

УДК 621.981.21:621.774.21

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ЛИСТОГИБОЧНЫХ НЕСИММЕТРИЧНЫХ ТРЕХВАЛКОВЫХ ВАЛЬЦОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ СТАЛЬНЫХ ТРУБ

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

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
(119991, Россия, Москва, Ленинский пр., 4)

Аннотация. Для получения изделий различной конфигурации из металлического листа используют множество приспособлений. Одно из них – листогибочные вальцы, которые можно классифицировать по нескольким признакам: по количеству валков (двух-, трех-, четырехвалковые); по типу привода (механические, пневматические, электромеханические, гидравлические); по взаимному расположению валков (симметричные, несимметричные/асимметричные). Вальцы листогибочные трехвалковые применяются для производства изделий цилиндрической, овальной и конической формы путем гибки листового металла, с их помощью изготавливают трубы, желоба, элементы воздуховодов, обечайки, бочки, всевозможные кожухи. Принцип работы листогибочных трехвалковых вальцов основан на противоположно направленном вращении валков, благодаря которому происходит захват листового материала и его гибка по заданному радиусу. Для облегчения подачи листов и выемки изделий, согнутых в замкнутую окружность, листогибочные трехвалковые вальцы комплектуются съемным и регулируемым по прижиму передним валом. В трехвалковых вальцах диаметр верхнего валка примерно в 1,5 раза больше диаметра нижних валков. В процессе формовки валки совершают реверсивное движение, при этом верхний валок может подниматься и опускаться для регулировки диаметра формируемой заготовки. При этом способе формовки крайние небольшие участки листа остаются плоскими. Этот недостаток устраняется подгибкой концов на прессе или на валковом стане. В настоящей работе предложен математический метод определения сил и моментов при холодной гибке толстого стального листа на листогибочных трехвалковых вальцах. Расчеты позволяют определить реакции опор валков, остаточные напряжения в стенке стального листа, долю пластической деформации по толщине листа и относительную деформацию продольных поверхностных волокон листа при гибке в зависимости от радиуса валков, шага между валками, величины обжатия листа верхним валком, толщины листа, а также модуля Юнга, предела текучести и модуля упрочнения стали листа. Результаты исследований могут быть использованы на металлургических и машиностроительных заводах при производстве стальных труб большого диаметра для магистральных трубопроводов.

Ключевые слова: стальной лист, вальцы листогибочные трехвалковые, кривизна поверхности листа, коэффициент пружинения, упругопластическая среда с линейным упрочнением.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-4-285-291

Рассмотрим процесс формовки труб большого диаметра из широкого толстого стального листа для магистральных трубопроводов.

Современные технологии производства стальных прямошовных электросварных труб большого диаметра (1020, 1220 и 1420 мм) из сталей класса прочностей К38 – К65 и Х42 – Х80 с толщиной стенки до 52 мм и рабочим давлением до 22,15 МПа состоят из нескольких последовательных технологических операций, основной из которых является формовка плоского стального листа в незамкнутую цилиндрическую заготовку перед сборкой и сваркой трубы [1 – 35].

Наибольшее распространение при формовке трубы в России и за рубежом (Германия, Китай, Индия) получили следующие способы: формовка листа в незамкнутую цилиндрическую заготовку на стане валковороликовой формовки и непрерывном валковом стане; формовка листа на листогибочных трехвалковых вальцах; формовка листа в цилиндрическую заготовку на прессах (схема UOE); пошаговая формовка листа штампами (пуансонами) на узких бойках (схема JCOE) [18 – 24].

При производстве стальных труб большого диаметра для магистральных газонефтепроводов на ОАО «Челябинский трубопрокатный завод» и АО «Выксунский металлургический завод» применяются схемы UOE и JCOE (фирмы SMS Meer); на ЗАО «Ижорский трубный завод» применяется схема JCOE (фирмы SMS Meer); на АО «Волжский трубный завод» применяется непрерывная вальцевая формовка; на АО «Загорский трубный завод» применяются листогибочные трехвалковые вальцы (фирмы Haeusler).

Для получения изделий различной конфигурации из металлического листа используют множество приспособлений, в том числе листогибочные вальцы, которые можно классифицировать по нескольким признакам: по количеству валков (двух-, трех-, четырехвалковые); по типу привода (механические, пневматические, электромеханические, гидравлические); по взаимному расположению валков (симметричные, несимметричные/асимметричные).

