



Влияние остаточных напряжений на изгибную жесткость валов, упрочненных охватывающим деформированием

© Л.Г. Климова

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: Цель – исследовать влияние технологических остаточных напряжений на изгибную жесткость цилиндрических деталей типа валов и осей. Исследования проведены на удлиненных цилиндрических образцах (из стали марки 35 диаметром 30 мм) с использованием метода растачивания и обтачивания. Образцы отжигали в защитной среде для удаления начальных остаточных напряжений. Эксперименты выполнены на лабораторной гидравлической испытательной машине Amsler с использованием твердосплавных матриц марки ВК8. Эксперименты показали, что при сверхмалой степени относительного обжатия – от 0,1 до 0,5% – размер слоя с тангенциальными остаточными напряжениями сжатия постепенно уменьшается. Жесткость таких цилиндрических заготовок остается практически неизменной. При увеличении относительного обжатия (от 0,5 до 1,2%) происходит уменьшение остаточных напряжений сжатия на поверхности детали. Толщина слоя с тангенциальными остаточными напряжениями сжатия начинает увеличиваться. При этом остаточный прогиб становится меньше, изгибная жесткость увеличивается. Установлено, что степень относительного обжатия не влияет на изменение глубины распределения осевых остаточных напряжений. Оптимального распределения тангенциальных остаточных напряжений сжатия можно достичь за счет увеличения их глубины. Установлена линейная закономерность при степенях относительного обжатия от 0,1 до 1,0%. Самое большое сопротивление изгибу зафиксировано у упрочненных относительным обжатием образцов с близкими к 1,0% величинами. Обработав заготовки охватывающим деформированием с обжатием 1,0% и нагрузив их поперечной силой 0,6 кН, можно добиться уменьшения искажения при изгибе и увеличить прочность деталей в 5 раз. Установлено, что на изгибную жесткость цилиндрических валов большое влияние оказывают остаточные напряжения сжатия. Глубина залегания остаточных напряжений оказывает различное влияние на жесткость цилиндрических деталей. Таким образом, правильно воспользовавшись упрочняющим охватывающим деформированием, можно сформировать качественный поверхностный слой деталей с заранее заданным распределением остаточных напряжений.

Ключевые слова: степень обжатия, остаточные напряжения, охватывающее деформирование, цилиндрический образец, изгибная жесткость, поверхностный слой

Для цитирования: Климова Л.Г. Влияние остаточных напряжений на изгибную жесткость валов, упрочненных охватывающим деформированием. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2021. Т. 25. № 4. С. 412–420. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-4-412-420>

Effects of residual stresses on the bending stiffness of shafts strengthened by enveloping deformation

Larisa G. Klimova

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: The aim was to study the effects of technological residual stresses on the bending stiffness of cylindrical parts of shafts and axes. Experiments were conducted for elongated cylindrical specimens made of steel grade 35 with a diameter of 30 mm using boring and turning methods. Specimens were annealed in a protective medium to remove initial residual stresses. Experiments were carried out using an Amsler laboratory hydraulic testing machine and VK8 grade hard-alloy matrices. The experiments showed that, for an extremely low degree of relative crimping of 0.1 to 0.5%, the size of the layer with tangential residual compression stresses gradually decreases. The stiffness of such cylindrical workpieces remains almost unchanged. An increase in relative crimping (from 0.5 to 1.2%) leads to a decrease in residual compression stresses on the part surface. The layer thickness with tangential residual compression stresses starts to increase. This leads to a decreased residual buckling and an increased bending stiffness. It was found that the degree of relative crimping has no effect on the variation of distribution depth of axial residual stresses. Optimal distribution of tangential residual compression stresses can be reached by increasing their depth. A linear relationship was found for relative crimping of 0.1 to 1.0%. The highest bending resistance was recorded for specimens strengthened by residual crimping

of about 1.0%. By processing workpieces using enveloping deformation with crimping of 0.1% and loading them with a transverse force of 0.6 kN, bending distortion can be decreased and the strength of parts can be increased by 5 times. It was found that the bending stiffness of cylindrical shafts is greatly affected by residual compression stresses. The bedding depth of residual stresses has various effects on the stiffness of cylindrical parts. Thus, correct use of strengthening enveloping deformation can form a high-quality surface layer on parts with the pre-defined distribution of residual stresses.

