

УДК 621.778.2:621.774.6

УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИЙ ИЗГИБ КРУГЛОГО СТАЛЬНОГО БРУСА. СООБЩЕНИЕ 1. КОЭФФИЦИЕНТ ПРУЖИНЕНИЯ

Шинкин В.Н., д.ф.-м.н., профессор кафедры физики (shinkin-korolev@yandex.ru)

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
(119049, Россия, Москва, Ленинский пр., 4)

Аннотация. Круглый стальной брус широко применяется в металлургии, машиностроении, строительстве и является одним из главных игроков в машинной индустрии. Обладая отличными антикоррозийными свойствами, в сочетании с недюжинной прочностью, круглый стальной брус часто оказывается незаменим при производстве всевозможных механических машин и приспособлений. Цилиндрические рессоры для железнодорожного и автомобильного транспорта изготавливаются из круглого бруса с помощью специальных гибочных машин. Заготовка из круглого бруса также используется в металлургии при производстве бесшовных труб для газонефтяной промышленности. Валки прокатных и листопродвижных станов в металлургии имеют форму ступенчатого круглого бруса. Стальная строительная арматура изготавливается из круглого бруса и близка к нему по геометрическим размерам. Основными зарубежными производителями машин непрерывного литья заготовок для производства заготовок круглого сечения являются SMS-Demag (Германия), Danieli (Италия), SMS Concast (Швейцария) и Siemens VAI (Австрия). Современное производство круглого стального бруса имеется на многих российских металлургических заводах, например, на АО «Чусовской металлургический завод», ПАО «Челябинский металлургический комбинат», АО «Волжский трубный завод», ОАО «Нижнесергинский метизно-металлургический завод», АО «Чепецкий механический завод», ПАО «Северский трубный завод» и ПАО «Таганрогский металлургический завод». При изготовлении изделий из круглого бруса и их эксплуатации они часто испытывают упругую или упругопластическую деформацию изгиба или сложную деформацию кручения с изгибом. В данной работе предложен аналитический метод расчета остаточной кривизны круглого стального бруса при упругопластическом изгибе. Расчеты позволяют определить остаточную кривизну бруса после изгиба и изгибающие моменты поперечного сечения бруса при изгибе в зависимости от радиуса бруса, модуля Юнга, предела текучести и модуля упрочнения металла бруса. Результаты исследований могут быть широко использованы на машиностроительных и металлургических заводах.

Ключевые слова: круглый стальной брус, кривизна бруса, изгибающий момент поперечного сечения бруса, коэффициент пружинения бруса, остаточная деформация, нормальное напряжение, относительное удлинение, модуль упругости, модуль упрочнения, упругопластическая среда с линейным упрочнением.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-3-194-200

Для получения необходимых свойств и заданных геометрических размеров исходную стальную непрерывнолитую заготовку прокатывают в прокатных станах [1 – 46]. В зависимости от вида проката прокатные станы делятся на обжимные, листовые, сортовые и станы специального назначения. В свою очередь, сортовые станы делятся на крупносортовые, среднесортовые, мелкосортные, заготовочные, рельсобалочные, проволочные и штрипсовые. Сортный прокат делят на профили простой геометрической формы (круг, квадрат, шестигранник, прямоугольник) и фасонные (швеллер, рельс, угловой и тавровый профили и т. д.). Круглую и квадратную сталь прокатывают соответственно с диаметром или стороной квадрата 5 – 250 мм; шестигранную – с диаметром вписанного круга 6 – 100 мм; полосовую – шириной 10 – 200 мм и толщиной 4 – 60 мм.

Многочисленные исследования (проведенные в Германии, США, Японии и России) сравнительных анализов качественных показателей непрерывнолитых заготовок из углеродистых и легированных сталей квадратного, прямоугольного и круглого сечений для производства рессорных профилей круглого сечения показывают, что использование непрерывнолитой за-

готовки круглого сечения по сравнению с заготовками квадратного и прямоугольного сечений имеет ряд преимуществ. Круглая форма сечения способствует рассредоточению возникающей в осевой зоне нейтральной пористости и ликвации (неоднородности сплава по химическому составу, структуре и неметаллическим включениям, возникающие при кристаллизации непрерывнолитой заготовки, слитка или отливки), а поверхность заготовки круглого сечения более качественна из-за отсутствия продольных и угловых трещин.

Изгиб круглого стального бруса при изготовлении стальных рессор показан на рис. 1. Изгиб круглого бруса на трехвалковых вальцах показан на рис. 2.

Рассмотрим прямой стальной брус с круглым поперечным сечением радиуса R . Будем считать, что при продольном растяжении материал бруса в области пластических деформаций имеет линейное упрочнение.

Пусть σ и ε – нормальное напряжение и относительное удлинение бруса при растяжении; E , R и σ_y – модуль Юнга, модуль упрочнения и предел текучести материала бруса соответственно.

