

## РАСЧЕТ СИЛ И МОМЕНТОВ СЕМИРОЛИКОВОЙ ПРАВИЛЬНОЙ МАШИНЫ ПРИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ПРАВКЕ СТАЛЬНОГО ЛИСТА

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

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

**Аннотация.** Предложен математический метод определения сил и моментов при предварительной холодной правке толстого стального листа на семироликовой листопрямляющей машине. Расчеты позволяют определить реакции опор рабочих роликов, остаточные напряжения в стенке стального листа, долю пластической деформации по толщине листа и относительную деформацию продольных поверхностных волокон листа при правке в зависимости от радиуса рабочих роликов, шага между роликами листопрямляющей машины, величины обжатия листа верхними роликами, толщины листа, а также модуля Юнга, предела текучести и модуля упрочнения металла листа. Результаты исследований могут быть использованы на металлургических и машиностроительных заводах.

**Ключевые слова:** стальной лист, многороликовые листопрямляющие машины, упругопластическая среда с линейным упрочнением.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2016-12-870-874

Прокатные станы и многороликовые правильные машины широко используются при производстве стального листа в российской и зарубежной металлургической промышленности [1 – 16].

Ранее была предложена методика определения геометрической формы и кривизны  $\epsilon$  (радиуса кривизны  $\rho$ ) стального листа при правке на семироликовой правильной машине. Поэтому далее будем считать, что при правке листа его кривизна, радиус кривизны, углы и координаты точек касания листа с роликами уже известны.

В настоящей работе подробно рассмотрим метод определения изгибающих моментов и остаточных напряжений, а также реакций опор рабочих роликов в семироликовой правильной машине.

Вычисление энергосиловых параметров многороликовых листопрямляющих машин является важным технологическим расчетом при правке стального листа. В основу энергосилового расчета входит вычисление изгибающих моментов стального листа при правке и суммарной реакции опор рабочих роликов (усилий верхней и нижней кассет роликов) правильной машины.

При недостаточном изгибающем моменте стального листа невозможно устранить вредные остаточные напряжения в его стенке и поверхностные дефекты. Если недостаточно усилие верхней кассеты роликов, то невозможно достигнуть требуемого обжатия листа для качественной правки.

Чрезмерные значения крутящих моментов роликов и усилий кассет роликов часто приводят к дефектам листа, поломке рабочих и опорных роликов и поломке всей листопрямляющей машины.

Отметим, что оценка силовых параметров при различных методах изгиба и формовки листа в металлургии рассматривалась в работах [10 – 16].

**Изгибающие моменты при правке стального листа.** Пусть  $H_i$  ( $i = 1, \dots, 7$ ) – обжатия листа рабочими роликами. Не ограничивая общности, далее будем считать, что нижние четыре рабочих ролика неподвижны ( $H_1 = H_3 = H_5 = H_7 = 0$  мм), а верхние три рабочих ролика имеют независимые вертикальные перемещения.

Пусть  $\Pi_p$  и  $\Pi_c$  – модули упрочнения стали при растяжении и сжатии;  $E$  и  $\sigma_t$  – модуль Юнга и предел текучести;  $R$  – радиус рабочих роликов;  $\phi_i$  – углы точек касания роликов и стального листа ( $i = 1, \dots, 7$ );  $t$  – шаг рабочих роликов;  $R_0 = R + h/2$ ;  $\epsilon_i = 1/\rho_i$  и  $\rho_i$  – кривизна листа в точках касания с роликами и радиусы кривизны;  $h$  – толщина листа.

При упругом изгибе ( $\rho \geq \rho_t = hE/(2\sigma_t)$ ) коэффициент пружинения стального листа будет  $\beta(\rho) = \infty$ . При пластическом изгибе ( $\rho < \rho_t = hE/(2\sigma_t)$ ) коэффициент пружинения стального листа определяется из соотношения

$$\beta(\rho) = \frac{1}{\left(1 - \frac{\Pi_p + \Pi_c}{2E}\right) \left(1 - 2 \frac{\rho \sigma_t}{hE}\right)^2 \left(1 + \frac{\rho \sigma_t}{hE}\right)}.$$

При пластическом изгибе стального листа изгибающий момент равен [10 – 12]

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

где  $b$  – ширина листа.

Для высокопрочных сталей модули упрочнения при растяжении и сжатии практически равны друг другу:  $\Pi_c \approx \Pi_p = \Pi$ .