Keywords: compression degree, residual stresses, enveloping deformation, cylindrical sample, bending stiffness, surface layer

For citation: Klimova L.G. Effects of residual stresses on the bending stiffness of shafts strengthened by enveloping deformation. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(4):412–420. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-4-412-420>

ВВЕДЕНИЕ

В современном машиностроении можно увидеть тенденцию к уменьшению металлоемкости изделий. Происходит это за счет создания новых конструкционных материалов с высокой прочностью и имеющих особые эксплуатационные свойства¹ [1]. Анализ литературных источников, посвященных задаче повышения прочности, показал многообразие проводимых аналитических и эмпирических исследований. Повышение прочности материала позволяет снижать размеры поперечных сечений деталей типа валов и осей. При таком подходе сформировался класс маложестких деталей, к которым относятся шпиндели станков, ходовые винты, цилиндрические направляющие, штоки и целый ряд аналогичных деталей [2, 3].

Надежность нежестких деталей оценивается не только качеством поверхностного слоя, но и точностью формы, которая характеризуется жесткостью. Жесткость определяется способностью деталей сопротивляться внешним и внутренним силовым факторам, то есть упругому деформированию.

Для изделий цилиндрической формы жесткость можно оценить отношением величины поперечной нагрузки к максимальной стреле прогиба [4]. При изготовлении деталей и на их эксплуатацию негативно влияет малая изгибная жесткость [5, 6].

Форма изделия, условия нагружения и физико-механические свойства материала – это факторы, определяющие изгибную жесткость цилиндрических деталей [7]. На практике только модуль упругости (E или G) способствует изменению жесткости деталей. Условия нагружения и геометрические параметры, как правило, бывают уже заданы. Однако в работах^{2,3} [8] установлено, что на модуль упругости обычные температурно-силовые изменения почти не оказывают никакого влияния.

В работах [9, 10] рассмотрена возможность изменения изгибной жесткости деталей за счет формирования остаточных напряжений. Однако эти результаты получены на схематичных законах распределения остаточных напряжений [11].

Для отделочно-упрочняющей обработки длинномерных валов авторами [12–14] предложен процесс охватывающего пластического деформирования. При этом за счет получения бездислокационных кристаллов и торможения движущихся дислокаций происходит повышение прочности изделия. Такой процесс деформирования обладает не только высокой производительностью, но и способностью формировать качественный поверхностный слой деталей с заданным распределением остаточных напряжений. Этот способ упрочнения был использован в данной работе.

¹Зуев Л.Б., Данилов В.И. Физические основы прочности металлов: учеб. пособ. Долгопрудный: ИД «Интеллект», 2013. 376 с.

²Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов. Киев: Изд-во «Наукова думка», 1988. 736 с.

³Реслер И., Хордерс Х., Бекер М. Механическое поведение конструкционных материалов: учеб. пособ. Долгопрудный: ИД «Интеллект», 2011. 504 с.



Целью исследования явилась экспериментальная проверка влияния остаточных напряжений на изгибную жесткость длинных деталей типа валов, штанг, осей.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для выполнения эксперимента использовали образцы цилиндрической формы из стали 35 (с пределом текучести = 360 МПа, пределом прочности = 485 МПа).

Такие образцы были вырезаны из длиномерных заготовок. Для определения остаточных напряжений использовался механический метод расточки и обточки цилиндрических деталей. Этот метод был предложен Г. Заксом и усовершенствован Л.А. Гликманом и А.Н. Бабаевым [15].

Последовательность определения остаточных напряжений:

- 1) сверление и растачивание цельных цилиндрических образцов;
- 2) измерение радиальных и осевых деформаций цилиндрических образцов;
- 3) на основании этих данных произведен расчет главных компонент тензора остаточных напряжений:

$$\sigma_z^o = \frac{E}{1-\nu^2} \left[(A_n - A) \frac{d(\varepsilon_z + \nu\varepsilon_\phi)}{dA} - (\varepsilon_z + \nu\varepsilon_\phi) \right];$$

$$\sigma_\phi^o = \frac{E}{1-\nu^2} \left[(A_n - A) \frac{d(\varepsilon_\phi + \nu\varepsilon_z)}{dA} - \frac{A_n + A}{2A} (\varepsilon_\phi + \nu\varepsilon_z) \right];$$

$$\sigma_r^o = \frac{E}{1-\nu^2} \frac{A_n - A}{2A} (\varepsilon_\phi + \nu\varepsilon_z),$$