При растяжении бруса в области упругих деформаций нормальные напряжения подчиняются закону Гука



Рис. 1. Изгиб круглого стального бруса при изготовлении рессор

Fig. 1. Bending of round steel beam at springs' manufacture

$$\sigma = E\varepsilon,$$

а в области упрочнения зависимость нормального напряжения σ от относительного удлинения ε имеет прямолинейный вид [15 – 19]:

$$\sigma = \sigma_y + P(\varepsilon - \varepsilon_y), \quad \varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E}.$$

При изгибе бруса максимальные нормальные напряжения наблюдаются на его поверхности в точках поперечного сечения, максимально удаленных от нейтральной плоскости бруса.

Эпюра нормальных напряжений в поперечном сечении круглого бруса радиуса R при упругопластическом изгибе показана на рис. 3.

Поперечное сечение бруса при изгибе делится на две зоны – упругую и пластическую. Величина y_y , определяющая границу этих зон, находится из уравнений

$$\begin{aligned} \sigma_y &= E \frac{y_y}{\rho}; \quad \sigma_y = E \varepsilon_y; \quad \varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E}; \\ y_y &= \frac{\sigma_y \rho}{E} = \frac{E \varepsilon_y \rho}{E} = \varepsilon_y \rho; \quad \frac{y_y}{R} = \frac{\sigma_y \rho}{ER}; \quad \frac{\sigma_y \rho}{E y_y} = 1, \end{aligned}$$

где ρ – радиус кривизны оси бруса.

При увеличении изгибающего момента и кривизны упругая зона бруса уменьшается, однако даже при очень большой кривизне нейтральной оси не исчезает.

Радиус кривизны продольной оси круглого бруса с радиусом поперечного сечения R , при котором впервые достигается на его поверхности нормальное напряжение, равное пределу текучести σ_y , равен

$$\rho_y = E \frac{R}{\sigma_y}; \quad \sigma_y = E \frac{R}{\rho_y}; \quad \frac{\sigma_y \rho_y}{ER} = 1.$$

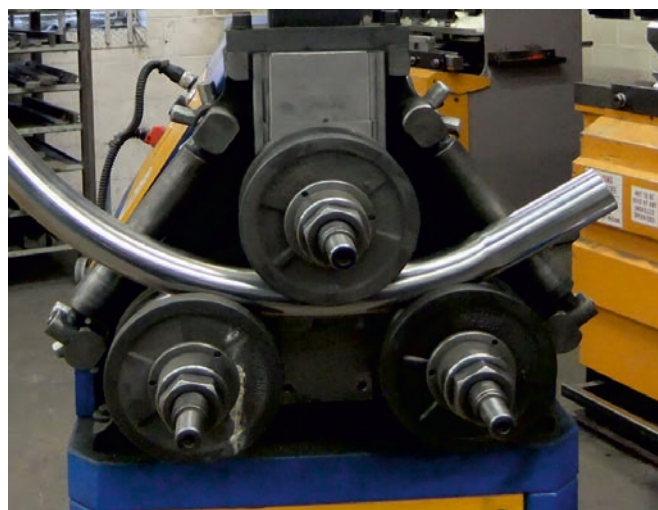


Рис. 2. Изгиб круглого стального бруса на вальцах

Fig. 2. Bending of round steel beam on rollers

Обозначим безразмерный изгибающий момент для круглого бруса символом

$$\Phi = \frac{M}{\sigma_y R^3}.$$

Введем для круглого стального бруса критерий Shi , равный

$$Shi = \frac{ER}{\sigma_y \rho}.$$

Физический смысл критерия Shi – безразмерная кривизна.

При чисто упругом изгибе $\left(\frac{y_y}{R} = \frac{\sigma_y \rho}{ER} \geq 1 \right)$ изгибающий момент M в поперечном сечении круглого бруса равен

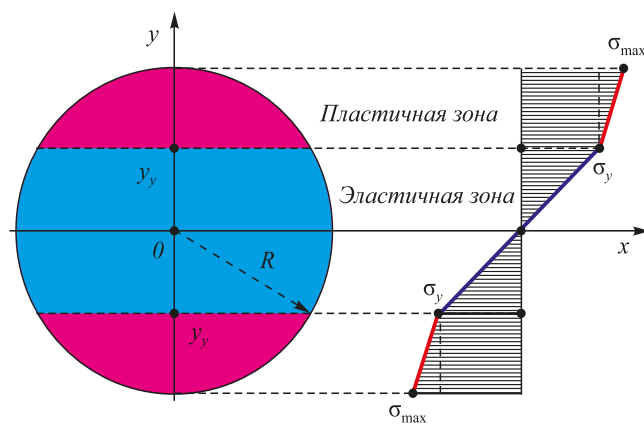


Рис. 3. Эпюра нормальных напряжений в поперечном сечении круглого бруса при изгибе