При упругом изгибе стального листа изгибающий момент равен

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

Пусть  $M_i$  – изгибающие моменты стального листа в точках касания рабочих роликов с листом:

$$M_1 = 0, M_2 = M(\rho_2), M_3 = -M(\rho_3), M_4 = M(\rho_4), \\ M_5 = -M(\rho_5), M_6 = M(\rho_6), M_7 = 0.$$

Изгибающие моменты листа в точках касания листа с роликами при  $E = 2 \cdot 10^{11}$  Па,  $R = 125$  мм,  $\sigma_T = 5 \cdot 10^8$  Па,  $h = 10$  мм,  $t = 270$  мм,  $\rho_1 = -1$  м,  $H_2 = 12$  мм,  $H_4 = 6$  мм и  $H_6 = 1$  мм показаны на рис. 1.

Экстремальные остаточные напряжения составят

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

где  $\varepsilon_T = E/\sigma_T$ .

Расстояние от нейтральной линии до зоны пластичности (граница между упругой и пластической зонами) в поперечном сечении листа равно  $y_T = \sigma_T\rho/E$ .

**Доля пластической деформации по толщине листа при правке.** Доля пластической деформации по толщине листа равна

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

Относительная деформация продольных поверхностных волокон листа определится как

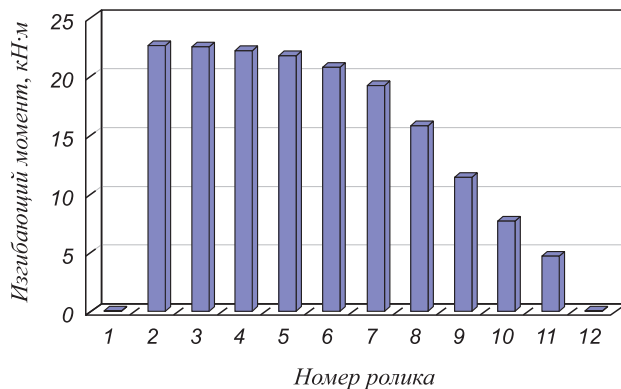


Рис. 1. Изгибающие моменты листа в точках контакта с роликами

Fig. 1. Bending moments of the sheet at contact points with rollers

$$\eta_{прв} = \frac{h}{2|\rho|}.$$

Численные расчеты доли пластической деформации по толщине листа и относительной деформации продольных поверхностных волокон листа в семироликовой листопрямительной машине при  $E = 2 \cdot 10^{11}$  Па,  $R = 0,125$  м,  $\sigma_T = 5 \cdot 10^8$  Па,  $h = 10$  мм,  $t = 270$  мм,  $\rho_1 = -1$  м,  $H_2 = 12$  мм,  $H_4 = 6$  мм и  $H_6 = 1$  мм показаны на рис. 2, а, б.

**Вычисление силовых параметров семироликовой правильной машины.** Пусть  $N_i$ ,  $M_{pi}$  и  $F_{pi}$  ( $F_{pi} = M_{pi}/R$ ) – соответственно реакция опоры, вращательный момент (передаваемый от редуктора) и подающее усилие  $i$ -го ролика ( $i = 1, \dots, 7$ ) (рис. 3).

Построим семь систем координат  $y-z$  в точках касания листа с роликами. Оси  $y$  направим по радиусу роликов к их центру, а оси  $z$  – по касательной к поверхности роликов слева направо.

Пусть  $y_{ji}$  и  $z_{ji}$  – координаты точек касания листа с  $j$ -ым роликом в  $i$ -ой системе координат, а  $\Delta y_{(i+1)i}$  и  $\Delta z_{(i+1)i}$  – расстояния по вертикали и горизонтали между соседними точками касания листа с роликами.

Тогда введенные вспомогательные расстояния составят:

