

УДК 621.174.22

## ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА КАЛИБРОВКИ НА ИЗГИБНУЮ ЖЕСТКОСТЬ СТАЛЬНЫХ ПРУТКОВ. ЧАСТЬ 2

*Зайдес С.А., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой машиностроительных технологий  
и материалов (zsa@istu.edu)*

*Нгуен Ван Хуан, аспирант (nguyenvanhuan.istu@gmail.com)*

**Иркутский национальный исследовательский технический университет**  
(664074, Россия, Иркутск, ул. Лермонтова, 83)

**Аннотация.** Создание прочных конструкционных материалов позволяет изготавливать стержневые детали типа валов и осей с меньшим поперечным сечением. Прочность при этом сохраняется, а жесткость падает, так как тонкий и длинный стержень имеет низкую устойчивость при действии продольной силы и малую изгибную жесткость от поперечной нагрузки. Малая изгибная жесткость стержневых деталей вызывает существенные проблемы при их обработке и сборке, поэтому такие детали обычно являются нетехнологичными. При деформационном упрочнении длинномерных мало жестких валов и тонкостенных цилиндров возникают деформации и прогибы, для предотвращения которых приходится жертвовать производительностью технологического процесса. Изгибная жесткость длинномерных деталей зависит от условий нагружения, геометрии изделия и физико-механических свойств материала. В реальных конструкциях, когда условия нагружения и геометрические параметры заданы, изменить жесткость изделий можно только за счет варьирования физико-механических свойств материала. Если же задан конкретный материал, то для управления жесткостью остается только модуль упругости ( $E$  или  $G$ ). Однако в ряде работ установлено, что модуль упругости при обычных температурно-силовых условиях практически не изменяется. Поэтому в настоящее время жесткость изделия может быть повышена только конструктивными мерами. В настоящей работе рассмотрена возможность повышения изгибной жесткости цилиндрических калиброванных прутков за счет формирования технологических остаточных напряжений. В результате проведенных экспериментальных исследований установлено влияние основных параметров калибровки на величину и характер распределения остаточных напряжений. Полученные кривые использованы для моделирования изгибной жесткости калиброванных прутков в зависимости от степени относительного обжатия и основных геометрических параметров рабочего инструмента (волоки). Установлено, что повышение степени относительного обжатия и длины калибрующей зоны волокна оказывает положительное влияние на жесткость стержневых изделий, с увеличением угла рабочего конуса инструмента изгибная жесткость прутков снижается.

**Ключевые слова:** калиброванный металл, остаточные напряжения, изгибная жесткость, относительное обжатие, угол рабочего конуса, длина калибрующей зоны.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2018-3-173-178

Среди продукции черной металлургии большим спросом в машиностроении пользуется калиброванный металл, обладающий целым рядом достоинств: высокой точностью размеров по длине прутка, низкой шероховатостью поверхности, высокими значениями механических характеристик. Применение холоднокатаных профилей вместо горячекатаных позволяет на 30 – 40 % экономить металл и существенно снизить затраты в машиностроении [1, 2].

Малая шероховатость поверхности дает возможность использовать калиброванную сталь для изготовления, например, длинномерных рабочих и трансмиссионных валов артезианских турбинных насосов. В этом случае механической обработке подвергаются только концевые участки для нарезания резьбы [3, 4].

Широкое распространение калиброванный металл получил в сельскохозяйственном машиностроении. Десятки деталей типа валов, осей, штанг, шпильки изготавливают для зерноуборочных комбайнов и других сельскохозяйственных машин.

Создание новых высокопрочных материалов позволяет снижать металлоемкость изделий. Например,

длинномерные валы можно изготавливать меньшего диаметра без потери прочности. Однако при этом возникает другая проблема – с уменьшением поперечного сечения снижается жесткость детали, т. е. способность сопротивляться действию поперечной нагрузки.

При вращении длинномерные валы под действием центробежных сил изгибаются даже от собственного веса. Повысить изгибную жесткость деталей типа валов и осей весьма сложно. Практически такие вопросы решаются конструктивными мерами, например, повышают количество промежуточных опор [5 – 7].