Вальцы листогибочные трехвалковые (рис. 1 – 3) применяются для производства изделий цилиндрической, овальной и конической формы путем гибки лис-

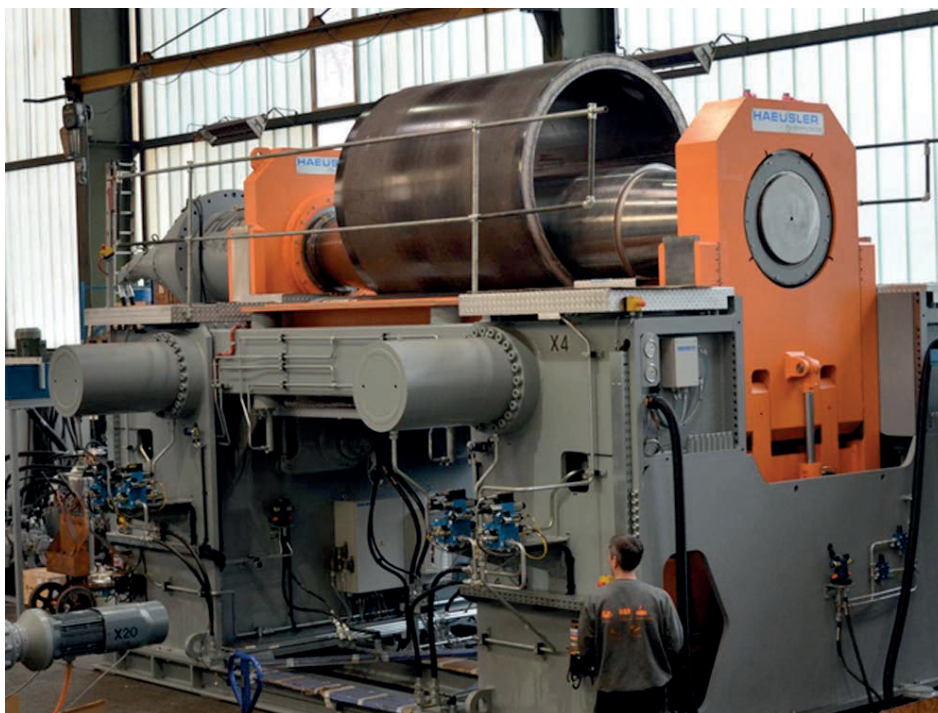


Рис. 1. Вальцы листогибочные трехвалковые с гидравлическим приводом (фирма Haeusler)

Fig. 1. The three-roller sheet-bending rolls with a hydraulic drive (Haeusler)



Рис. 2. Гибка стального листа на трехвалковых вальцах (фирма Haeusler)

Fig. 2. A steel sheet bending in the three-roller rolls (Haeusler)

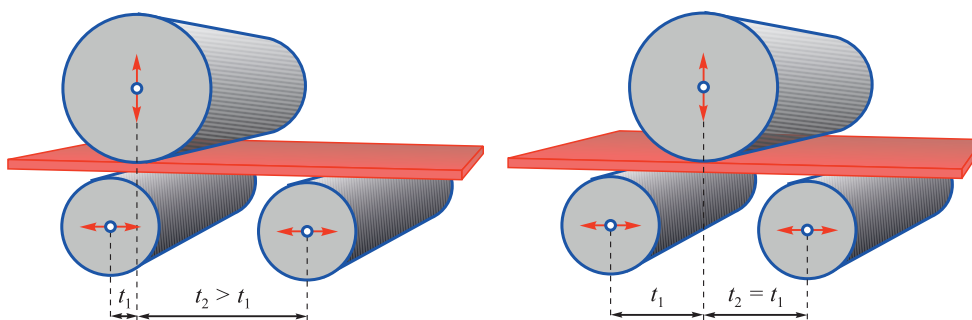


Рис. 3. Схема гибки стального листа на несимметричных трехвалковых вальцах

Fig. 3. Scheme of steel sheet bending at an asymmetrical three-roller rolls

тогового металла, с их помощью изготавливают трубы, желоба, элементы воздуховодов, обечайки, бочки, всевозможные кожухи [1 – 6, 18 – 24, 29 – 35].

Принцип работы листогибочных трехвалковых вальцов основан на противоположно направленном вращении валков, в результате которого происходит захват листового материала и его гибка по заданному радиусу. Для облегчения подачи листов и выемки изделий, согнутых в замкнутую окружность, листогибочные трехвалковые вальцы комплектуются съемным и регулируемым по прижиму передним валом.

В трехвалковых вальцах диаметр верхнего валка примерно в 1,5 раза больше диаметра нижних валков. В процессе формовки валки совершают реверсивное движение, при этом верхний валок может подниматься и опускаться для регулировки диаметра формируемой заготовки. При этом способе формовки крайние участки листа, длина которых равна половине расстояния между нижними валками, получают плоскими. Этот недостаток устраняется подгибкой концов на прессе или на валковом стане.

Рассмотрим математическую модель листогибочных трехвалковых вальцов. Пусть t_1 и t_2 – шаг между первым и вторым валками и шаг между вторым и третьим валками ($t_1 + t_2 = t$); H_i – величина обжатия нейтральной поверхности стального листа на i -ом валке; h – толщина стального листа; R_i – радиус i -го валка; $R_{i0} = R_i + h/2$; σ_T и E – предел текучести и модуль Юнга; Π_p и Π_c – модуль упрочнения стали при растяжении и сжатии; ρ_i и $\epsilon_i = 1/\rho_i$ – радиус кривизны и кривизна продольной нейтральной линии листа в точках ее касания с валками; φ_i – углы точек касания листа и валков ($i = 1, 2, 3$) (рис. 4).

