

УДК 621.174.22

## ИЗГИБНАЯ ЖЕСТКОСТЬ СТАЛЬНЫХ ПРУТКОВ

*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.** Калиброванный металл является эффективной заготовкой для изготовления деталей на станках-автоматах и автоматических линиях, а также для изготовления гладких длинномерных валов и осей. Такие детали являются не технологичными, так как при механической обработке и эксплуатации они изменяют форму в виду искривления. Деформация происходит при действии центробежных сил даже от собственного веса деталей. Новые конструкционные материалы позволяют создавать достаточно прочные детали с уменьшенным поперечным сечением, но изгибная жесткость таких деталей существенно снижается. Повысить изгибную жесткость реальных деталей весьма сложно. На практике используют обычно конструктивные решения, которые связаны с материальными затратами. В работе рассмотрена возможность повышения изгибной жесткости цилиндрических калиброванных прутков за счет формирования технологических остаточных напряжений. Проблема их использования заключается в том, что остаточные напряжения всегда существуют двух видов – растягивающие и сжимающие. Если внешние напряжения растяжения повышают жесткость деталей, то напряжения сжатия снижают ее. Поэтому задачей работы являлось нахождение такого характера распределения остаточных напряжений, который бы обеспечивал повышение изгибной жесткости деталей, изготовленных из калиброванного металла. При моделировании остаточных напряжений приняли геометрическую модель прутка, состоящую из тонкостенных трубок толщиной 0,2 мм. Каждая трубка нагружалась растягивающим или сжимающим напряжением, которое соответствовало значению экспериментального определения. При моделировании и расчете использовали две схемы нагружения, при которых в поверхностных слоях формируются либо остаточные напряжения сжатия, либо растяжения. Экспериментально-расчетными методами установлено влияние основных параметров калибровки на изгибную жесткость металла. 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. Влияние угла рабочего конуса волокни незначительно (около 10 %), причем для повышения жесткости рабочий угол инструмента нужно уменьшать.

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

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-7-512-515

При вращении длинномерные валы под действием центробежных сил изгибаются даже от собственного веса. Повысить изгибную жесткость деталей типа валов и осей весьма сложно [1 – 16].

Рассмотрим деформацию стального гладкого длинномерного прутка длиной  $l$ , диаметром  $d$  под действием поперечной нагрузки  $F$  (рис. 1). Для моделирования изгибной жесткости прутков в зависимости от величин

и характера распределения остаточных напряжений использованы две схемы: 1 – остаточные напряжения сжатия в поверхностных слоях и напряжение растяжения во внутренних слоях (рис. 1, а); 2 – остаточные напряжения растяжения в поверхностных слоях и напряжения сжатия во внутренних слоях (рис. 1, б).

По результатам экспериментального определения остаточных напряжений в калиброванной стали было

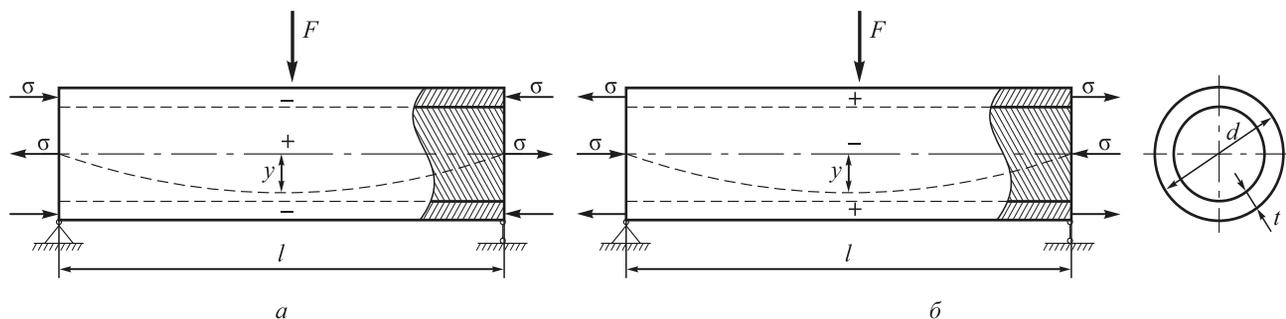


Рис. 1. Схемы растяжения (а) и сжатия (б) для определения влияния остаточных напряжений на жесткость калиброванных прутков

Fig. 1. Schemes of stretching (a) and compression (b) for determination of the influence of residual stresses on stiffness of calibrated rods

установлено, что на поверхности и в центральной зоне в первом приближении остаточные напряжения равны по величине и противоположны по знаку [5]. На основании этого принята модель прутка, представляющая собой составной цилиндр, состоящий из сердечника и оболочки (втулки), подвергающиеся действию разных напряжений [6, 17, 18].