Fig. 3. Epure of normal stresses in the cross section of round beam under bending

$$M = \frac{\pi ER^4}{4\rho}.$$

Приведем выражение для изгибающего момента при чисто упругом изгибе круглого бруса к безразмерному виду

$$\frac{M}{\sigma_y R^3} = \frac{\pi}{4} \frac{ER}{\sigma_y \rho};$$

$$\Phi = \frac{\pi}{4} Shi.$$

При чисто упругом изгибе круглого бруса и $\rho = \rho_y = \frac{ER}{\sigma_y}$ ($Shi = 1$) получаем

$$\Phi = \frac{\pi}{4}.$$

При упругопластическом изгибе $\left(\frac{y_y}{R} = \frac{\sigma_y \rho}{ER} < 1\right)$ изгибающий момент M в поперечном сечении круглого бруса равен

$$M = -\frac{1}{6} \sigma_y R^3 \left(1 - \frac{P}{E}\right) \sqrt{1 - \left(\frac{\sigma_y \rho}{ER}\right)^2} \left[2 \left(\frac{\sigma_y \rho}{ER}\right)^2 - 5\right] + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{P}{E}\right) \frac{ER^4}{\rho} \arcsin\left(\frac{\sigma_y \rho}{ER}\right) + \frac{\pi PR^4}{4 \rho}.$$

Приведем выражение для изгибающего момента круглого бруса при упругопластическом изгибе к безразмерному виду

$$\frac{M}{\sigma_y R^3} = -\frac{1}{6} \left(1 - \frac{P}{E}\right) \sqrt{1 - \left(\frac{\sigma_y \rho}{ER}\right)^2} \left[2 \left(\frac{\sigma_y \rho}{ER}\right)^2 - 5\right] + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{P}{E}\right) \left(\frac{ER}{\sigma_y \rho}\right) \arcsin\left(\frac{\sigma_y \rho}{ER}\right) + \frac{\pi P}{4 E} \left(\frac{ER}{\sigma_y \rho}\right).$$

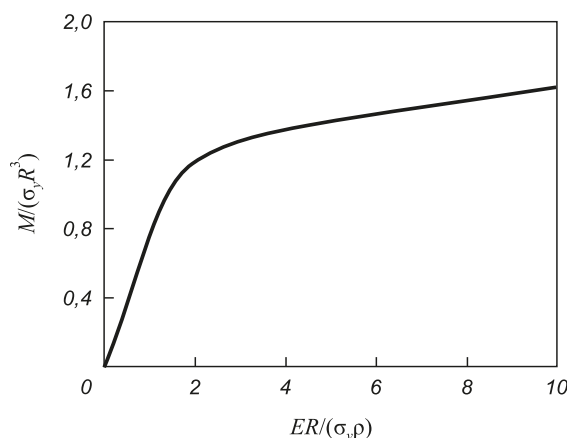


Рис. 4. Зависимость изгибающего момента от кривизны бруса

Fig. 4. Dependence of bending moment from beam's curvature

Тогда безразмерный изгибающий момент Φ круглого бруса при изгибе можно записать в виде функции одной переменной – критерия Shi :

$$\Phi = -\frac{1}{6} \left(1 - \frac{P}{E}\right) \sqrt{1 - \frac{1}{Shi^2}} \left(\frac{2}{Shi^2} - 5\right) + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{P}{E}\right) Shi \arcsin\left(\frac{1}{Shi}\right) + \frac{\pi P}{4 E} Shi.$$

Для высокопрочных трубных сталей, используемых при производстве труб большого диаметра для магистральных газонефтепроводов, $\frac{P}{E} = 0,044$.

Зависимость безразмерного изгибающего момента $\Phi = \frac{M}{\sigma_y R^3}$ от критерия $Shi = \frac{ER}{\sigma_y \rho}$ при $\frac{P}{E} = 0,044$ показана на рис. 4.

При упругопластическом изгибе круглого бруса и $\rho = \rho_y = \frac{ER}{\sigma_y}$ ($Shi = 1$) получаем

$$\Phi = \frac{\pi}{4}.$$

При упругопластическом изгибе круглого бруса $\left(\frac{y_y}{R} = \frac{\sigma_y \rho}{ER} < 1\right)$ для диаграммы Прандтля (модуль упругости $P = 0$)

$$\Phi = -\frac{1}{6} \sqrt{1 - \frac{1}{Shi^2}} \left(\frac{2}{Shi^2} - 5\right) + \frac{1}{2} Shi \arcsin\left(\frac{1}{Shi}\right).$$