Будем считать, что нижние валки имеют одинаковый диаметр ($R_1 = R_3$) и лежат на одном уровне ($H_1 = H_3 = 0$ м).

Коэффициент пружинения нейтральной линии листа (β) при радиусе кривизны ρ равен

$$\beta(\rho) = \frac{1}{(1 - \eta)(2\xi - 1)^2(\xi + 1)},$$

где $\xi = \frac{\rho\sigma_T}{hE}$; $\eta = \frac{\Pi_p + \Pi_c}{2E}$.

Введем три локальные прямоугольные декартовые системы координат $y - z$ в точках касания листа с валками вальцов. Оси z направим по касательной к поверхности валков слева направо, а оси y – перпендикулярно к оси z в сторону центров соответствующих валков. Будем аппроксимировать в этих системах координат продольную нейтральную линию листа (между соседними точками касания листа и валков) с помощью кубических полиномов вида $y(z) = az^2 - bz^3$ (метод Шинкина) (где a_i и b_i – коэффициенты кубических полиномов в i -ой системе координат).

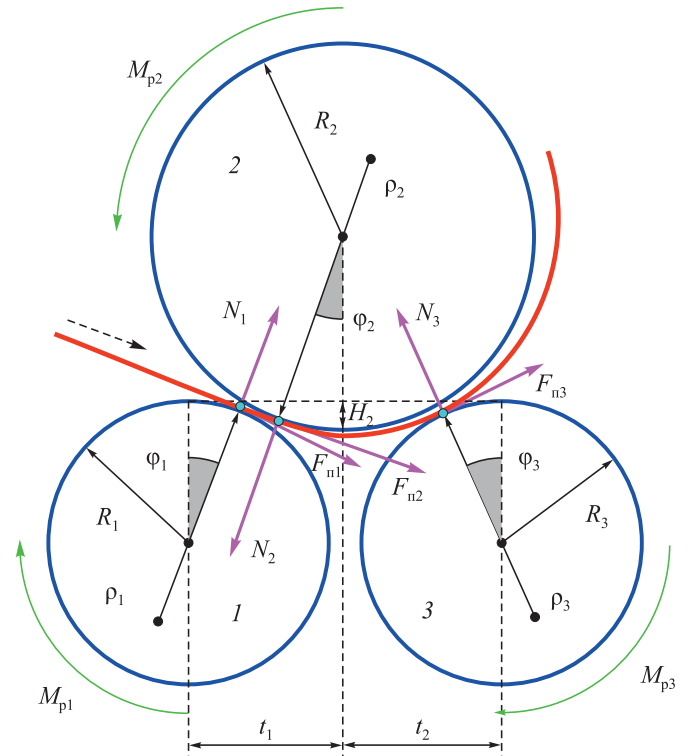


Рис. 4. Силы, действующие на лист при гибке на вальцах

Fig. 4. Forces and moments acting on the sheet under bending at the rolls

Составим уравнения для коэффициентов кубических полиномов, кривизны и радиусов кривизны нейтральной линии листа в точках его касания с валками:

первый и второй валки:

$$\begin{aligned} z_2 &= \left(\frac{t}{2} - R_{10} \sin \varphi_1 - R_{20} \sin \varphi_2 \right) \cos \varphi_1 + \\ &+ [H_2 - R_{10}(1 - \cos \varphi_1) - R_{20}(1 - \cos \varphi_2)] \sin \varphi_1; \\ y_2 &= - \left(\frac{t}{2} - R_{10} \sin \varphi_1 - R_{20} \sin \varphi_2 \right) \sin \varphi_1 + \\ &+ [H_2 - R_{10}(1 - \cos \varphi_1) - R_{20}(1 - \cos \varphi_2)] \cos \varphi_1; \\ a_1 &= \frac{3y_2 + \text{tg}(\varphi_1 - \varphi_2)z_2}{z_2^2}; \quad b_1 = \frac{2y_2 + \text{tg}(\varphi_1 - \varphi_2)z_2}{z_2^3}; \end{aligned}$$

$$\epsilon_{12} = 2a_1; \quad \rho_{12} = \frac{1}{2a_1};$$

$$\epsilon_{21} = \frac{2a_1 - 6b_1z_2}{[1 + (2a_1z_2 - 3b_1z_2^2)^2]^{3/2}}; \quad \rho_{21} = \frac{1}{\epsilon_{21}};$$