где $\sigma_z^o, \sigma_\phi^o, \sigma_r^o$ – соответственно, осевые, тангенциальные и радиальные остаточные напряжения; E – модуль упругости первого рода; A_n – площадь, связанная с внешним диаметром цилиндра; A – переменная площадь, связанная с радиусом рассматриваемого слоя; $\varepsilon_z, \varepsilon_\phi$ – относительное изменение длины и внешнего диаметра, т.е. геометрии детали при растачивании цилиндра.

На цилиндрических образцах удаляли

снаружи концентрические слои металла. Чтобы получить остаточные напряжения в периферийных слоях, измеряли осевые и тангенциальные деформации внутри образцов.

На устойчивость остаточных напряжений влияет изменение геометрии деталей, и как следствие изменение свойств металла, связанное с заранее выполненным растачиванием. Поэтому способом Г. Закса были определены специальные поправки на остаточные напряжения, измеряемые при помощи такого растачивания [3].

Для проверки правильности определения остаточных напряжений использовали интегральные условия равновесия:

$$\int_0^A \sigma_z^o \cdot dA = 0; \quad \nu \int_0^{r_n} \sigma_\phi^o \cdot dr = 0.$$

При растачивании и обтачивании цилиндрических образцов происходит нагрев металла, создавая неоднородное температурное поле внутри детали. Кроме этого, микрогеометрия изделия меняется. В местах обработки деталей происходит дробление зерен, которые теряют первоначальную форму и резко меняют соотношение размеров. При этом структура основного металла, где зерна расположены беспорядочно, отличается от обработанных участков, на которых зерна вытягиваются в направлении деформирования. В данном случае действительная величина остаточных напряжений будет нестабильна. Чтобы этого не произошло, были выполнены специальные эксперименты, которые помогли подобрать режимы резания, не влияющие на изменения остаточных напряжений в металлических образцах. Были подготовлены отоженные образцы без остаточных напряжений и на них эти режимы прошли тестирование. Благодаря связи толщины снимаемого слоя с деформацией образцов выполнены расчеты составляющих тензора остаточных напряжений. Для этого удаляли концентрические слои цилиндра и с точностью ± 1 мкм измеряли его искажения в осевом и радиальном направлениях.

Оптимальное число удаляемых слоев было определено при помощи математиче-

ской обработки результатов опытов⁴. Эксперименты с охватывающим деформированием выполняли на лабораторной гидравлической машине Амслер при помощи матриц ВК8, изготовленных из твердых сплавов. Образцы для обнуления начальных остаточных напряжений отжигали в защитной среде. Для определения оптимального числа замеров после удаления каждого слоя были построены кривые деформаций. Для проведения опытов использовали стальные валы диаметром 30 мм (сталь 35). Матрица была постоянной, и чтобы получить нужную степень относительного обжатия, был рассчитан начальный диаметр цилиндра.

Остаточные напряжения рассчитаны по результатам выполненных экспериментов с охватывающим деформированием [16].

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве основного параметра охватывающего деформирования, от которого зависят величина и характер распределения остаточных напряжений, принята степень относительного обжатия (Q), которую определяли по формуле [3]:

$$Q = \frac{D_H^2 - D_K^2}{D_H^2} \cdot 100\%,$$

где D_H , D_K – измеренный диаметр образца до и после охватывающего деформирования.

При выполнении экспериментов степень относительного обжатия находилась в пределах от 0,1 до 5%.

В таблице представлены максимальные значения осевых σ_z^o и тангенциальных σ_ϕ^o остаточных напряжений, а также глубина распределения (Δ) остаточных напряжений сжатия в поверхностных слоях.

Величину изгибной жесткости упрочненных прутков оценивали экспериментально. Для этого к середине цилиндра, который устанавливали на две призмы, попеременно

прикладывали груз величиной 0,2; 0,4; 0,6 кН. Для определения остаточного прогиба использовали микроиндикаторную головку.

