68–75.
- [8] Романова О.Г., Драчев А.О. Расчет технологических режимов при холодной правке валов изгибом. *Известия ВолгГТУ*, 2008, т. 4, № 9(47), с. 99–102.
- [9] Манило И.И., Тютрин С.Г., Клочков А.С., Городских А.А., Герасимов С.В. Повышение точности ориентации валов с дефектами поверхности при их правке на прессах. *Инновации и исследования в транспортном комплексе. Матер. I Междунар. науч.-практ. конф.*, Курган, Российская транспортная академия, 2013, с. 86–87.
- [10] Зайдес С.А., Лэ Хонг Куанг. Аналитический расчет основных параметров процесса правки маложестких цилиндрических деталей поперечной обкаткой плоскими плитами. *Вестник ИрГТУ*, 2018, т. 22, № 3, с. 24–34, doi: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-3-24-34>
- [11] Zaides S.A., Fam Dak Fong. Roughness of Cylindrical Parts in Transverse Burnishing by Flat Plates. *Russian Engineering Research*, 2018, vol. 38, no. 12, pp. 921–925, doi: 10.3103/S1068798X18120420
- [12] Зайдес С.А., Лэ Хонг Куанг. *Способ правки маложестких цилиндрических деталей*. Патент № 2685826 РФ, бюл. № 12, 2019.
- [13] Кожевникова Г.В. *Теория и практика поперечно-клиновой прокатки*. Минск, Беларус. Наука, 2010. 291 с.
- [14] Андреев Г.В., Клушкин В.А., Макушок Е.М., Сегал В.М., Шукин В.Я. *Поперечно-клиновая прокатка*. Минск, Наука и техника, 1974. 160 с.
- [15] Шукин В.Я., Степаненко А.В., ред. *Основы поперечно-клиновой прокатки*. Минск, Наука и техника, 1986. 223 с.
- [16] Клушин В.А., Рудович А.О. *Технология и оборудование поперечно-клиновой прокатки*. Минск, ФТИ НАН Беларуси, 2010. 300 с.
- [17] Zaides S.A., Nguyen Van Hinh. Influence of Oscillatory Smoothing on the Residual Stress in Cylindrical Components. *Russian Engineering Research*, 2018, vol. 38, no. 11, pp. 859–864, doi: 10.3103/S1068798X18110217
- [18] Саушкин М.Н., Радченко В.П., Павлов В.Ф. Метод расчета полей остаточных напряжений и пластических деформаций в цилиндрических образцах с учетом анизотропии процесса поверхностного упрочнения. *Прикладная механика и техническая физика*, 2011, т. 52, № 2, с. 173–182.
- [19] Кузнецова Е.В., Горбач О.Н., Кузнецов Р.В., Мелехин А.Ю., Горбач К.В. Влияние технологических параметров изготовления на уровень остаточных напряжений в оболочках тепловыделяющих элементов. *Прикладная математика и вопросы управления*, 2017, № 4, с. 118–131.
- [20] Макаревич С.С., Мрочек Ж.А., Кожуро Л.М., Пашкевич М.Ф., Ильющенко А.Ф. *Остаточные напряжения*. Минск, УП «Технопринт», 2003. 352 с.

- [21] Блюменштейн В.Ю., Смеленский В.М. *Механика технологического исследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин*. Москва, Машиностроение-1, 2007. 400 с.
- [22] Зайдес С.А., Лэ Хонг Куанг. Оценка напряженного состояния цилиндрических деталей при поперечной правке. *Технология металлов*, 2019, № 2, с. 23–28, doi: 10.31044/1684-2499-2019-2-0-23-28
- [23] Басов К.А., Красковский Д.Г. *ANSYS в примерах и задачах*. Москва, Компьютер Пресс, 2002. 224 с.
- [24] Chen Xiaolin, Liu Yijun. *Finite Element Modeling and Simulation with ANSYS Workbench*. CRC Press, 2014. 411 p.