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

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

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

получим 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 растягивающих напряжений меньше, чем при действии сжимающих напряжений. Уравнения (2) и (3) позволя-

ют математически оценить действие осевых нагрузок на поперечный изгиб стержня.

Для схем нагружения (рис. 1) изгибная жесткость прутка определяется по формуле [20]

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

Для определения изменения прогиба прутков в зависимости от действия остаточных напряжений использован пакет программ Ansys.

Результаты изменений изгибной жесткости прутка диам. 37,6 и длиной 1000 мм (материал – сталь 45,  $\sigma_T = 360$  МПа) под действием поперечной нагрузки 1000 Н в зависимости от предварительной калибровки и от степени относительного обжатия, длины калибрующей зоны и угла рабочего конуса инструмента показаны на рис. 3, а, б, в. Жесткость определена в середине прутков, где имеет местное ее минимальное значение.

Расчеты показали (рис. 3, а), что в исследуемом интервале относительных обжатий (от 5 до 34 %) изгибная жесткость может быть повышена почти в два раза. С увеличением угла рабочего конуса от 4 до 24° изгибная жесткость прутков снижается на 10 % (рис. 3, б). Установлено, что в исследуемом интервале относительных длин калибрующей зоны от 0,08 до 0,47 изгибная жесткость может быть увеличена на 20 % (рис. 3, в).

Полученные результаты можно рекомендовать для повышения жесткости калиброванных прутков при выборе эффективной заготовки при изготовлении, 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

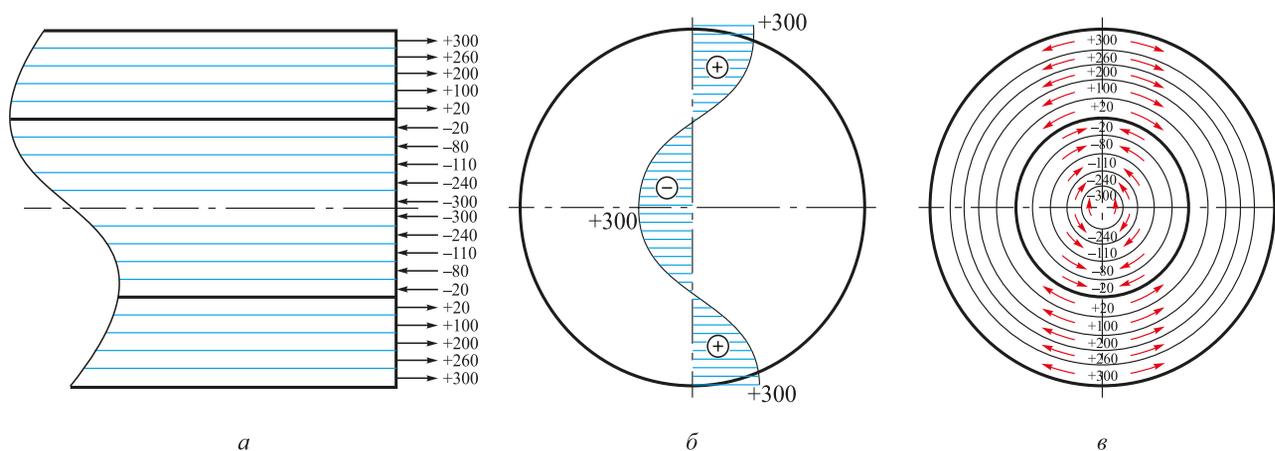


Рис. 2. Схема для моделирования прогиба прутков по распределению остаточных напряжений: а – значения осевых напряжений; б – пример распределения остаточных напряжений; в – значения тангенциальных напряжений