второй и третий валки:

$$\begin{aligned} z_3 &= \left(\frac{t}{2} + R_{20} \sin \varphi_2 - R_{30} \sin \varphi_3 \right) \cos \varphi_2 - \\ &- [H_2 - R_{20}(1 - \cos \varphi_2) - R_{30}(1 - \cos \varphi_3)] \sin \varphi_2; \end{aligned}$$

$$y_3 = \left(\frac{t}{2} + R_{20} \sin \varphi_2 - R_{30} \sin \varphi_3 \right) \sin \varphi_2 + \\ + [H_2 - R_{20}(1 - \cos \varphi_2) - R_{30}(1 - \cos \varphi_3)] \cos \varphi_2; \\ a_2 = \frac{3y_3 - \operatorname{tg}(\varphi_2 + \varphi_3)z_3}{z_3^2}; \quad b_2 = \frac{2y_3 - \operatorname{tg}(\varphi_2 + \varphi_3)z_3}{z_3^3}; \\ \varepsilon_{23} = 2a_2; \quad \rho_2 = \rho_{23} = \frac{1}{2a_2}; \\ \varepsilon_{32} = \frac{2a_2 - 6b_2z_3}{\left[1 + (2a_2z_3 - 3b_2z_3^2) \right]^{3/2}}; \quad \rho_3 = \rho_{32} = \frac{1}{\varepsilon_{32}}.$$

Граничные условия задачи имеют вид

$$\rho_{12} = \rho_1; \quad \rho_{21} = -\rho_{23}; \quad \rho_{32} = \beta(\rho_{23})\rho_{23}.$$

Доля пластической деформации по толщине листа при гибке определяется по выражению

$$\eta = \begin{cases} 1 - \frac{2\sigma_T \rho}{Eh}, & \text{если } \rho \leq \frac{Eh}{2\sigma_T}; \\ 0, & \text{если } \rho > \frac{Eh}{2\sigma_T}. \end{cases}$$

Относительная деформация продольных поверхностных волокон листа равна

$$\eta_{\text{прв}} = \frac{h}{2|\rho|}.$$

При пластическом изгибе стального листа $\left(\rho < \rho_T = \frac{hE}{2\sigma_T} \right)$ изгибающий момент (M) в поперечном сечении листа определяется по зависимости [18 – 24]

$$M(\rho) = \frac{bh^2\sigma_T}{12} \left[3 - 4 \left(\frac{\sigma_T \rho}{Eh} \right)^2 \right] + \frac{bh^3(\Pi_p + \Pi_c)}{24\rho} \times \\ \times \left[1 - 2 \left(\frac{\sigma_T \rho}{Eh} \right) \right]^2 \left(1 + \frac{\sigma_T \rho}{Eh} \right),$$

а при упругом изгибе стального листа $\left(\rho \geq \rho_T = \frac{hE}{2\sigma_T} \right)$ изгибающий момент в поперечном сечении листа определяется следующей зависимостью [1 – 6, 18 – 20]:

$$M = \frac{bh^3E}{12\rho}.$$

Пусть M_i – изгибающий момент стального листа в точках его касания с валками вальцов: $M_1 = 0$; $M_2 = M(\rho_2)$; $M_3 = 0$.

Для трубных высокопрочных сталей $\Pi_c \approx \Pi_p = \Pi$. Экстремальные остаточные напряжения в соответствии с работами [18 – 20] определяются по выражениям

$$\sigma_{\text{ост}}^1 = \sigma_T + \Pi(\varepsilon_{\text{max}} - \varepsilon_T) - 6 \left(\frac{M}{bh^2} \right); \\ \sigma_{\text{ост}}^2 = \sigma_T - 12 \left(\frac{M}{bh^2} \right) \frac{\sigma_T \rho}{Eh},$$

где $\varepsilon_T = E/\sigma_T$.

Проведем расчет силовых параметров листогибочных трехвалковых вальцов. Пусть N_i , M_{pi} и $F_{pi} = M_{pi}/R_i$ – реакция опоры, вращательный момент (передаваемый от редуктора) и подающее усилие (сила подачи) i -го вальца ($i = 1, 2, 3$) соответственно.

Добавки к реакциям сил в точках касания листа с валками равны

$$\Delta N_2 = -N_1 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) + F_{n1} \sin(\varphi_1 - \varphi_2); \\ \Delta F_{n2} = N_1 \sin(\varphi_1 - \varphi_2) + F_{n1} \cos(\varphi_1 - \varphi_2).$$

Нормальные реакции валков в точках касания с листом равны

$$N_1 = \frac{M_2 - F_{n1}y_2}{z_2}; \\ N_2 = \frac{M_2 - \Delta N_2 z_3 - (F_{n2} + \Delta F_{n2})y_3}{z_3}; \\ N_3 = \frac{M_2 + F_{n3}[-z_3 \sin(\varphi_2 + \varphi_3) + y_3 \cos(\varphi_2 + \varphi_3)]}{z_3 \cos(\varphi_2 + \varphi_3) + y_3 \sin(\varphi_2 + \varphi_3)}.$$