Управлять жесткостью материала можно за счет температурного воздействия и изменения физических свойств материала [8 – 12]. Например, жесткость деталей повышается при снижении температуры, но это далеко не всегда соответствует условиям их эксплуатации, а создавать специальные холодильные камеры экономически не выгодно.

Основным показателем физических свойств является модуль упругости материала, но заменять цветной металл на черный, у которого модуль упругости выше, не всегда возможно по условиям эксплуатации. Для ши-

рокого класса черных металлов модуль упругости изменяется незначительно и оказывает слабое влияние на жесткость материала [13,14].

В практике известны приемы изменения изгибной жесткости стержневых изделий за счет воздействия осевых усилий, например натяжение музыкальных струн, натяжение арматуры в строительных конструкциях и др.

Приложить осевые растягивающие нагрузки к реальным деталям машин практически невозможно. Поэтому результаты исследований в этом направлении весьма ограничены. Известны работы В.Я. Герасимова [15, 16] по увеличению жесткости цилиндрических заготовок, которые при нагружении испытывают осевое сжатие (осадку). В исследованиях [13, 17] изложен подход для повышения изгибной жесткости длинномерных деталей типа валов и осей охватывающим поверхностным пластическим деформированием.

В данной работе с использованием конечно-элементного моделирования рассмотрена возможность повышения изгибной жесткости стальных прутков в процессе калибровки. В первой части работы [18] на основе экспериментальных исследований установлено влияние основных параметров холодного деформирования на величину и характер распределения осевых, тангенциальных и радиальных остаточных напряжений и глубину их залегания в объеме цилиндра. Эти данные в настоящей работе использованы для моделирования изгибной жесткости калиброванных прутков в зависимости от величины остаточных напряжений.

**Результаты определения остаточных напряжений.** В работе [18] определено распределение остаточных напряжений по сечению калиброванных прутков в зависимости от основных параметров технологического процесса калибровки. На рис. 1, а – в представлены зависимости максимальных остаточных напряжений растяжения от степени относительного обжатия ( $Q$ ), угла рабочего конуса ( $2\alpha$ ) и относительной длины калибрующей зоны ( $l_k/d$ ) инструмента.

Полученные экспериментальные результаты свидетельствуют о возможности изменения величины и характера распределения остаточных напряжений в процессе изготовления калиброванного металла. Зная условия нагружения и эксплуатации деталей машин, изготовленных из калиброванного металла, можно создавать рациональные поля напряжений для эффективной работы машин и механизмов. Экспериментально установлено, что с увеличением степени относительного обжатия от 5 до 34 % тангенциальные остаточные напряжения возрастают в 2,5 раза, а осевые уменьшаются на 13 % (см. рис. 1, а). Необходимо подчеркнуть, что величина относительного обжатия влияет в большей мере на тангенциальные остаточные напряжения, чем на осевые.

Результаты экспериментов показали (рис. 1, б), что в диапазоне углов волоки от 8 до 24°, тангенциальные и осевые остаточные напряжения одновременно увеличиваются:  $\sigma_z^{\max}$  возрастают в 2,3 раза, а  $\sigma_\phi^{\max}$  – в 1,8 раза.

Как видно из рис. 1, в, с увеличением длины калибрующей зоны волоки максимальные осевые остаточные напряжения растяжения снижаются на 52 %, а тангенциальные увеличиваются на 21 %.

**Моделирование изгибной жесткости прутков при воздействии остаточных напряжений.** Рассмотрим деформацию стального гладкого длинномерного прутка длиной  $l$  и диаметром  $d$  под действием поперечной нагрузки  $F$  (рис. 2).

Для моделирования изгибной жесткости прутков в зависимости от величины и характера распределения остаточных напряжений использовано две схемы:

- остаточные напряжения сжатия в поверхностных слоях и напряжение растяжения во внутренних слоях (рис. 2, а);
- остаточные напряжения растяжения в поверхностных слоях и напряжение сжатия во внутренних слоях (рис. 2, б).