Fig. 2. Modeling scheme for the rods deflection at distribution of residual stresses: а – value of axial stresses; б – an example of residual stresses distribution; в – value of tangential stresses

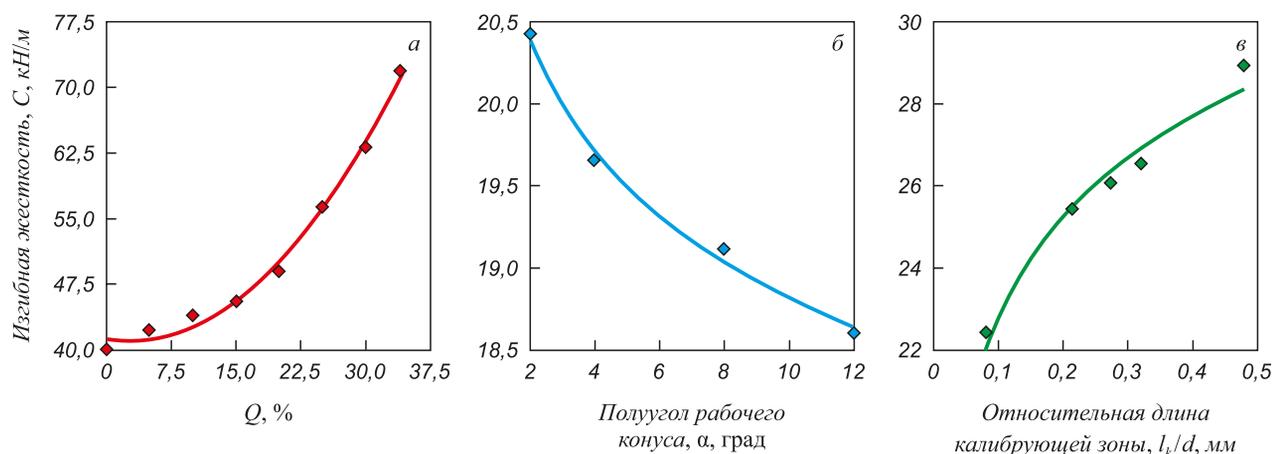


Рис. 3. Влияние степени относительного обжатия  $Q$  (а), полуугла рабочего конуса волокна  $\alpha$  (б) и относительной длины калибрующей зоны инструмента  $l_k/d$  (в) на изгибную жесткость  $C$  цилиндрических прутков после калибровки

Fig. 3. Effect of relative compression degree  $Q$  (a), die cone semiangle  $\alpha$  (b) and the relative length of the tool gauge area  $l_k/d$  (c) on the bending stiffness  $C$  of cylindrical bars after calibration