Вертикальная сила давления верхнего второго вальца на стальной лист составляет

$$F_{\text{верх}} = N_2 \cos \varphi_2 + F_{n2} \sin \varphi_2,$$

а вертикальная сила давления нижних первого и третьего валков на стальной лист составляет

$$F_{\text{нижн}} = N_1 \cos \varphi_1 - F_{n1} \sin \varphi_1 + N_3 \cos \varphi_3 + F_{n3} \sin \varphi_3.$$

При решении системы уравнений при $t = 1,02$ м, $R_1 = 0,340$ м, $R_2 = 0,510$ м, $R_3 = 0,340$ м, $b = 1,8$ м, $h = 0,01$ м, $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па, $\sigma_T = 500 \cdot 10^6$ Па, $H_2 = 0,131$ м и $\rho_1 = 2$ м получаем: $\rho_2 = 0,631$ м; $\rho_3 = 1,216$ м; $\varphi_1 = 26,08^\circ$; $\varphi_2 = -1,95^\circ$; $\varphi_3 = 26,52^\circ$; $M_2 = 22,889$ кН·м; $N_1 = 60,510$ кН; $N_2 = 112,671$ кН; $N_3 = 66,146$ кН; $F_{\text{нижн}} \approx F_{\text{верх}} = 112,583$ кН (рис. 5, 6).

Выводы. Предложен аналитический метод определения реакций валков, изгибающих моментов и остаточных напряжений в стенке стального листа при холодной гибке на листогибочных трехвалковых вальцах. Результаты исследований могут быть использованы на