По результатам экспериментального определения остаточных напряжений в калиброванной стали было

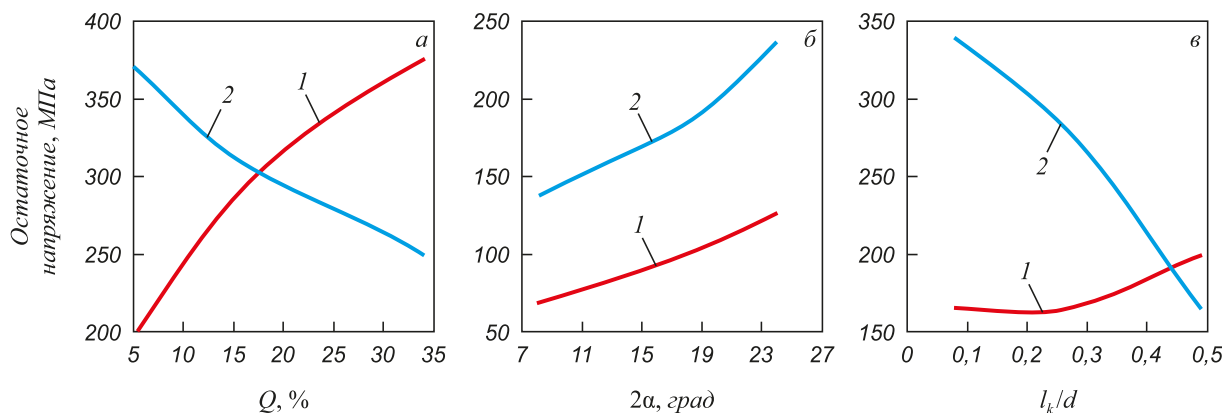


Рис. 1. Влияние степени относительного обжатия (а), угла рабочего конуса (б) и относительной длины калибрующей зоны волоки (в) на максимальные значения тангенциальных (1) и осевых (2) остаточных напряжений растяжения

Fig. 1. Influence of extent relative reduction (а), a working cone angle (б) relative length and gauge of the die area (в) on the maximum values of tangential (1) and axial (2) residual tensile stresses

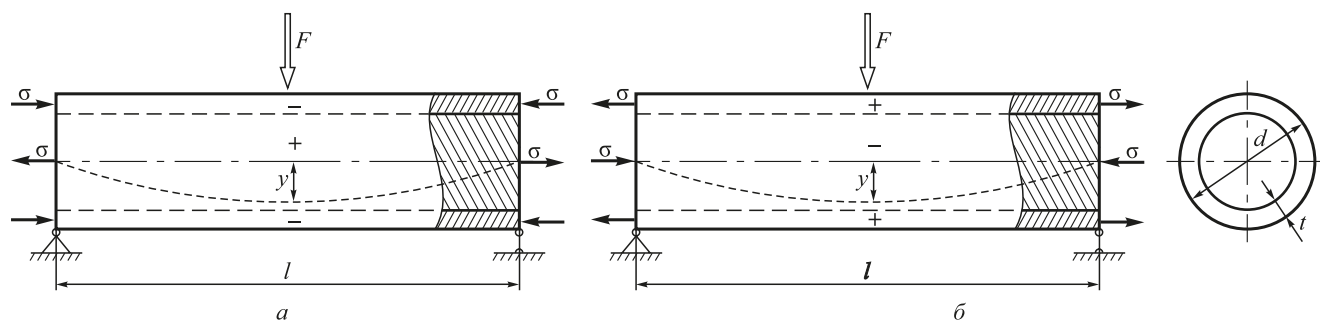


Рис. 2. Схемы для определения влияния остаточных напряжений на жесткость калиброванных прутков:  
а – схема растяжения; б – схема сжатия

Fig. 2. Schemes for determination of the influence of residual stresses on stiffness of calibrated rods:  
а – stretching scheme; б – compression scheme

установлено, что на поверхности и в центральной зоне в первом приближении остаточные напряжения равны по величине и противоположны по знаку [4]. На основании этого принята модель прутка, представляющая собой составной цилиндр, состоящий из сердечника и оболочки (втулки), подвергающихся действию разных напряжений.