использовать технологические остаточные напряжения, которые всегда бывают двух видов – растягивающие и сжимающие. Изгибная жесткость может быть повышена за счет преобладания растягивающих усилий по сравнению с сжимающими. Экспериментально-расчетными методами установлено влияние основных параметров калибровки на изгибную жесткость металла. 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. Влияние угла рабочего конуса волокна незначительно (около 10 %), причем для повышения жесткости рабочих угол инструмента нужно уменьшать.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Алфутов Н.А. Основы расчета на устойчивость упругих систем. – М.: Машиностроение, 1978. – 312 с.
- Балтер М.А. Упрочнение деталей машин. – М.: Машиностроение, 1978. – 184 с.
- Герасимов В.Я. Определение однородного упрочнения калиброванного металла осадкой высоких цилиндров // Изв. вуз. Черная металлургия. 1981. № 6. С. 154.
- Герасимов В.Я., Копырин В.И. Изменение жесткости холодной стали при изгибе образцов // Сталь. № 8. 1998. С. 47, 48.
- Зайдес С.А. Охватывающее поверхностное пластическое деформирование. Иркутск: Изд.-во ИрГТУ, 2001. – 309 с.
- Зайдес С.А., Нгуен Х.В. Влияние охватывающего поверхностного пластического деформирования на изгибную жесткость валов // Вестник машиностроения. 2016. № 9. С. 66 – 69.
- Лурье А.И. Теория упругости. – М.: Наука. 1970. – 256 с.
- Орлов П.И. Основы конструирования: Справочно-методическое пособие. – М.: Машиностроение, 1998. – 560 с.
- Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов. – Киев: Наукова думка. 1988. – 736 с.
- Чувильдеев В.Н., Вирасова Н.Н. Деформация и разрушение конструкционных материалов: проблемы старения и ресурса. Учебное пособие / Под общей ред. В.Н. Чувильдеева. – Нижний Новгород: Изд-во ННГУ, 2010. – 67 с.
- Dimarogonas A.D. Dynamic instability of shafts during machining // Journal of Sound and Vibration. 1986. Vol. 108. No. 2. P. 181 – 189.
- Kloos K.H. Eigenspannungen, Definition und Entstehungsursachen. Mat.-wiss. u. Werkstofftech. 1979. Vol. 10. Issue 9. P. 293 – 302.
- Kramer I.R., Bonis L.J., Bruyn P.L., Duga J.J. Effect of Surfaces on Mechanical Behavior of Metals // Fundamental Phenomena in the Materials Sciences Springer US. 1995. P. 171 – 193.
- Latanision R.M., Sedriks A.J., Westwood A. Surface-Sensitive Mechanical Behavior of Metals // Struct. and properties metals surfaces. 1973. P. 500 – 538.
- Norstrom L.A., Iachasson D. Surface yield strength and flow stress in high-strength martensitic steel // Scfnd. J. Mat. 1983. Vol. 12. No. 8. P. 37 – 39.
- Franco Rustichelli, Jacek J. Skrzypek. Innovative technological materials. Structural properties by neutron scattering, Synchrotron radiation and modeling. – London-New York: Springer, 2010. – 280 p.
- Totten G., Howes M., Inoue T. Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel. USA: ASM International, Materials Park, Ohio, 2002. – 500 p.
- Viktor Hauk. Structural and residual stress analysis by nondestructive methods: evaluation, application, assessment. Amsterdam: Elsevier Science B.V. 1997. – 640 p.
- Zaides S.A., Nguyen V.H. Improving the flexural rigidity of cold-finished steel // Steel in Translation. 2016. No. 46 (7). P. 505 – 509.
- Zaides S.A., Nguyen V.H. Influence of Surface Plastic Deformation on the Flexural Rigidity of Shafts // Russian Engineering Research. 2016. Vol. 36. No. 12. P. 1008 – 1011.

Поступила 15 октября 2016 г.

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

*S.A. Zaides, Nguen Van Khuan*

**Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia**

**Abstract.** The calibrated metal is efficient material for manufacture of details on automatic machines and automatic transfer lines, and also for production of smooth lengthy shafts and axes. Such details are not technological as during the machining and operation they change a form in a type of a curvature. Deformation comes at action of centrifugal forces even from sole weight of details. New constructional materials allow to create rather strong details with the reduced transverse section, but a flexural rigidity of such details significantly decreases. It is very difficult to increase flexural rigidity of actual details. In practice, constructive solutions that are associated with material costs are usually used. In this work the possibility of increase in a flexural rigidity of the cylindrical calibrated bars is considered due to the formation of technological residual stresses. The problem of their use is that residual stresses always exist of two types – stretching and squeezing. If external stresses of stretching increase rigidity of details, then pressure loads reduce it. Therefore, the main task of the work was to find such nature of distribution of residual stresses which would provide increase in a flexural rigidity of the details made of calibrated metal. The geometrical model of a bar consisting of thin-walled tubes of 0.2 mm thick was accepted at model operation of residual stresses. Each tube was loaded with the stretching or squeezing tension which corresponded to value of the experimental definition. At model operation and calculation two schemes of loading were used at which in the surface layers either residual stresses of compression or stretching are formed. Experimental calculation methods established influence of key parameters of calibration on a flexural rigidity of metal. The possibility of increase in a flexural rigidity of the calibrated bars is revealed almost twice when cogging from 5 to 34 %. For 20 % it is possible to increase rigidity at increase in length of the calibrating zone of the tool. The influence of the angle of the working cone of the machine is insignificant (about 10%), and for increasing the rigidity the operating angle of the tool must be reduced.