Замечание 1. При упругопластическом изгибе бруса прямоугольного поперечного сечения толщиной h и шириной b [32 – 35]

$$M(\rho) = \frac{bh^2 \sigma_y}{12} \left[3 - 4 \left(\frac{\sigma_y \rho}{Eh}\right)^2\right] + \frac{bh^3 P}{12 \rho} \left(1 - 2 \frac{\sigma_y \rho}{Eh}\right)^2 \left(1 + \frac{\sigma_y \rho}{Eh}\right);$$

$$\Phi = \frac{12M}{\sigma_y bh^2}; \quad Shi = \frac{Eh}{\sigma_y \rho};$$

$$\Phi = 3 - \frac{4}{Shi^2} + \frac{P}{E} Shi \left(1 - \frac{2}{Shi}\right)^2 \left(1 + \frac{1}{Shi}\right).$$

В основе определения остаточных деформаций после упругопластических деформаций лежит теорема о разгрузке Генки [15 – 19, 32 – 35]: «остаточные напряжения равны разности между истинными напряжениями в упругопластическом теле и теми напряжениями, которые создавались бы в нем при предположении об идеальной упругости материала».

Пользуясь теоремой о разгрузке Генки, получаем уравнение для определения остаточного радиуса кривизны круглого бруса ρ_{res} :

$$\frac{M}{\sigma_y R^3} = \frac{\pi ER}{4 \sigma_y} \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_{res}} \right);$$

$$\frac{1}{\rho_{res}} = \frac{1}{\rho} - \frac{4M}{\pi ER^4}.$$

Коэффициент пружинения при изгибе круглого бруса составляет

$$\beta(\rho) = \frac{\rho_{res}}{\rho} = \frac{1}{1 - \frac{4M\rho}{\pi ER^4}} = \frac{1}{1 - \frac{4}{\pi} \frac{M}{\sigma_y R^3} \frac{\sigma_y \rho}{ER}}; \quad \rho_{res} = \beta(\rho)\rho.$$

При чисто упругом изгибе круглого бруса $\left(\frac{y_y}{R} = \frac{\sigma_y \rho}{ER} \geq 1 \right)$ коэффициент пружинения имеет значение

$$\beta(\rho) = \infty.$$

При упругопластическом изгибе круглого бруса $\left(\frac{y_y}{R} = \frac{\sigma_y \rho}{ER} < 1 \right)$ коэффициент пружинения равен

$$\beta(\rho) = 1 / \left\{ \left(1 - \frac{P}{E} \right) \left[1 + \frac{2}{3\pi} \frac{\sigma_y \rho}{ER} \sqrt{1 - \left(\frac{\sigma_y \rho}{ER} \right)^2} \times \right. \right.$$

$$\left. \times \left[2 \left(\frac{\sigma_y \rho}{ER} \right)^2 - 5 \right] - \frac{2}{\pi} \arcsin \left(\frac{\sigma_y \rho}{ER} \right) \right] \right\};$$

$$\beta(0) = \frac{1}{1 - \frac{P}{E}}; \quad \beta(\rho_y) = \infty;$$

$$\beta(Shi) = 1 / \left\{ \left(1 - \frac{P}{E} \right) \left[1 + \frac{2}{3\pi} \frac{1}{Shi} \sqrt{1 - \frac{1}{Shi^2}} \times \right. \right.$$

$$\left. \times \left(\frac{2}{Shi^2} - 5 \right) - \frac{2}{\pi} \arcsin \frac{1}{Shi} \right] \right\}.$$

Таким образом, коэффициент пружинения b круглой стальной заготовки при изгибе является функцией одной переменной – критерия Shi .

Зависимость коэффициента пружинения b от критерия $Shi = \frac{ER}{\sigma_y \rho}$ при $\frac{P}{E} = 0,044$ показана на рис. 5.

При упругопластическом изгибе круглого бруса $\left(\frac{y_y}{R} = \frac{\sigma_y \rho}{ER} < 1 \right)$ для диаграммы Прандтля (модуль упругости $P = 0$)

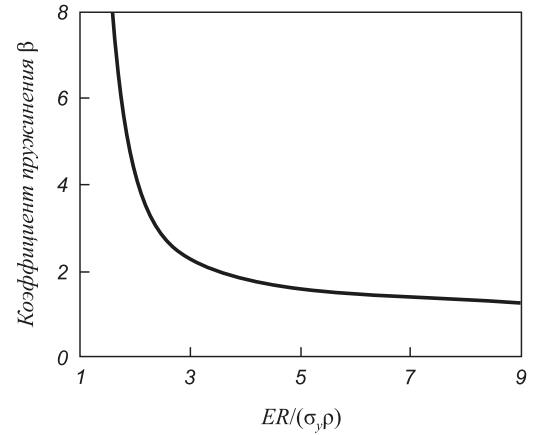


Рис. 5. Зависимость коэффициента пружинения от кривизны бруса

Fig. 5. Dependence of springback coefficient from beam's curvature

$$\beta(\rho) = 1 / \left[1 + \frac{2}{3\pi} \frac{\sigma_y \rho}{ER} \sqrt{1 - \left(\frac{\sigma_y \rho}{ER} \right)^2} \times \right.$$

$$\left. \times \left(2 \left(\frac{\sigma_y \rho}{ER} \right)^2 - 5 \right) - \frac{2}{\pi} \arcsin \left(\frac{\sigma_y \rho}{ER} \right) \right];$$

$$\beta(0) = 1; \quad \beta(\rho_y) = \infty;$$

$$\beta(Shi) = \frac{1}{1 + \frac{2}{3\pi} \frac{1}{Shi} \sqrt{1 - \frac{1}{Shi^2}} \left(\frac{2}{Shi^2} - 5 \right) - \frac{2}{\pi} \arcsin \frac{1}{Shi}}.$$