References

- [1] Ivanov V.P., Kastyuk A.P. The main directions of resource-saving in repair industry. *Trudy GOSNITI*, 2013, vol. 112, pt. 2, pp. 15–18 (in Russ.).
- [2] Muratkin G.V., Katova I.V. Matematicheskaya model' protsessa pravki detaley metodom poverkhnostnogo plasticheskogo deformirovaniya s predvaritel'nym izgibom zagotovki. *Metalloobrabotka*, 2004, no. 6, pp. 27–31 (in Russ.).
- [3] Kotsyubinskiy O.Yu., Tvorogova R.S., Rubina E.E. Editing by Stretching Steel Rod Type Billets. *Stanki i instrument*, 1976, no. 5, pp. 34–35 (in Russ.).
- [4] Emel'yanov V.N., Vasil'yev P.G., Olisov V.N. Editing straight shafts by surface plastic deformation. *Avtomatizirovannoye proyektirovaniye v mashinostroyenii*, 2014, no. 2, pp. 92–97 (in Russ.).
- [5] Avent R.R., Mukai D.J., Robinson P.F. Heat Straightening Rolled Shapes. *Journal of structural engineering New York*, 2000, vol. 126, iss. 7, pp. 755–763, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2000)126:7(755)
- [6] Batishchev A.N., Golubev I.G., Lyalyakin V.P. *Vosstanovleniye detaley sel'skokhozyaystvennoy tekhniki* [Restoration of parts of agricultural machinery]. Moscow, Informagrotekh publ., 1995. 295 p.
- [7] Bubnov A.S. Technological capabilities of the process of editing low-stiff cylindrical parts with constrained compression. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*, 2006, no. 4, pp. 68–75 (in Russ.).
- [8] Romanova O.G., Drachev A.O. Calculation of technological regimes for cold straightening shafts. *Izvestia VSTU*, 2008, vol. 4, no. 9(47), pp. 99–102 (in Russ.).
- [9] Manilo I.I., Tyutrin S.G., Klochkov A.S., Gorodskikh A.A., Gerasimov S.V. Povysheniye tochnosti oriyentatsii valov s defektami poverkhnosti pri ikh pravke na pressakh. *Innovatsii i issledovaniya v transportnom komplekse: materialy I mezhdunar. nauchn.-prakt. konf.* [Innovations and research in the transport sector: Proceedings of the I International Scientific and Practical Conference]. Kurgan, 2013, pp. 86–87.
- [10] Zaydes S.A., Le Khong 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 Russ.), doi: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-3-24-34>
- [11] Zaides S.A., Fam Dak Fong. Roughness of Cylindrical Parts in Transverse Burnishing by Flat Plates. *Russian Engineering Research*, 2018, vol. 38, no. 12, pp. 921–925, doi: 10.3103/S1068798X18120420
- [12] Zaydes S.A., Le Khong Kuang. *Sposob pravki malozhestkikh tsilindricheskikh detaley* [The method of editing malozhestki cylindrical parts]. Patent RF no. 2685826, 2019.
- [13] Kozhevnikova G.V. *Teoriya i praktika poperechno-klinovoy prokatki* [Theory and practice of cross-wedge rolling]. Minsk, Belarus. Nauka publ., 2010. 291 p.
- [14] Andreyev G.V., Klushkin V.A., Makushok E.M., Segal V.M., Shchukin V.Ya. *Poperechno-klinovaya prokatka* [Cross-wedge rolling]. Minsk, Nauka i tekhnika publ., 1974. 160 p.
- [15] *Osnovy poperechno-klinovoy prokatki* [Basics of cross-wedge rolling]. Ed. Shchukin V.Ya., Stepanenko A.V. Minsk, Nauka i tekhnika publ., 1986. 223 p.
- [16] Klushin V.A., Rudovich A.O. *Tekhnologiya i oborudovaniye poperechno-klinovoy prokatki* [Technology and equipment cross-wedge rolling]. Minsk, FTI NAN Belarusi publ., 2010. 300 p.

- [17] Zaides S.A., Nguyen Van Hinh. Influence of Oscillatory Smoothing on the Residual Stress in Cylindrical Components. *Russian Engineering Research*, 2018, vol. 38, no. 11, pp. 859–864, doi: 10.3103/S1068798X18110217
- [18] Saushkin M.N., Radchenko V.P., Pavlov V.F. The method of calculating the fields of residual stresses and plastic deformations in cylindrical samples taking into account the anisotropy of the process of surface hardening. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika*, 2011, vol. 52, no. 2, pp. 173–182 (in Russ.).
- [19] Kuznetsova E.V., Gorbach O.N., Kuznetsov R.V., Melekhin A.Yu., Gorbach K.V. Influence of technological parameters of production on the level of residual stresses in covers of fuel elements. *Applied Mathematics and Control Sciences*, 2017, no. 4, pp. 118–131 (in Russ.).
- [20] Makarevich S.S., Mrochek Zh.A., Kozhuro L.M., Pashkevich M.F., Il'yushchenko A.F. *Ostatochnyye napryazheniya* [Residual stress]. Minsk, UP "Tekhnoprint" publ., 2003. 352 p.
- [21] Blyumenshteyn V.Yu., Smelenskiy V.M. *Mekhanika tekhnologicheskogo issledovaniya na stadiyakh obrabotki i ekspluatatsii detaley mashin* [Mechanics of technological research at the stages of processing and operation of machine parts]. Moscow, Mashinostroyeniye-1 publ., 2007. 400 p.
- [22] Zaydes S.A., Le Khong Kuang. Assessment of stressed state of cylindrical parts under transverse straightening by flat plates. *Tekhnologiya metallov*, 2019, no. 2, pp. 23–28 (in Russ.), doi: 10.31044 / 1684-2499-2019-2-0-23-28
- [23] Basov K.A., Kraskovskiy D.G. *ANSYS v primerakh i zadachakh* [ANSYS in examples and tasks]. Moscow, Komp'yuter Press publ., 2002. 224 p.
- [24] Chen Xiaolin, Liu Yijun. *Finite Element Modeling and Simulation with ANSYS Workbench*. CRC Press, 2014. 411 p.

Статья поступила в редакцию 17.06.2019

Информация об авторах

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

ЛЭ Хонг Куанг — аспирант кафедры «Машиностроительные технологии и материалы». Иркутский национальный исследовательский технический университет (664074, Иркутск, Российская Федерация, ул. Лермонтова, д. 83, e-mail: mybo91@gmail.com).

Information about the authors

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

LE Hong Quang — Postgraduate, Mechanical Engineering Technologies and Materials Department. Irkutsk National Research Technical University (664074, Irkutsk, Russian Federation, Lermontov St., Bldg. 83, e-mail: mybo91@gmail.com).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Зайдес С.А., Лэ Хонг Куанг. Определение качества поверхностного слоя мало жестких цилиндрических изделий после правки поперечной обкаткой гладкими плитами. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2019, № 12, с. 5–13, doi: 10.18698/0536-1044-2019-12-5-13

Please cite this article in English as:

Zaides S.A., Hong Quang Le. Determining the Quality of the Surface Layer of Low-Stiff Cylindrical Products after Straightening with Transverse Burnishing with Smooth Plates. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2019, no. 12, pp. 5–13, doi: 10.18698/0536-1044-2019-12-5-13