Зависимость максимальных остаточных напряжений на поверхности и глубины их распределения от величины относительного обжатия

Dependence of maximum surface residual stresses and their distribution depths on the value of relative compression

Опыт	Q, %	σ_z^o max, МПа	Δ_z^{\max} , мм	σ_ϕ^o max, МПа	Δ_ϕ^{\max} , мм
1	0,10	-160	5	-52	12
2	0,15	-220	5	-65	10
3	0,30	-230	5	-102	9
4	0,50	-240	5	-85	6
5	0,80	-80	3	-60	10
6	1,00	+20	5	+5	11
7	2,00	+360	5	+140	8
8	3,00	+400	5	+130	3
9	5,00	+440	5	+120	2

При сверхмалых обжатиях поверхностный слой деформируется слабо. Происходят изменения в геометрии поверхностного слоя на уровне отдельных зерен, не вызывая структурных превращений в остальном объеме деталей. Рис. 1 демонстрирует зависимость остаточных прогибов $f_{\text{ост}}$ от степени относительного обжатия Q образцов после охватывающего деформирования. На рис. 1 отчетливо видно, при сверхмалой степени относительного обжатия – от 0,1 до 0,5% – изменения начальной жесткости изделия несущественны, и геометрия детали практически остается в первоначальном состоянии. При таких обжатиях механические характеристики меняются только на микроуровне.

В результате проведенных экспериментов было обнаружено, что при росте относительного обжатия с 0,5 до 1,2% происходит уменьшение остаточных напряжений сжатия на поверхности детали (см. табл. 1).

⁴Румшинский Л.З. Математическая обработка результатов экспериментов. Справочное руководство. М.: Изд-во «Наука», 1971. 192 с.

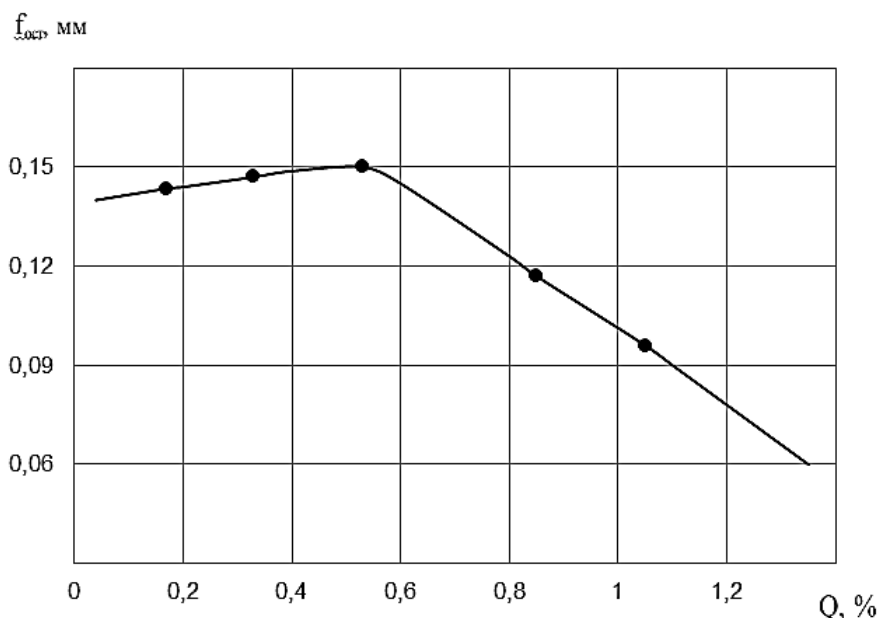


Рис. 1. Влияние степени относительного обжатия Q на величину остаточного прогиба после поперечного изгиба образцов ($F = 4$ кН)

Fig. 1. Influence of the relative compression degree Q on the value of the residual deflection after transverse bending of samples ($F = 4$ kN)

При этом остаточный прогиб становится меньше (см. рис. 1). То есть при уменьшении остаточных напряжений сжатия можно получить повышение жесткости деталей типа валов. Чтобы удостовериться в правильности такого вывода, были обработаны результаты опытов и проверена зависимость глубины остаточных напряжений сжатия (Δ) от степени относительного сжатия:

$$\Delta\phi = r - r_\phi; \quad \Delta z = r - r_z,$$

где r – радиус образца, r_ϕ, r_z – величина радиуса изделий, при которой растягивающие осевые и тангенциальные остаточные напряжения меняют знак на сжимающие остаточные напряжения.