Для моделирования остаточных напряжений приняты геометрическую модель прутка, состоящую из тонкостенных трубок толщиной 0,2 мм (рис. 3). Каждая трубка нагружалась растягивающим или сжимающим напряжением, которое соответствовало значению экспериментального определения.

Аналитический расчет прогиба стержня произведен методом Коши-Крылова [19, 20]. Решая дифференциальное уравнение изогнутой оси стержня

$$\frac{1}{\rho} = \pm \frac{\frac{d^2 y}{dz^2}}{\sqrt{\left[1 + \left(\frac{dy}{dz}\right)^2\right]^3}}, \quad (1)$$

получен максимальный прогиб прутка:

$$y_{\max} = -\frac{Fl^3}{48EI_x + 4\pi\sigma_z R^2 l^2}; \quad (2)$$

$$y_{\max} = -\frac{Fl^3}{48EI_x - 4\pi\sigma_z R^2 l^2}. \quad (3)$$

Формула (2) позволяет определить максимальный прогиб прутков при действии поперечной силы  $F$  при осевом растяжении, а формула (3) – при осевом сжатии. Видно, что значение максимального прогиба в случае преобладания растягивающих напряжений меньше, чем при действии сжимающих напряжений. Уравнения (2) и (3) позволяют математически оценить действие осевых нагрузок на поперечный изгиб стержня.

Для схем нагружения (см. рис. 2) изгибная жесткость прутка определяется по формуле

$$C = -\frac{F}{48y_{\max}}. \quad (4)$$

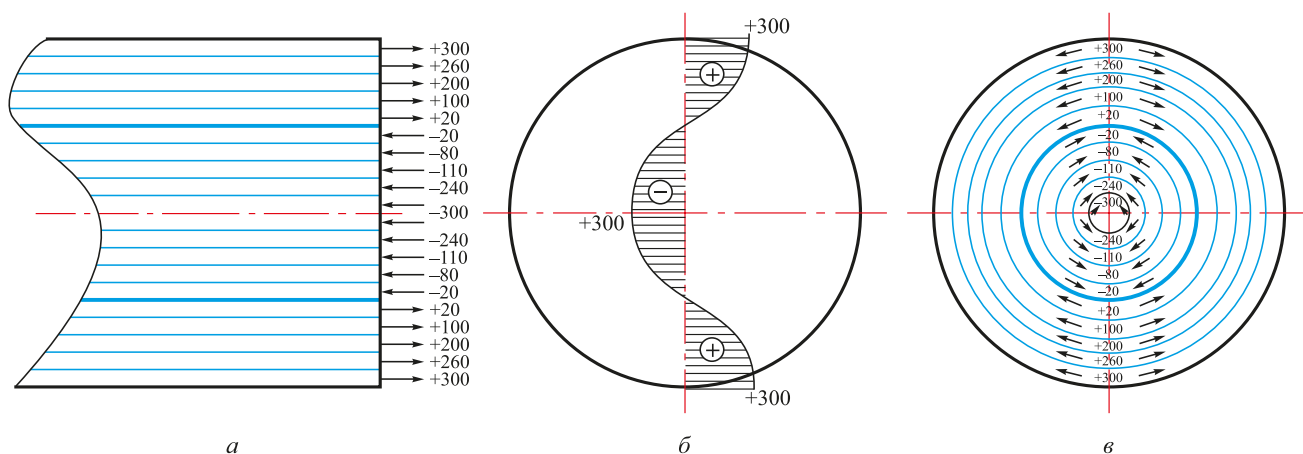


Рис. 3. Схема для моделирования прогиба прутков по распределению остаточных напряжений:  
а – значение осевых напряжений; б – пример распределения остаточных напряжений; в – значение тангенциальных напряжений