Замечание 2. При упругопластическом изгибе бруса прямоугольного поперечного сечения толщиной h [32 – 35]

$$\beta(\rho) = \frac{1}{\left(1 - \frac{P}{E} \right) \left[1 - 2 \left(\frac{\sigma_y \rho}{hE} \right) \right]^2 \left(1 + \frac{\sigma_y \rho}{hE} \right)};$$

$$\Phi = \frac{12M}{\sigma_y b h^2}; \quad Shi = \frac{Eh}{\sigma_y \rho};$$

$$\beta(Shi) = \frac{1}{\left(1 - \frac{P}{E} \right) \left(1 - \frac{2}{Shi} \right)^2 \left(1 + \frac{1}{Shi} \right)}.$$

Выводы. Получены аналитические выражения для изгибающего момента и коэффициента пружинения круглого стального бруса при упругопластическом изгибе.

Результаты исследований могут быть применены в металлургической и машиностроительной промышленности при производстве стальных труб и изделий из круглого стального бруса [1 – 46].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Banabic D. Multiscale modeling in sheet metal forming. – Springer, 2016. – 405 p.

2. Banabic D. Sheet metal forming processes. Constitutive modelling and numerical simulation. – Springer, 2010. – 301 p.
3. Belskiy S.M., Yankova S., Chuprov V.B. etc. Temperature field of stripes under hot rolling // *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2015. Vol. 50. No. 6. P. 613 – 616.
4. Belskiy S., Mazur I., Lezhnev S., Panin E. Distribution of linear pressure of thin-sheet rolling across strip width // *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2016. Vol. 51. No. 4. P. 371 – 378.
5. Belskiy S.M., Yankova S., Mazur I.P., Stoyakin A.O. Influence of the transversal displacements of metal on the camber formation of hot-rolled strip // *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2017. Vol. 52. No. 4. P. 672 – 678.
6. Belskiy S.M. Parameters of evaluation of shape cross section of hot-rolled steel strips. Message 1. The determination coefficient // *Chernye Metally*. 2017. No. 10. P. 65 – 70.
7. Bhattacharyya D. Composite sheet forming. Vol. 11. – Elsevier Science, 1997. – 530 p.
8. Calladine C.R. Plasticity for engineers. Theory and applications. – Woodhead Publishing, 2000. – 328 p.
9. Chakrabarty J. Theory of plasticity. – Butterworth-Heinemann, 2006. – 896 p.
10. Chakrabarty J. Applied plasticity. – Springer, 2010. – 758 p.
11. Davim J.P. Tribology in manufacturing technology. – Springer, 2013. – 198 p.
12. Davim J.P. Materials Forming and Machining. Research and Development. – Woodhead Publishing, 2015. – 202 p.
13. Dixit U.S., Hazarika M., Davim J.P. A brief history of mechanical engineering. – Springer, 2017. – 178 p.
14. Dixit P.M., Dixit U.S. Modeling of metal forming and machining processes by finite element and soft computing methods. – Springer, 2008. – 590 p.
15. Shinkin V.N. Calculation of steel sheet's curvature for its flattening in the eight-roller straightening machine // *Chernye Metally*. 2017. No. 2. P. 46 – 50.
16. Shinkin V.N. Calculation of bending moments of steel sheet and support reactions under flattening on the eight-roller straightening machine // *Chernye Metally*. 2017. No. 4. P. 49 – 53.
17. Shinkin V.N. Asymmetric three-roller sheet-bending systems in steel-pipe production // *Steel in Translation*. 2017. Vol. 47. No. 4. P. 235 – 240.
18. Shinkin V.N. Failure of large-diameter steel pipe with rolling scabs // *Steel in Translation*. 2017. Vol. 47. No. 6. P. 363 – 368.
19. Shinkin V.N. Simplified calculation of the bending torques of steel sheet and the roller reaction in a straightening machine // *Steel in Translation*. 2017. Vol. 47. No. 10. P. 639 – 644.
20. Frank V. Lecture notes in production engineering. – Springer, 2013. – 211 p.
21. Qin Y. Micromanufacturing engineering and technology. – William Andrew, 2015. – 858 p.
22. Hingole R.S. Advances in metal forming. Expert system for metal forming. – Springer, 2015. – 116 p.