На рис. 2 показаны результаты расчета. При росте обжатия от 0,1 до 0,5% размер слоя с тангенциальными остаточными напряжениями сжатия постепенно уменьшается. Зато при увеличении обжатия в пределах от 0,6 до 1,2% – толщина слоя начинает увеличиваться (рис. 2). Зависимость Δ от Q является неоднозначной. Во внутренних слоях деталей напряжение меньше благода-

ря тому, что релаксация напряжений может протекать более свободно.

Было получено, что степень относительного обжатия не влияет на изменение глубины распределения осевых остаточных напряжений (см. рис. 2). Оптимального распределения тангенциальных остаточных напряжений сжатия можно достичь за счет увеличения их глубины. При этом можно увеличить работоспособность упрочненных изделий, повышая их жесткость. Такие же выводы были описаны в работах [17–20] авторами, исследующими локальные методы упрочнения.

Полученные результаты опытов были проверены при разных величинах поперечных нагрузок, действующих на цилиндрические заготовки.

На рис. 3 показано, что остаточный прогиб $f_{ост}$ зависит от поперечной нагрузки. Очевидно, что прогиб балки $f_{ост}$ становится больше, если возрастает сила F . Полученная зависимость уже известна ранее из теоретических исследований и практики. Благодаря проведенным экспериментам, была обнаружена линейная закономерность между поперечной силой и степенью относительного обжатия от 0,1 до 1,0%.

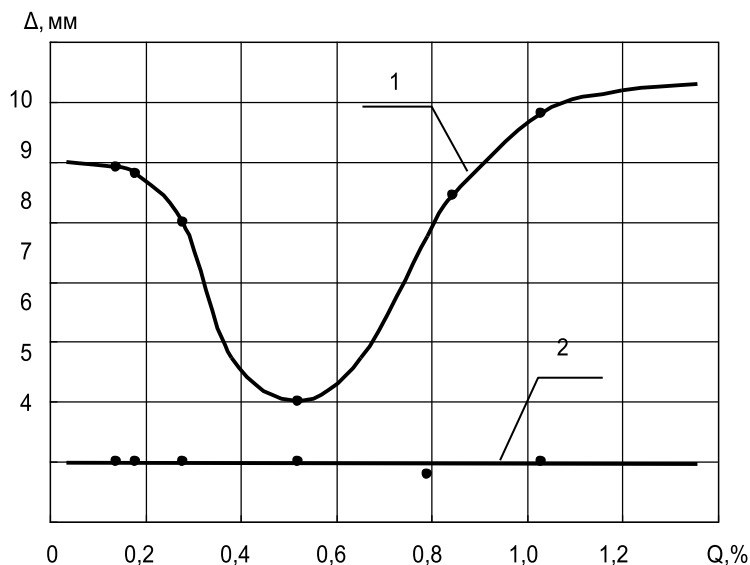


Рис. 2. Влияние степени относительного обжатия Q на глубину распределения остаточных напряжений сжатия в периферийных слоях: 1 – Δ_ϕ для тангенциальных остаточных напряжений; 2 – Δ_z для осевых остаточных напряжений
 Fig. 2. Influence of the relative compression degree Q on the distribution depth of residual compression stresses in peripheral layers: 1 – Δ_ϕ for tangential residual stresses; 2 – Δ_z for axial residual stresses