Fig. 3. Modeling scheme of the rods deflection with residual stresses distribution:  
а – value of axial stresses; б – example of residual stresses distribution; в – value of tangential stresses

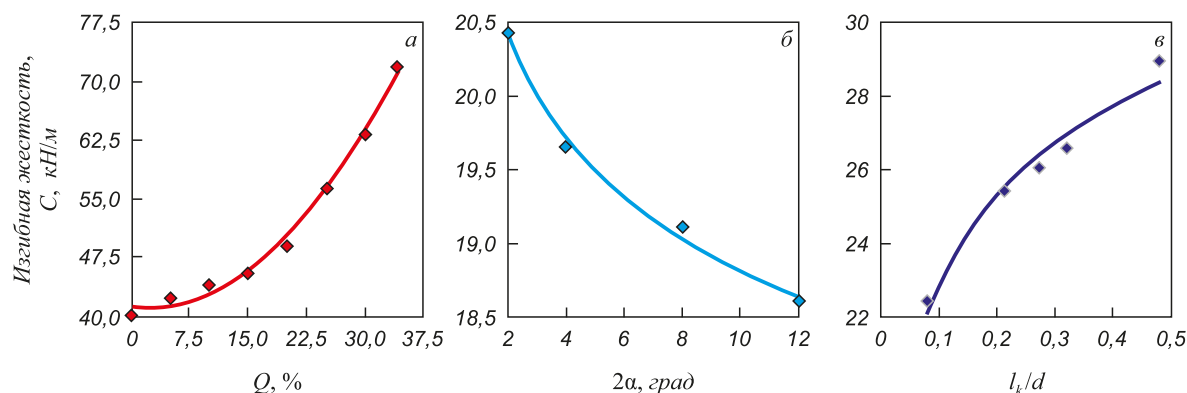


Рис. 4. Влияние степени относительного обжатия  $Q$  (а), полуугла рабочего конуса волоки (б) и относительной длины калибрующей зоны инструмента (в) на изгибную жесткость цилиндрических прутков после калибровки

Fig. 4. Effect of relative degree of compression  $Q$  (a), the cone half angle of the working die (б) and the gauge length of the tool relative area (в) on the bending stiffness of cylindrical bars after calibration

Для вычисления изгибной жесткости прутков в зависимости от воздействия остаточных напряжений использован пакет программ Ansys [21, 22].

Результаты изменений изгибной жесткости прутка диаметром 37,6 мм и длиной 1000 мм (материал – сталь 45,  $\sigma_T = 360$  МПа) под действием поперечной нагрузки 1000 Н в зависимости от степени относительного обжатия, длины калибрующей зоны и угла рабочего конуса инструмента показаны на рис. 4, а – в). Жесткость определена в середине прутков, где имеет место ее минимальное значение.

Расчеты показали (рис. 4, а), что в исследуемом интервале относительных обжатий (от 5 до 34 %) изгибная жесткость может быть повышена почти в 2 раза.

На рис. 4, б представлено влияние угла рабочего конуса на жесткость калиброванных деталей. С увеличением угла рабочего конуса от 4 до 24°, изгибная жесткость прутков снижается на 10 %.

Установлено (рис. 4, в), что в исследуемом интервале относительных длин калибрующей зоны от 0,08 до 0,47, изгибная жесткость может быть увеличена на 20 %.

Полученные результаты можно рекомендовать для повышения жесткости калиброванных прутков, которые могут быть использованы в качестве эффективных заготовок при изготовлении деталей машин, например валов малой жесткости.

**Выводы.** Калиброванный металл является эффективным видом заготовки для изготовления целого ряда цилиндрических деталей. Качество маложестких деталей типа валов оценивается изгибной жесткостью, которую практически сложно изменить. Для повышения изгибной жесткости стержневых изделий предлагается использовать технологические остаточные напряжения.