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

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2017-7-512-515

### REFERENCES

1. Alfutov N.A. *Osnovy rascheta na ustoichivost' uprugikh sistem* [Basics of calculating the stability of elastic systems]. Moscow: Mashinostroenie, 1978, 312 p. (In Russ.).
2. Balter M.A. *Uprochnenie detalei mashin* [Hardening of machine parts]. Moscow: Mashinostroenie, 1978, 184 p. (In Russ.).
3. Gerasimov V.Ya. Determination of uniform hardening of the calibrated metal by sinking strain of high cylinders. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1981, no. 6, pp. 154. (In Russ.).
4. 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.).
5. Zaides S.A. *Ostatochnye napryazheniya i kachestvo kalibrovannogo metalla* [Residual stresses and quality of calibrated metal]. Irkutsk: IGU, 1992, 200 p. (In Russ.).
6. Zaides S.A. *Okhvatyvayushchee poverkhnostnoe plasticheskoe deformirovanie* [Covering surface plastic deformation]. Irkutsk: IrGTU, 2001, 309 p. (In Russ.).
7. Lur'e A.I. *Teoriya uprugosti* [Theory of elasticity]. Moscow: Nauka, 1970, 256 p. (In Russ.).
8. Orlov P.I. *Osnovy konstruirovaniya: Spravochno-metodicheskoe posobie* [Basics of construction: Reference and methodical manual]. Moscow: Mashinostroenie, 1998, 560 p. (In Russ.).
9. Pisarenko G.S., Yakovlev A.P., Matveev V.V. *Spravochnik po soprotivleniyu materialov* [Handbook on the resistance of materials]. Kiev: Naukova dumka, 1988, 736 p.
10. Chuvil'deev V.N., Viryasova N.N. *Deformatsiya i razrushenie konstruksionnykh materialov: problemy stareniya i resursa. Uchebnoe posobie* [Deformation and destruction of structural materials: the problems of aging and resource. Tutorial]. Chuvil'deev V.N. ed. Nizhny Novgorod: NNGU, 2010, 67 p. (In Russ.).
11. Dimarogonas A.D. Dynamic instability of shafts during machining. *Journal of Sound and Vibration*. 1986, vol. 108, no. 2, pp. 181–189.
12. Kloos K.H. Eigenspannungen, Definition und Entstehungsursachen. *Mat.-wiss. u. Werkstofftech.* 1979, vol. 10, no. 9, pp. 293–302.
13. Kramer I.R., Bonis L.J., Bruyn P.L., Duga J.J. Effect of surfaces on mechanical behavior of metals. *Fundamental Phenomena in the Materials Sciences Springer US*. 1995, pp. 171–193.
14. Latanision R.M., Sedriks A.J., Westwood A. Surface-sensitive mechanical behavior of metals. In: *Struct. and Properties of Metals Surfaces*. 1973, pp. 500–538.
15. Norstrem L.A., Iachasson D. Surface yield strength and flow stress in high-strength martensitic steel. *Scnd. J. Mat.* 1983, vol. 12, no. 1, pp. 37–39.
16. Franco Rustichelli, Jacek J. Skrzypiek. *Innovative technological materials. Structural properties by neutron scattering, Synchrotron radiation and modeling*. London - New York: Springer, 2010, 280 p.
17. Totten G., Howes M., Inoue T. *Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel*. USA: ASM International, Materials Park, Ohio, 2002, 500 p.
18. Viktor Hauk. *Structural and residual stress analysis by nondestructive methods: evaluation, application, assessment*. Amsterdam: Elsevier Science B.V. 1997, 640 p.
19. Zaides S.A., Nguyen V.H. Improving the flexural rigidity of cold-finished steel. *Steel in Translation*. 2016, vol. 46, no.7, pp. 505–509.
20. Zaides S.A., Nguyen V.H. Influence of Surface Plastic Deformation on the Flexural Rigidity of Shafts. *Russian Engineering Research*. 2016, vol. 36, no. 12, pp. 1008–1011.

### 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 15 October 2016