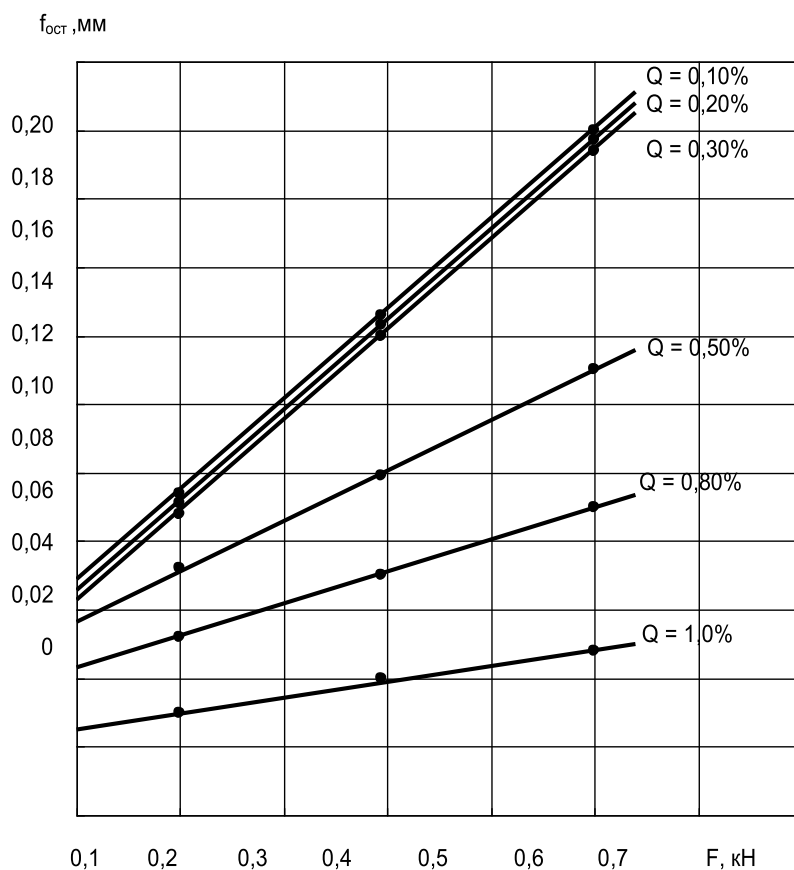


Рис. 3. Влияние усилий F при разных степенях относительного обжатия Q на величину остаточного прогиба
 Fig. 3. Influence of forces F at different degrees of relative compression Q on the value of residual deflection



Жесткость цилиндрических заготовок, упрочненных обжатием с малыми значениями – Q лежит в пределах от 0,1 до 0,5 % – практически остается неизменной. Изгибная жесткость увеличивается, если обжатие увеличивается от 0,6 до 1,0%. Самое большое сопротивление изгибу у образцов, упрочненных относительным обжатием с близкими к 1% величинами. У таких цилиндров глубина действия остаточных напряжений по сравнению с другими обжатиями самая большая [21], а на поверхности они почти отсутствуют. Обработав заготовку охватывающим деформированием с обжатием 1% и нагрузив их поперечной силой 0,6 кН, можно добиться уменьшения искажения при изгибе и увеличить жесткость деталей в 5 раз.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате экспериментальных исследований установлено влияние остаточного напряженного состояния на изгибную жесткость упрочненных цилиндрических деталей. Остаточные напряжения сжатия оказывают большое влияние на повышение изгибной жесткости, чем остаточные напряжения растяжения. Лучшие результаты получены, когда остаточные напряжения в поверхностных слоях стремятся к нулю. Изгибная жесткость цилиндрических деталей не зависит от глубины распределения осевых остаточных напряжений. Жесткость деталей повышается в зависимости от глубины расположения тангенциальных остаточных напряжений сжатия в наружном слое.