Технологические остаточные напряжения всегда бывают двух видов – растягивающие и сжимающие. Изгибная жесткость может быть повышена за счет преобладания растягивающих напряжений по сравнению со сжимающими. Экспериментально-расчетными мето-

дами было установлено влияние основных параметров калибровки на изгибную жесткость стальных прутков.

Выявлена возможность повышения изгибной жесткости калиброванных прутков почти в два раза при обжатиях от 5 до 34 %. На 20 % можно повысить жесткость при увеличении длины калибрующей зоны инструмента. С увеличением угла рабочего конуса волоки с 4 до 24° изгибная жесткость прутков снижается на 10 %, следовательно для повышения жесткости рабочий угол инструмента нужно уменьшать.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шефтель Н.И. Улучшение качества и сортамента проката. – М.: Металлургия, 1973. – 343 с.
2. Белалов Х.Н., Клековкин А.А., Клековкина Н.А. и др. Стальная проволока. – Магнитогорск: МГТУ, 2011. – 689 с.
3. Зайдес С.А. Остаточные напряжения и качество калиброванного металла. – Иркутск: ИГУ, 1992. – 200 с.
4. Зайдес С.А. Охватывающее поверхностное пластическое деформирование. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2001. – 309 с.
5. Алфутов Н.А. Основы расчета на устойчивость упругих систем. – М.: Машиностроение, 1978. – 312 с.
6. Силаев Б.М. Детали машин и основы конструирования. – Самара: Изд-во СГАУ, 2011. – 224 с.
7. Немец Я.К. Жесткость и прочность стальных деталей. – М.: Машиностроение, 1970. – 528 с.
8. Реслер И., Хардерс Х., Бекер М. Механическое поведение конструкционных материалов. – Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2011. – 504 с.
9. Комаров В.А. Повышение жесткости конструкций топологическими средствами // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королева. 2003. № 1. С. 26 – 37.
10. Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей машин и их соединений. Библиотека технология. – М.: Машиностроение, 2006. – 448 с.
11. Бойцов В.Б., Чернявский А.О. Технологические методы повышения прочности и долговечности. – М.: Машиностроение, 2005. – 128 с.
12. Барышов С.Н. Оценка поврежденности, несущей способности и продление ресурса технологического оборудования. – М.: Недра-Бизнесцентр, 2007. – 287 с.
13. Зайдес С.А., Нгуен В.Х. Повышение жесткости длинномерных валов охватывающим пластическим деформировани-



- ем // Упрочняющие технологии и покрытия. 2016. №2 (134). С. 10 – 15.
14. Упругость и неупругость: Матер. Междунар. науч. симпозиума по проблемам механики деформируемых тел, посвященного 100-летию со дня рождения А.А. Ильюшина / Под ред. И.А. Кийко, Г.Л. Бровко, Р.А. Васина. Москва, 20 – 21 января 2011. – М.: Изд-во Московского ун-та, 2011. – 483 с.
  15. Герасимов В.Я. Определение однородного упрочнения калиброванного металла осадкой высоких цилиндров // Изв. вуз. Черная металлургия. 1981. № 6. С. 54 – 58.
  16. Герасимов В.Я., Копырин В.И. Изменение жесткости холоднотянутой стали при изгибе образцов // Сталь. № 8. 1998. С. 47 – 48.
  17. Зайдес С.А., Нгуен В.Х. Влияние остаточных напряжений на изгибную жесткость длиномерных валов // Вестник ИрГТУ. 2015. № 9 (114). С. 45 – 49.
  18. Зайдес С.А., Нгуен В. Х. Влияние параметров процесса калибровки на изгибную жесткость стальных прутков. Часть I. Определение остаточных напряжений в калиброванных прутках // Изв. вуз. Черная металлургия. 2017. Т. 60. № 11. С. 870 – 876.
  19. Лурье А.И. Теория упругости. – М.: Наука, 1970. – 256 с.
  20. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов. – Киев: Наукова думка, 1988. – 736 с.
  21. Басов К.А. ANSYS в примерах и задачах. – М.: Компьютер Пресс, 2002. – 224 с.
  22. Бруйка В.А. Инженерный анализ в ANSYS Workbench. – Самара: Самарский гос. техн. ун-т, 2013. – 149 с.