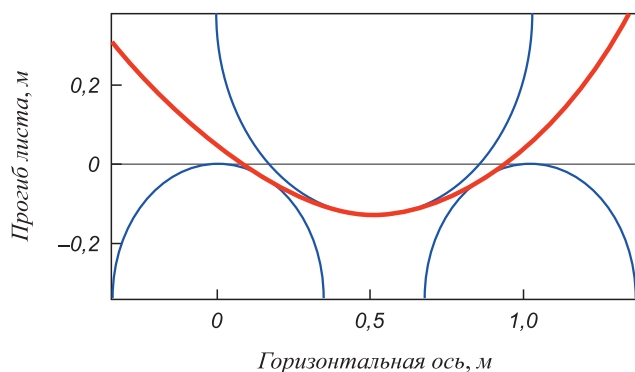


Рис. 5. Прогиб листа между тремя валками вальцов

Fig. 5. Deflection of the sheet between the three rollers of the rolls

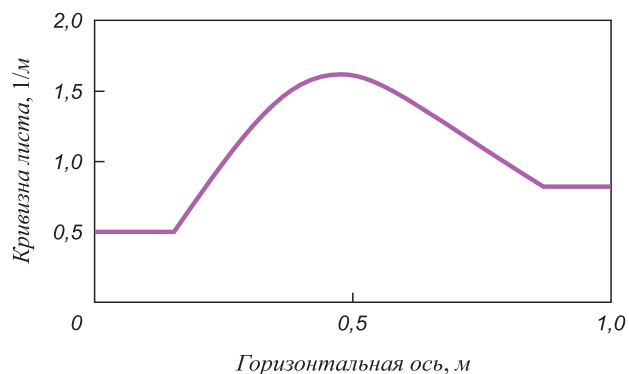


Рис. 6. Кривизна нейтральной линии листа при гибке на вальцах

Fig. 6. Curvature of the sheet's neutral line under bending at the rolls

металлургических заводах при производстве стальных труб большого и среднего диаметров для нефтегазовых магистральных трубопроводов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Banabic D. (Ed.). Multiscale modeling in sheet metal forming. – Heidelberg: Springer, 2016. – 405 p.
- Hingole R.S. Advances in metal forming. Expert system for metal forming. – Heidelberg: Springer, 2015. – 116 p.
- Davim J.P. (Ed.). Materials Forming and Machining. Research and Development. – Woodhead Publishing, 2015. – 202 p.
- Lenard J.G. (Ed.). Metal forming science and practice. – Oxford: Elsevier Science, 2002. – 378 p.
- Hu J., Marciniak Z., Duncan J. Mechanics of sheet metal forming. – Oxford – Boston: Butterworth-Heinemann, 2002. – 211 p.
- Calladine C.R. (Ed.). Plasticity for engineers. Theory and applications. – Woodhead Publishing, 2000. – 328 p.
- Belskiy S.M., Mazur I.P., Lezhnev S.N., Panin E.A. A two-zone model of broadening during rolling // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. 2017. Vol. 52. No. 2. P. 180 – 185.
- 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.
- 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.
- Muhin U., Koinov T., Belskiy S., Makarov E. Application of between-stand cooling in the production of hot-rolled strips // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. 2014. Vol. 49. No. 1. P. 65 – 70.
- Muhin U., Belskiy S., Koinov T. Study on the influence of the anti-bending force of working rolls on the widening in hot rolling of thin sheet // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. 2014. Vol. 49. No. 1. P. 77 – 81.
- Muhin U., Koinov T., Belskiy S., Makarov E. Simulation of accelerated strip cooling on the hot rolling mill run-out roller table // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. 2014. Vol. 49. No. 1. P. 60 – 64.
- Belskiy S.M., Mazur S.I., Mukhin Y.A., Goncharov A.I. Influence of the cross section of hot-rolled steel on the flatness of cold-rolled strip // Steel in Translation. 2013. Vol. 43. No. 5. P. 313 – 316.
- Belskiy S.M., Mukhin Y.A. Classification of regulation principles for strip flatness // Steel in Translation. 2009. Vol. 39. No. 11. P. 1012 – 1015.
- Belskiy S.M., Mukhin Y.A. Hot strip rolling with local thickening // Steel in Translation. 2009. Vol. 39. No. 5. P. 420 – 424.
- Belskiy S.M., Tret'yakov V.A., Baryshev V.V., Kudinov S.V. Investigation of slab width formation in roughing group of broad strip mill // Steel in Translation. 1998. Vol. 28. No. 1. P. 32 – 39.
- Коцарь С.Л., Третьяков В.А., Бельский С.М., Полякова Б.А., Савочкин А.Г. Экспериментальная проверка математических моделей прокатки с имитацией осевой сдвижки валков // Сталь. 1993. № 2. С. 53 – 55.
- Shinkin V.N., Kolikov A.P. Simulation of the shaping of blanks for large-diameter pipe // Steel in Translation. 2011. Vol. 41. No. 1. P. 61 – 66.
- Shinkin V.N., Kolikov A.P. Elastoplastic shaping of metal in an edge-bending press in the manufacture of large-diameter pipe // Steel in Translation. 2011. Vol. 41. No. 6. P. 528 – 531.
- Shinkin V.N., Kolikov A.P. Engineering calculations for processes involved in the production of large-diameter pipes by the SMS Meer technology // Metallurgist. 2012. Vol. 55. No. 11-12. P. 833 – 840.
- Shinkin V.N. The mathematical model of the thick steel sheet flattening on the twelve-roller sheet-straightening machine. Message 1. Curvature of sheet // CIS Iron and Steel Review. 2016. Vol. 12. P. 37 – 40.
- Shinkin V.N. The mathematical model of the thick steel sheet flattening on the twelve-roller sheet-straightening machine. Message 2. Forces and moments // CIS Iron and Steel Review. 2016. Vol. 12. P. 40 – 44.
- Shinkin V.N. Geometry of steel sheet in a seven-roller straightening machine // Steel in Translation. 2016. Vol. 46. No. 11. P. 776 – 780.
- Shinkin V.N. Preliminary straightening of thick steel sheet in a seven-roller machine // Steel in Translation. 2016. Vol. 46. No. 12. P. 836 – 840.
- Ilichev V.G., Zalavin Ya.E. Improving the roller shaping of large-diameter pipe from strip // Steel in Translation. 2016. Vol. 46. No. 1. P. 54 – 57.
- Yusupov V.S., Kolobov A.V., Akopyan K.E. etc. Improving the production of electrowelded straight-seam pipe. Part 2 // Steel in Translation. 2015. Vol. 45. No. 12. P. 975 – 977.
- Yusupov V.S., Kolobov A.V., Akopyan K.E. etc. Improving the production of electrowelded straight-seam pipe. Part 1 // Steel in Translation. 2015. Vol. 45. No. 8. P. 598 – 604.
- Klyukvin M.B., Ordin V.G., Matrosov Yu.I. etc. Change in X80 steel plate mechanical properties during pipe manufacture // Metallurgist. 2012. Vol. 56. No. 7-8. P. 591 – 596.
- 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.
- Manzhurin I.P., Sidorina E.A. Determination of the reduction in the thickness of strip during its shaping in the rolls of a roll-forming machine. Metallurgist // 2013. Vol. 56. No. 11-12. P. 941 – 945.
- Punin V.I., Kokhan L.S., Morozov Yu.A. Reduction of the length of strip rolled on roll-forming machines // Metallurgist. 2013. Vol. 56. No. 11-12. P. 938 – 940.

32. Barabash A.V., Gavril'chenko E.Yu., Gribkov E.P., Markov O.E. Straightening of sheet with correction of waviness // *Steel in Translation*. 2014. Vol. 44. No. 12. P. 916 – 920.
33. Komkov N.A., Livanova O.V., Nikulin A.N., Filippov G.A. Manufacture of plane axisymmetric blanks by end rolling from round bar or thick-walled pipe // *Steel in Translation*. 2012. Vol. 42. No. 1. P. 73 – 77.
34. Mentyukov K.Yu., Bortsov A.N., Shabalov I.P., Mansyrev E.I. Study of the properties of the base metal of large-diameter pipes

- under alternating loading // *Metallurgist*. 2016. Vol. 60. No. 3-4. P. 397 – 404.
35. Shabalov I.P., Nastich S.Yu., Velikodnev V.Ya. etc. Effect of heating and deformation on properties of highly deformable pipe metal during cold bend manufacture // *Metallurgist*. 2017. Vol. 60. No. 9-10. P. 1070 – 1079.