Список литературы

1. Świć A., Zubrzycki J., Gola A. Modelling Characteristics Turning Processing for Want of Management by an Elastic Deformed Condition // *Applied Mechanics and Materials*. 2016. Vol. 844. P. 109–114.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.844.109>
2. Świć A., Taranenko V., Wolos D. New method for machining of low-rigidity shafts // *Advances in Manufacturing Science and Technology*. 2010. Vol. 34. No. 1. P. 59–71.
3. Зайдес С.А. Охватывающее поверхностное пластическое деформирование. Иркутск: Изд-во ИРГТУ, 2001. 309 с.
4. Закс Г. Практическое металловедение. М.: ОНТИ НКТП, 1938. 244 с.
5. Зайдес С.А., Нгуен Ван Хуан. Повышение жесткости длинномерных валов охватывающим пластическим деформированием // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2016. № 2. С. 10–15.
6. Remy L. Thermal and thermal-mechanical fatigue of superalloys // *Low Cycle Fatigue and Elasto-Plastic Behavior of Materials* / ed. D.P. Portella, K.-T. Rie. Oxford: Elsevier, 1998. P. 119–130.
7. Riedel H. Fracture at high temperatures. materials research and engineering. Berlin: Springer – Verlag Berlin Heidelberg, 1987. 431 p.
<https://doi.org/10.1002/crat.2170230609>
8. Benito J.A., Manero J.M., Peiro J.J., Roca A. Change of Young's modulus of cold-deformed pure iron in a tensile test // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2005. Vol. 36. Iss. 12. P. 3317–3324.
<https://doi.org/10.1007/s11661-005-0006-6>
9. Нгуен Ван Хуан, Зайдес С.А., Фам Дак Фыонг. Моделирование изгибной жесткости валов в зависимости от остаточных напряжений // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2015. № 6. С. 15–19.
10. Зайдес С.А., Рудых Н.В. Определение напряженного состояния поверхностно-упрочненного слоя // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2011. № 12. С. 35–38.
11. Seth P.P., Das A., Bar N.H., Sivaprasad S., Basu A., Dutta K. Evolution of dislocation density during tensile deformation of BH₂₂₀ steel at different pre-strain conditions // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2015. Vol. 24. Iss. 7. P. 2779–2783.
<https://doi.org/10.1007/s11665-015-1554-6>
12. Беляев В.Н., Иванов В.П., Ингеманссон А.Р., Исаев А.Н., Киричек А.В., Крайнев Д. [и др.]. Эффективные технологии поверхностного пластического деформирования и комбинированной обработки: монография. М.: ООО «Спектр», 2014. 403 с.
13. Зайдес С.А., Нгуен Ван Хуан. Технологические возможности повышения изгибной жесткости деталей типа валов и осей // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. 2016. № 7. С. 25–31.
14. Зайдес С.А., Фам Д.Ф., Нго К.К. Новые процессы поверхностного пластического деформирования. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2019. 352 с.
15. Гликман Л.А., Бабаев А.Н., Левин В.М. О рациональном использовании способа Гейна и Бауэра для определения остаточных напряжений в цилиндрах // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 1976. № 5. С. 94–103.
16. Махалов М.С. Расчетные модели остаточных напряжений поверхностного слоя после упрочнения способами поверхностного пластического деформирования // *Обработка металлов*. 2012. № 3. С. 110–115.
17. Уорсинг А., Геффнер Д. Методы обработки экспериментальных данных / пер. с англ. Л.А. Шохат; ред. А.С. Монин. М.: Изд-во иностранной литературы, 1953. 347 с.

19. Зайдес С.А., Нгуен Ван Хуан. Влияние степени относительного обжатия на изгибную жесткость длинномерных валов // *Технология металлов*. 2017. № 2. С. 3–8.
20. Zaides S.A., Nguyen Kh.V. Influence of surface plastic deformation on the flexural rigidity of shafts // *Russian Engineering Research*. 2016. Vol. 36. No. 12. P. 1008–1011. <https://doi.org/10.3103/S1068798X16120182>

21. Zaides S.A., Nguyen H.V. Improving the flexural rigidity of cold-finished steel // *Steel in Translation*. 2016. No. 46. P. 505–509. <https://doi.org/10.3103/S0967091216070160>
22. Климова Л.Г. Технологические возможности снижения искривления маложестких валов // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2011. № 11. С. 33–37.