Поступила 16 августа 2016

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2018. Vol. 61. No. 3, pp. 173–178.

## INFLUENCE OF PARAMETERS OF THE CALIBRATION PROCESS ON BENDING STIFFNESS OF STEEL ROD. PART 2

S.A. Zaides, Nguen Van Khuan

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

**Abstract.** The creation of strong structural materials allows the production of rod parts such as shafts and axles with a smaller cross section. Strength in this case is maintained, and rigidity decreases, since a thin and long rod has low stability under the action of a longitudinal force and a small bending stiffness due to a transverse load. The small bending stiffness of the rod parts causes significant problems in their processing and assembly, therefore such parts are usually non-technological. Deformation hardening of long-length small-rigid shafts and thin-walled cylinders causes deformations and deflections, for prevention of which one must sacrifice the productivity of the technological process. Flexural rigidity of long parts depends on loading conditions, product geometry and physical and mechanical properties of the material. In real constructions, when the loading conditions and geometric parameters are specified, the rigidity of the products can be changed only by varying the physical-mechanical properties of the material. If a concrete material is specified, only the elastic modulus ( $E$  or  $G$ ) remains to control the rigidity. However, it has been established in a number of studies that the modulus of elasticity does not practically change under ordinary temperature-force conditions. Therefore, at present, the rigidity of the product can only be increased by constructive measures. In the present work, the possibility of increasing the flexural rigidity of cylindrical calibrated bars due to the formation of technological residual stresses is considered. As a result of the experimental studies, the effect of the main calibration parameters on the magnitude and nature of the residual stress distribution was established. The obtained curves are used to simulate the flexural rigidity of calibrated bars, depending on the degree of relative reduction and the basic geometric parameters of the working tool (drag). It was established that an increase in the degree of relative reduction and the length of the calibrating zone of the dies has a positive effect on the rigidity of the rod products with an increase in the angle of the working cone of the tool the bending stiffness of the bars is reduced.

**Keywords:** calibrated metal, residual stresses, bending stiffness, relative compression, working cone angle, length of gauge area.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-3-173-178

### REFERENCES

1. Sheftel' N.I. *Uluchshenie kachestva i sortamenta prokata* [Improvement of quality and assortment of rolled products]. Moscow: Metallurgiya, 1973, 343 p. (In Russ.).