23. Hu J., Marciniak Z., Duncan J. Mechanics of Sheet Metal Forming. – Butterworth-Heinemann, 2002. – 211 p.
24. Kang S.-J. Sintering. Densification, grain growth and microstructure. – Butterworth-Heinemann, 2004. – 280 p.
25. Muhin U., Belskij S., Makarov E. Simulation of accelerated strip cooling on the hot rolling mill run-out roller table // *Frattura ed Integrità Strutturale*. 2016. Vol. 37. P. 305 – 311.
26. Muhin U., Belskij S., Makarov E. Application of between-stand cooling in the production hot-rolled strips // *Frattura ed Integrità Strutturale*. 2016. Vol. 37. P. 312 – 317.
27. Muhin U., Belskij S. Study of the influence between the strength of antibending of working rolls on the widening during hot rolling of thin sheet metal // *Frattura ed Integrità Strutturale*. 2016. Vol. 37. P. 318 – 324.
28. Shabalov I.P., Solov'ev D.M., Filippov G.A., Livanova O.V. Influence of UO shaping on the mechanical properties of large-diameter electrowelded pipe // *Steel in Translation*. 2015. Vol. 45. No. 4. P. 287 – 292.
29. Lenard J.G. Metal Forming Science and Practice. – Elsevier Science, 2002. – 378 p.
30. Lim Y., Venugopal R., Ulsoy A.G. Process control for sheet-metal stamping process modeling, controller design and stop-floor implementation. – Springer, 2014. – 140 p.
31. Lin J., Balint D., Pietrzyk M. Microstructure evolution in metal forming processes. – Woodhead Publishing, 2012. – 416 p.
32. Shinkin V.N. Calculation of technological parameters of O-forming press for manufacture of large-diameter steel pipes // *CIS Iron and Steel Review*. 2017. Vol. 13. P. 33 – 37.
33. Shinkin V.N. Mathematical model of technological parameters' calculation of flanging press and the formation criterion of corrugation defect of steel sheet's edge // *CIS Iron and Steel Review*. 2017. Vol. 13. P. 44 – 47.
34. Shinkin V.N. Springback coefficient of the main pipelines' steel large-diameter pipes under elastoplastic bending // *CIS Iron and Steel Review*. 2017. Vol. 14. P. 28 – 33.
35. Shinkin V.N. Arithmetical method of calculation of power parameters of 2N-roller straightening machine under flattening of steel sheet // *CIS Iron and Steel Review*. 2017. Vol. 14. P. 22 – 27.
36. Klocke F. Manufacturing processes 1. Cutting. – Springer, 2011. – 506 p.
37. Klocke F. Manufacturing processes 4. Forming. – Springer, 2013. – 516 p.
38. Nielsen C.V., Zhang W., Alves L.M. etc. Modeling of thermo-electro-mechanical processes. Applications in metal forming and resistance welding. – Springer, 2013. – 120 p.
39. Predeleanu M., Gilormini P. Advanced methods in materials processing defects. Vol. 45. – Elsevier Science, 1997. – 422 p.
40. Groshkova A.L., Polulyakh L.A., Travyanov A.Ya. etc. Phosphorus distribution between phases in smelting high-carbon ferromanganese in the blast furnace // *Steel in Translation*. 2007. Vol. 37. No. 11. P. 904 – 907.
41. Podgorodetskii G.S., Yusfin Yu.S., Sazhin A.Yu. etc. Production of generator gas from solid fuels // *Steel in Translation*. 2015. Vol. 45. No. 6. P. 395 – 402.
42. Orelkina O.A., Petelin A.L., Polulyakh L.A. Distribution of secondary gas emissions around steel plants // *Steel in Translation*. 2015. Vol. 45. No. 11. P. 811 – 814.
43. Polulyakh L.A., Dashevskii V.Ya., Yusfin Yu.S. Manganese-ferroalloy production from Russian manganese ore // *Steel in Translation*. 2014. Vol. 44. No. 9. P. 617 – 624.
44. Predeleanu M., Ghosh S.K. Materials processing defects. Vol. 43. – Elsevier Science, 1995. – 434 p.
45. Rees D. Basic engineering plasticity. An introduction with engineering and manufacturing applications. – Butterworth-Heinemann, 2006. – 528 p.
46. Wilko C.E. Formability. A review of parameters and processes that control, limit or enhance the formability of sheet metal. – Springer, 2011. – 112 p.

Поступила 26 декабря 2017 г.