References

1. Świć A, Zubrzycki J, Gola A. Modelling characteristics turning processing for want of management by an elastic deformed condition. *Applied Mechanics and Materials*. 2016;844:109–114. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.844.109>
2. Świć A, Taranenko V, Wolos D. New method for machining of low-rigidity shafts. *Advances in Manufacturing Science and Technology*. 2010;34(1):59–71.
3. Zaides SA. *Enveloping surface plastic deformation*. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2001, 309 p. (In Russ.)
4. Zaks G. *Practical science of metals*. Moscow: Ob'edinennoe nauchno-tehnicheskoe izdatel'stvo Narodnogo komissariata tyazhelej promyshlennosti; 1938, 244 p. (In Russ.)
5. Zaydes SA, Nguyen Van Huan. Increase stiffness of long transmission lineshaft by embracing plastic deformation. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya = Strengthening Technologies and Coatings*. 2016;2:10–15. (In Russ.)
6. Remy L. Thermal and thermal-mechanical fatigue of superalloys. In: Portella DP, Rie K-T (eds.) *Low Cycle Fatigue and Elasto-Plastic Behavior of Materials*. Oxford: Elsevier; 1998, p. 119–130.
7. Riedel H. *Fracture at High Temperatures. Materials Research and Engineering*. Berlin: Springer – Verlag Berlin Heidelberg; 1987, 431 p. <https://doi.org/10.1002/crat.2170230609>
8. Benito JA, Manero JM, Peiro JJ, Roca A. Change of Young's modulus of cold-deformed pure iron in a tensile test. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2005;36(12):3317–3324. <https://doi.org/10.1007/s11661-005-0006-6>
9. Nguyen Van Huan, Zaydes SA, Pham Dac Phuong. Modeling shaft bending stiffness depending on residual stresses. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2015;6:15–19. (In Russ.)
10. Zaides SA, Rudyh NV. Determination of the stress state of the surface-hardened layer. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2011;12:35–38. (In Russ.)
11. Seth PP, Das A, Bar NH, Sivaprasad S, Basu A, Dutta K. Evolution of Dislocation Density During Tensile Defor-

mation of BH220 Steel at Different Pre-strain Conditions. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2015;24(7):2779–2783. <https://doi.org/10.1007/s11665-015-1554-6>
12. Belyaev VN, Ivanov VP, Ingemansson AR, Isaev AN, Kirichek AV, Krajnev D, et al. *Effective technologies of surface plastic deformation and combined processing*. Moscow: ООО "Спектр"; 2014, 403 p. (In Russ.)
13. Zaydes SA, Nguyen Van Huan. Technological possibilities of increasing bending stiffness of shaft and axle type parts. *Kuznechno-shtampovoye proizvodstvo. Obrabotka metallov davleniem*. 2016;7:25–31. (In Russ.)
14. Zaydes SA, Fam DF, Ngo KK. *New processes of surface plastic deformation*. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2019, 352 p. (In Russ.)
15. Glikman LA, Babaev AN, Levin VM. On rational use of the Hein and Bauer method for determining residual stresses in cylinders. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov = Industrial laboratory. Diagnostics of materials*. 1976;5:94–103. (In Russ.)
16. Mahalov MS. The surface layer residual stresses tensor prediction models after hardening by surface layer plastic deformation methods. *Obrabotka metallov = Metal Working and Material Science*. 2012;3:110–115. (In Russ.)
17. Worsing A, Heffner D. Methods for processing experimental data, 1953, 347 p. (Russ. ed.: *Metody obrabotki eksperimental'nyh dannyh*. Moscow, Foreign Literature Publishers, 1953, 347 p.)
18. Zaides SA, Nguyen Van Huan. Influence of relative compression degree on bending stiffness of long-length shafts. *Tekhnologiya metallov = Technology of Metals*. 2017;2:3–8. (In Russ.)
19. Zaides SA, Nguyen KhV. Influence of surface plastic deformation on the flexural rigidity of shafts. *Russian Engineering Research*. 2016;36(12):1008–1011. <https://doi.org/10.3103/S1068798X16120182>
20. Zaides SA, Nguyen HV. Improving the flexural rigidity of cold-finished steel. *Steel in Translation*. 2016;46:505–509. <https://doi.org/10.3103/S0967091216070160>
21. Klimova LG. Technological opportunities to reduce and contort low-rigid shafts. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2011;11(58):33–37. (In Russ.)



ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Климова Лариса Генриховна,
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры инженерной и компьютерной графики,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
✉ e-mail: larisgoko@yandex.ru

Заявленный вклад автора

Автор выполнила исследовательскую работу, на основании полученных результатов провела обобщение, подготовила рукопись к печати.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитала и одобрила окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 20.09.2020; одобрена после рецензирования 01.06.2021; принята к публикации 19.08.2021.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Larisa G. Klimova,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Engineering
and Computer Graphics,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
✉ e-mail: larisgoko@yandex.ru

Contribution of the author

The author performed the research, made a generalization on the basis of the results obtained and prepared the copyright for publication.

Conflict of interests

The author declares no conflict of interests.

The final manuscript has been read and approved by the author.

Information about the article

The article was submitted 20.09.2020; approved after reviewing 01.06.2021; accepted for publication 19.08.2021.