Поступила 27 марта 2017 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2017. VOL. 60. No. 4, pp. 285–291.

CALCULATION OF PARAMETERS OF THE ASYMMETRICAL THREE-ROLLER SHEET-BENDING ROLLS IN STEEL PIPES PRODUCTION

V.N. Shinkin

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

Abstract. To produce articles of various configuration from the metal sheet, a variety of devices are used. One of them is the sheet-bending rolls, which can be classified according to several characteristics: number of rollers (two-, three- and four-rollers), type of the drive (mechanical, pneumatic, electromechanical and hydraulic) and by mutual arrangement of the rollers (symmetrical and asymmetrical). The three-roller sheet-bending rolls are used for the manufacturing of cylindrical, oval and conical shapes by bending of sheet's metal. Using them, we produce pipes, gutters, air condition lines, shells, barrels and all kinds of covers. The working principle of the three-roller sheet-bending rolls is based on the oppositely directed rotation of the rollers, whereby the grip of the sheet material and bending by a given radius are taken place. To facilitate the sheet feeding and the extraction of products, bent into a closed circle, the three-roller sheet-bending rolls are equipped with the removable and adjustable to clamp front shaft. In the three-roller mill the upper roller's diameter is about 1.5 times larger than the lower rollers' diameter. In the process of forming, the rollers are making the reverse movement during which the upper roller may be raised and lowered to adjust the diameter of the moldable workpiece. In this shaping method the extreme small parts of the sheet remain flat. This defect is eliminated by the bending of billet's ends at the press or at the rolling mill. In this paper the mathematical method for determining the forces and bending moments at the cold bending of thick steel sheet on the three-roller sheet-bending rolls is proposed. The calculations allow us to determine the support reaction of rollers, residual stresses in the wall of the steel sheet, the proportion of plastic deformation on the sheet thickness and relative deformation of the longitudinal surface fibers of the sheet under bending depending on the rollers' radius, pitches between the rollers, magnitude of the sheet reduction by the upper roller, the sheet thickness, as well as the elastic modulus, the yield stress and the hardening modulus of sheet's steel. The research results can be used at the metallurgical and machine works in production of steel large-diameter pipes for main pipelines.

Keywords: steel sheet, three-roller sheet-bending rolls, curvature of sheet's surface, springback coefficient, elastoplastic continuous medium with linear hardening.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-4-285-291

REFERENCES

1. *Multiscale modeling in sheet metal forming*. Banabic D. ed. Heidelberg: Springer, 2016, 405 p.
2. Hingole R.S. *Advances in metal forming. Expert system for metal forming*. Heidelberg: Springer, 2015, 116 p.
3. *Materials forming and machining. Research and development*. Davim J.P. ed. Woodhead Publishing, 2015, 202 p.
4. *Metal forming science and practice*. Lenard J.G. ed. Oxford: Elsevier Science, 2002, 378 p.
5. Hu J., Marciniak Z., Duncan J. *Mechanics of sheet metal forming*. Oxford – Boston: Butterworth-Heinemann, 2002, 211 p.
6. *Plasticity for engineers. Theory and applications*. Calladine C.R. ed. Woodhead Publishing, 2000, 328 p.
7. Belskiy S.M., Mazur I.P., Lezhnev S.N., Panin E.A. A two-zone model of browdening during rolling. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2017, vol. 52, no. 2, pp. 180–185.
8. 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.
9. 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.
10. Muhin U., Koinov T., Belskij S., Makarov E. Application of between-stand cooling in the production of hot-rolled strips. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2014, vol. 49, no. 1, pp. 65–70.
11. Muhin U., Belskij S., Koinov T. Study on the influence of the anti-bending force of working rolls on the widening in hot rolling of thin sheet. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2014, vol. 49, no. 1, pp. 77–81.
12. Muhin U., Koinov T., Belskij S., Makarov E., Simulation of accelerated strip cooling on the hot rolling mill run-out roller table. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2014, vol. 49, no. 1, pp. 60–64.
13. Bel'skii S.M., Mazur S.I., Mukhin Y.A., Goncharov A.I. Influence of the cross section of hot-rolled steel on the flatness of cold-rolled strip. *Steel in Translation*. 2013, vol. 43, no. 5, pp. 313–316.
14. Bel'skii S.M., Mukhin Y.A. Classification of regulation principles for strip flatness. *Steel in Translation*. 2009, vol. 39, no. 11, pp. 1012–1015.
15. Bel'skii S.M., Mukhin Y.A. Hot strip rolling with local thickening. *Steel in Translation*. 2009, vol. 39, no. 5, pp. 420–424.
16. Bel'skii S.M., Tret'yakov V.A., Baryshev V.V., Kudinov S.V. Investigation of slab width formation in roughing group of broad strip mill. *Steel in Translation*. 1998, vol. 28, no. 1, pp. 32–39.
17. Kotsar' S.L., Tret'yakov V.A., Bel'skij S.M., Polyakova B.A., Savochkin A.G. Experimental verification of mathematical models of rolling with axial roll shift simulation. *Stal'*. 1993, no. 2, pp. 53–55. (In Russ.).
18. Shinkin V.N., Kolikov A.P. Simulation of the shaping of blanks for large-diameter pipe. *Steel in Translation*. 2011, vol. 41, no. 1, pp. 61–66.
19. Shinkin V.N., Kolikov A.P. Elastoplastic shaping of metal in an edge-bending press in the manufacture of large-diameter pipe. *Steel in Translation*. 2011, vol. 41, no. 6, pp. 528–531.
20. Shinkin V.N., Kolikov A.P. Engineering calculations for processes involved in the production of large-diameter pipes by the SMS Meer technology. *Metallurgist*. 2012, vol. 55, no. 11-12, pp. 833–840.