ELASTOPLASTIC BEND OF ROUND STEEL BEAM. REPORT 1. SPRINGBACK COEFFICIENT

V.N. Shinkin

National University of Science and Technology "MISIS" (MISIS),
Moscow, Russia

Abstract. The round steel beam is widely used in metallurgy, mechanical engineering, construction and is one of the major players in the engine industry. Having the excellent anti-corrosion properties, combined with a remarkable strength, the round steel beam is often indispensable in the production of the various mechanical machines and devices. The cylindrical springs for the railway and motor transport are made from the round beam with the help of the special bending machines. Billets from the round beam are also used in the metallurgy at the manufacture of seamless pipes for the oil and gas industry. The rollers of the sheet-straightening machines and rolling mills in metallurgy have the form of stepped round beam. The steel construction armature is made from the round beam and is close to it by geometric dimensions. The main foreign producers of continuous-casting-billets machines for production of round-cross-section blanks are SMS-Demag (Germany), Danieli (Italy), SMS Concast (Switzerland) and Siemens VAI (Austria). The modern production of round steel beam has place on many Russian metallurgical plants, for example, on JSC "Chusovskoy metallurgical plant", PJSC "Chelyabinsk metallurgical plant", JSC "Volzhsky pipe plant", OJSC "Nizhneserginsky metizno-metallurgical plant", JSC "Chepetsky mechanical plant", PJSC "Seversky pipe plant" and PJSC "Taganrog metallurgical plant". In manufacture of articles from round beam and under their exploitation, they often have an elastic or elastoplastic deformation of bending or have a complex deformation of torsion with bending. The analytical method for determining residual curvature of round steel beam under elastoplastic bend is proposed in this paper. The calculations allow us to determine residual curvature of round beam after bending and the bending moments of beam's cross section at bending depending on the beam's radius, elastic modulus, yield stress and hardening modulus of beam's metal. The research results can be widely used at engineering and metallurgical plants.

Keywords: round steel beam, curvature of beam, bending moment of beam's cross section, residual deformation, normal stress, relative elongation, elastic modulus, hardening modulus, elastoplastic continuous medium with linear hardening.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-3-194-200

REFERENCES

1. Banabic D. *Multiscale modeling in sheet metal forming*. Springer, 2016, 405 p.
2. Banabic D. *Sheet metal forming processes. Constitutive modelling and numerical simulation*. Springer, 2010, 301 p.
3. Belskiy S.M., Yankova S., Chuprov V.B., Bakhaev K.V., Stoyakin A.O. Temperature field of stripes under hot rolling. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2015, vol. 50, no. 6, pp. 613–616.
4. Belskiy S., Mazur I., Lezhnev S., Panin E. Distribution of linear pressure of thin-sheet rolling across strip width. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2016, vol. 51, no. 4, pp. 371–378.
5. Belskiy S.M., Yankova S., Mazur I.P., Stoyakin A.O. Influence of the transversal displacements of metal on the camber formation of hot-rolled strip. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2017, vol. 52, no. 4, pp. 672–678.
6. Belskiy S.M. Parameters of evaluation of shape cross section of hot-rolled steel strips. Message 1. The determination coefficient. *Chernye Metally*. 2017, no. 10, pp. 65–70.
7. Bhattacharyya D. *Composite sheet forming*. Vol. 11. Elsevier Science, 1997, 530 p.
8. Calladine C.R. *Plasticity for engineers. Theory and applications*. Woodhead Publishing, 2000, 328 p.
9. Chakrabarty J. *Theory of plasticity*. Butterworth-Heinemann, 2006, 896 p.
10. Chakrabarty J. *Applied plasticity*. Springer, 2010, 758 p.
11. Davim J.P. *Tribology in manufacturing technology*. Springer, 2013, 198 p.
12. Davim J.P. *Materials Forming and Machining. Research and Development*. Woodhead Publishing, 2015, 202 p.
13. Dixit U.S., Hazarika M., Davim J.P. *A brief history of mechanical engineering*. Springer, 2017, 178 p.
14. Dixit P.M., Dixit U.S. *Modeling of metal forming and machining processes by finite element and soft computing methods*. Springer, 2008, 590 p.
15. Shinkin V.N. Calculation of steel sheet's curvature for its flattening in the eight-roller straightening machine. *Chernye Metally*. 2017, no. 2, pp. 46–50.
16. Shinkin V.N. Calculation of bending moments of steel sheet and support reactions under flattening on the eight-roller straightening machine. *Chernye Metally*. 2017, no. 4, pp. 49–53.
17. Shinkin V.N. Asymmetric three-roller sheet-bending systems in steel-pipe production. *Steel in Translation*. 2017, vol. 47, no. 4, pp. 235–240.
18. Shinkin V.N. Failure of large-diameter steel pipe with rolling scabs. *Steel in Translation*. 2017, vol. 47, no. 6, pp. 363–368.
19. Shinkin V.N. Simplified calculation of the bending torques of steel sheet and the roller reaction in a straightening machine. *Steel in Translation*. 2017, vol. 47, no. 10, pp. 639–644.
20. Frank V. *Lecture notes in production engineering*. Springer, 2013, 211 p.
21. Qin Y. *Micromanufacturing engineering and technology*. William Andrew, 2015, 858 p.
22. Hingole R.S. *Advances in metal forming. Expert system for metal forming*. Springer, 2015, 116 p.
23. Hu J., Marciniak Z., Duncan J. *Mechanics of Sheet Metal Forming*. Butterworth-Heinemann, 2002, 211 p.
24. Kang S.-J. *Sintering. Densification, grain growth and microstructure*. Butterworth-Heinemann, 2004, 280 p.
25. Muhin U., Belskiy S., Makarov E. Simulation of accelerated strip cooling on the hot rolling mill run-out roller table. *Frattura ed Integrita Strutturale*. 2016, vol. 37, pp. 305–311.
26. Muhin U., Belskiy S., Makarov E. Application of between-stand cooling in the production hot-rolled strips. *Frattura ed Integrita Strutturale*. 2016, vol. 37, pp. 312–317.
27. Muhin U., Belskiy S. Study of the influence between the strength of antibending of working rolls on the widening during hot rolling of thin sheet metal. *Frattura ed Integrita Strutturale*. 2016, vol. 37, pp. 318–324.
28. Shabalov I.P., Solov'ev D.M., Filippov G.A., Livanova O.V. Influence of UO shaping on the mechanical properties of large-diameter electrowelded pipe. *Steel in Translation*. 2015, vol. 45, no. 4, pp. 287–292.
29. Lenard J.G. *Metal Forming Science and Practice*. Elsevier Science, 2002, 378 p.
30. Lim Y., Venugopal R., Ulsoy A.G. *Process control for sheet-metal stamping process modeling, controller design and stop-floor implementation*. Springer, 2014, 140 p.
31. Lin J., Balint D., Pietrzyk M. *Microstructure evolution in metal forming processes*. Woodhead Publishing, 2012, 416 p.
32. Shinkin V.N. Calculation of technological parameters of O-forming press for manufacture of large-diameter steel pipes. *CIS Iron and Steel Review*. 2017, vol. 13, pp. 33–37.