2. Belalov Kh.N., Klekovkin A.A., Klekovkina N.A. etc. *Stal'naya provoloka* [Steel wire]. Magnitogorsk: MGTU, 2011, 689 p. (In Russ.).
3. Zaides S.A. *Ostatochnye napryazheniya i kachestvo kalibrovannogo metalla* [Residual stresses and quality of calibrated metal]. Irkutsk, IGU, 1992, 200 p. (In Russ.).
4. Zaides S.A. *Okhvatyayushchee poverkhnostnoe plasticheskoe deformirovanie* [Covering surface plastic deformation]. Irkutsk: Izd-vo IrGTU, 2001, 309 p. (In Russ.).
5. Alfutov N.A. *Osnovy rascheta na ustoichivost' uprugikh system* [Basics of calculating the stability of elastic systems]. Moscow: Mashinostroenie, 1978, 312 p. (In Russ.).
6. Silaev B.M. *Detali mashin i osnovy konstruirovaniya* [Machine parts and design basics]. Samara: Izd-vo SGAU, 2011, 224 p. (In Russ.).
7. Nemets Ya.K. *Zhestkost' i prochnost' stal'nykh detalei* [Stiffness and strength of steel parts]. Moscow: Mashinostroenie, 1970, 528 p. (In Russ.).
8. Resler I., Kharders Kh., Beker M. *Mekhanicheskoe povedenie konstruktivnykh materialov* [Mechanical behavior of structural materials]. Dolgoprudnyi: ID Intellect, 2011, 504 p. (In Russ.).
9. Komarov V.A. Increase of rigidity of structures by topological means. *Vestnik samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika S.P. Koroleva*. 2003, no. 1, pp. 26–37. (In Russ.).
10. *Tekhnologicheskoe obespechenie i povyshenie ekspluatatsionnykh svoystv detalei mashin i ikh soedinenii. Biblioteka tekhnologa* [Technological maintenance and increase of operational properties of machine parts and their connections. Technologist's library]. Moscow: Mashinostroenie, 2006, 448 p. (In Russ.).
11. Boitsov V.B., Chernyavskii A.O. *Tekhnologicheskie metody povysheniya prochnosti i dolgovechnosti* [Technological methods of increasing strength and durability]. Moscow: Mashinostroenie, 2005, 128 p. (In Russ.).
12. Baryshov S.N. *Otsenka povrezhdennosti, nesushchei sposobnosti i prodlenie resursa tekhnologicheskogo oborudovaniya* [Assessment of damage, bearing capacity and extension of the resource of process equipment]. Moscow: Nedra-Biznestsentr, 2007, 287 p. (In Russ.).
13. Zaides S.A., Nguen V.Kh. Increasing the rigidity of long shafts by embracing plastic deformation. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*. 2016, no. 2 (134), pp. 10–15. (In Russ.).
14. *Uprugost' i neuprugost'. Materialy mezhdunarodnogo nauchnogo simpoziuma po problemam mekhaniki deformiruemyykh tel, posvyashchennogo 100-letiyu so dnya rozhdeniya A.A. Il'yushina, Moskva*,

- 20-21 yanvarya 2011 [Elasticity and Inelasticity. Materials of Int. Sci. Symposium on Mechanical Problems of Deformed Bodies dedicated to 100-Anniversary of A.A. Il'yushin, Moscow, 21-22 of January, 2011]. Kiiko I.A., Brovko G.L., Vasina R.A. eds. Moscow: izd-vo Moskovskogo un-ta, 2011, 483 p. (In Russ.).
15. Gerasimov V.Ya. Determination of uniform hardening of calibrated metal by settling of high cylinders. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1981, no. 6, pp. 54–58. (In Russ.).
  16. Gerasimov V.Ya., Kopyrin V.I. Change in the stiffness of the cold-rolled steel by its bending. *Stal'*. 1998, no. 8, pp. 47–48. (In Russ.).
  17. Zaides S.A., Nguen V.Kh. Influence of residual stresses on flexural rigidity of long shafts. *Vestnik IrGTU*. 2015, no. 9 (114), pp. 45–49. (In Russ.).
  18. Zaides S.A., Nguen Van Khuan. Influence of parameters of the calibration process on bending stiffness of steel rod. Part 1. Determination of residual stresses in the calibrated rod. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2017, vol. 60, no. 11, pp. 870–876. (In Russ.).
  19. Lur'e A.I. *Teoriya uprugosti* [Theory of elasticity]. Moscow: Nauka, 1970, 256 p. (In Russ.).
  20. Pisarenko G.S., Yakovlev A.P., Matveev V.V. *Spravochnik po so-protivleniyu materialov* [Handbook on the resistance of materials]. Kiev: Naukova dumka, 1988, 736 p. (In Russ.).
  21. Basov K.A. *ANSYS v primerakh i zadachakh* [ANSYS in examples and tasks]. Moscow: Komp'yuter Press, 2002, 224 p. (In Russ.).
  22. Bruyaka V.A. *Inzhenernyi analiz v ANSYS Workbench* [Engineering analysis in ANSYS Workbench]. Samara: Samarskii gos. tekhn. un-t, 2013, 149 p. (In Russ.).

**Information about the authors:**

**S.A. Zaides**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair "Engineering Technology and Materials" (zsa@istu.edu)

**Nguen Van Khuan**, Postgraduate  
(nguyenvanhuan.istu@gmail.com)

Received August 16, 2016