21. Shinkin V.N. The mathematical model of the thick steel sheet flattening on the twelve-roller sheet-straightening machine. Massage 1. Curvature of sheet. *CIS Iron and Steel Review*. 2016, vol. 12, pp. 37–40.
22. Shinkin V.N. The mathematical model of the thick steel sheet flattening on the twelve-roller sheet-straightening machine. Massage 2. Forces and moments. *CIS Iron and Steel Review*. 2016, vol. 12, pp. 40–44.
23. Shinkin V.N. Geometry of steel sheet in a seven-roller straightening machine. *Steel in Translation*. 2016, vol. 46, no. 11. pp. 776–780.
24. Shinkin V.N. Preliminary straightening of thick steel sheet in a seven-roller machine. *Steel in Translation*. 2016, vol. 46, no. 12, pp. 836–840.
25. Il'ichev V.G., Zalavin Ya.E. Improving the roller shaping of large-diameter pipe from strip. *Steel in Translation*. 2016, vol. 46, no. 1, pp. 54–57.
26. Yusupov V.S., Kolobov A.V., Akopyan K.E., Seleznev M.S., Sominin M. A. Improving the production of electrowelded straight-seam pipe. Part 2. *Steel in Translation*. 2015, vol. 45, no. 12, pp. 975–977.
27. Yusupov V.S., Kolobov A.V., Akopyan K.E., Seleznev M.S., Sominin M. A. Improving the production of electrowelded straight-seam pipe. Part 1. *Steel in Translation*. 2015, vol. 45, no. 8, pp. 598–604.
28. Klyukvin M.B., Ordin V.G., Matrosov Yu.I., Loskutov A. Yu., Zinchenko Yu.A., Kolyasnikova N.V., Levchenko V.I., Sagirov R.I., Kononov G.N. Change in X80 steel plate mechanical properties during pipe manufacture. *Metallurgist*. 2012, vol. 56, no. 7-8, pp. 591–596.
29. 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.
30. Manzhurin I.P., Sidorina E.A. Determination of the reduction in the thickness of strip during its shaping in the rolls of a roll-forming machine. *Metallurgist*. 2013, vol. 56, no. 11-12, pp. 941–945.
31. Punin V.I., Kokhan L.S., Morozov Yu.A. Reduction of the length of strip rolled on roll-forming machines. *Metallurgist*. 2013, vol. 56, no. 11-12, pp. 938–940.
32. Barabash A.V., Gavril'chenko E.Yu., Gribkov E.P., Markov O.E. Straightening of sheet with correction of waviness. *Steel in Translation*. 2014, vol. 44, no. 12, pp. 916–920.
33. Komkov N.A., Livanova O.V., Nikulin A.N., Filippov G.A. Manufacture of plane axisymmetric blanks by end rolling from round bar or thick-walled pipe. *Steel in Translation*. 2012, vol. 42, no. 1, pp. 73–77.
34. Mentyukov K.Yu., Bortsov A.N., Shabalov I.P., Mansyrev E.I. Study of the properties of the base metal of large-diameter pipes under alternating loading. *Metallurgist*. 2016, vol. 60, no. 3-4, pp. 397–404.
35. Shabalov I.P., Nastich S.Yu., Velikodnev V.Ya., Kalenskii V.S., Chegurov S.A., Bubnov M.A., Il'inskii V.I., Puiko A.V., Mezentssev P.S. Effect of heating and deformation on properties of highly deformable pipe metal during cold bend manufacture. *Metallurgist*. 2017, vol. 60, no. 9-10, pp. 1070–1079.

Information about the author:

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

Received March 27, 2017