33. Shinkin V.N. Mathematical model of technological parameters' calculation of flanging press and the formation criterion of corrugation defect of steel sheet's edge. *CIS Iron and Steel Review*. 2017, vol. 13, pp. 44–47.
34. Shinkin V.N. Springback coefficient of the main pipelines' steel large-diameter pipes under elastoplastic bending. *CIS Iron and Steel Review*. 2017, vol. 14, pp. 28–33.
35. Shinkin V.N. Arithmetical method of calculation of power parameters of 2N-roller straightening machine under flattening of steel sheet. *CIS Iron and Steel Review*. 2017, vol. 14, pp. 22–27.
36. Klocke F. *Manufacturing processes 1. Cutting*. Springer, 2011, 506 p.
37. Klocke F. *Manufacturing processes 4. Forming*. Springer, 2013, 516 p.
38. Nielsen C.V., Zhang W., Alves L.M., Bay N., Martins P. *Modeling of thermo-electro-mechanical processes. Applications in metal forming and resistance welding*. Springer, 2013, 120 p.
39. Predeleanu M., Gilormini P. *Advanced methods in materials processing defects*. Vol. 45. Elsevier Science, 1997, 422 p.
40. Groshkova A.L., Polulyakh L.A., Travyanov A.Ya., Dashevskii V.Ya., Yusfin Yu.S. Phosphorus distribution between phases in smelting high-carbon ferromanganese in the blast furnace. *Steel in Translation*. 2007, vol. 37, no. 11, pp. 904–907.
41. Podgorodetskii G.S., Yusfin Yu.S., Sazhin A.Yu., Gorbunov V.B., Polulyakh L.A. Production of generator gas from solid fuels. *Steel in Translation*. 2015, vol. 45, no. 6, pp. 395–402.
42. Orelkina O.A., Petelin A.L., Polulyakh L.A. Distribution of secondary gas emissions around steel plants. *Steel in Translation*. 2015, vol. 45, no. 11, pp. 811–814.
43. Polulyakh L.A., Dashevskii V.Ya., Yusfin Yu.S. Manganese-ferroalloy production from Russian manganese ore. *Steel in Translation*. 2014, vol. 44, no. 9, pp. 617–624.
44. Predeleanu M., Ghosh S.K. *Materials processing defects*. Vol. 43. Elsevier Science, 1995, 434 p.
45. Rees D. *Basic engineering plasticity. An introduction with engineering and manufacturing applications*. Butterworth-Heinemann, 2006, 528 p.
46. Wilko C.E. *Formability. A review of parameters and processes that control, limit or enhance the formability of sheet metal*. Springer, 2011, 112 p.

Information about the author:

V.N. Shinkin, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor of the Chair of Physics (shinkin-korolev@yandex.ru)

Received December 26, 2017