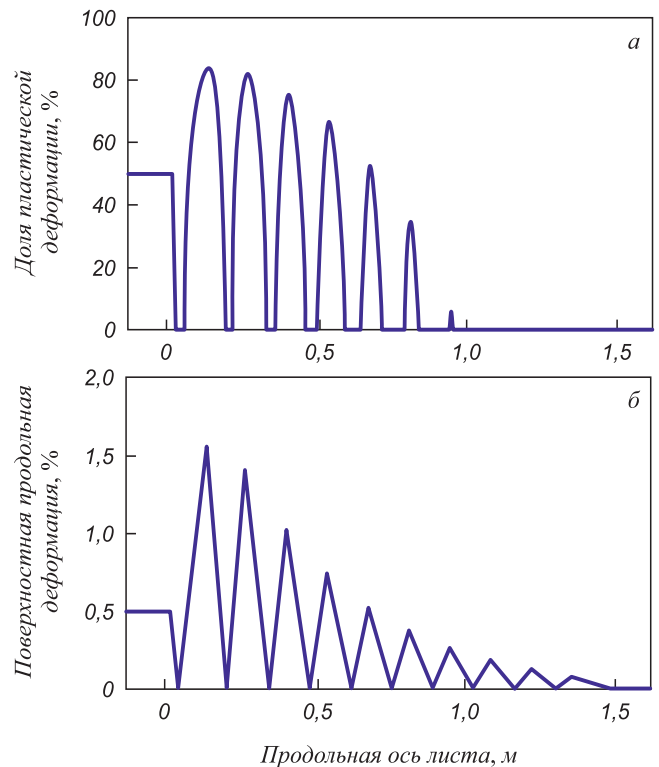


Рис. 2. Доля пластической деформации по толщине листа (а) и относительная деформация продольных поверхностных волокон листа (б)

Fig. 2. The proportion of plastic deformation on the sheet thickness (a) and the relative deformation of longitudinal surface fibers of the sheet (b)

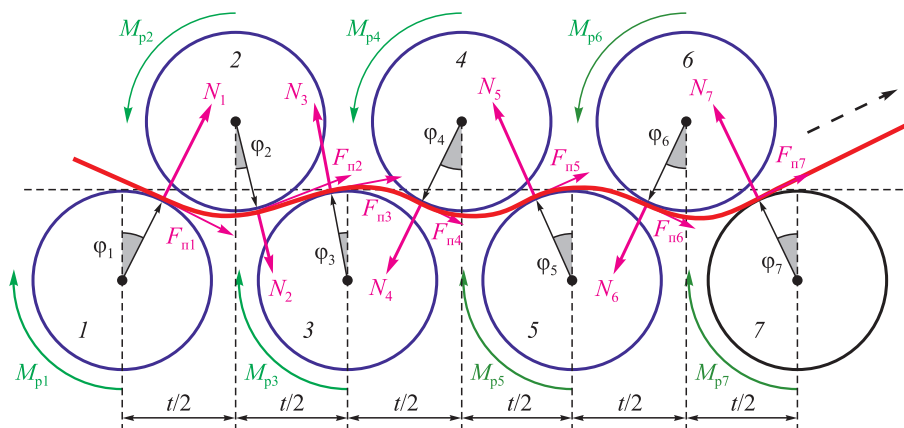


Рис. 3. Силы и моменты, действующие на стальной лист

Fig. 3. Forces and moments acting on the steel sheet

$$\Delta z_{21} = \frac{t}{2} - R_0 \sin \varphi_1 + R_0 \sin \varphi_2,$$

$$\Delta y_{21} = H_2 - R_0 (1 - \cos \varphi_1) - R_0 (1 - \cos \varphi_2),$$

$$z_{21} = \Delta z_{21} \cos \varphi_1 + \Delta y_{21} \sin \varphi_1,$$

$$y_{21} = -\Delta z_{21} \sin \varphi_1 + \Delta y_{21} \cos \varphi_1;$$

$$\Delta z_{32} = \frac{t}{2} - R_0 \sin \varphi_2 - R_0 \sin \varphi_3,$$

$$\Delta y_{32} = H_2 - R_0 (1 - \cos \varphi_2) - R_0 (1 - \cos \varphi_3),$$

$$z_{32} = \Delta z_{32} \cos \varphi_2 + \Delta y_{32} \sin \varphi_2,$$

$$y_{32} = -\Delta z_{32} \sin \varphi_2 + \Delta y_{32} \cos \varphi_2;$$

$$\Delta z_{43} = \frac{t}{2} + R_0 \sin \varphi_3 - R_0 \sin \varphi_4,$$

$$\Delta y_{43} = H_4 - R_0 (1 - \cos \varphi_3) - R_0 (1 - \cos \varphi_4),$$

$$z_{43} = \Delta z_{43} \cos \varphi_3 - \Delta y_{43} \sin \varphi_3,$$

$$y_{43} = \Delta z_{43} \sin \varphi_3 + \Delta y_{43} \cos \varphi_3;$$

$$\Delta z_{54} = \frac{t}{2} + R_0 \sin \varphi_4 - R_0 \sin \varphi_5,$$

$$\Delta y_{54} = H_4 - R_0 (1 - \cos \varphi_4) - R_0 (1 - \cos \varphi_5),$$

$$z_{54} = \Delta z_{54} \cos \varphi_4 - \Delta y_{54} \sin \varphi_4,$$

$$y_{54} = \Delta z_{54} \sin \varphi_4 + \Delta y_{54} \cos \varphi_4;$$

$$\Delta z_{65} = \frac{t}{2} + R_0 \sin \varphi_5 - R_0 \sin \varphi_6,$$

$$\Delta y_{65} = H_6 - R_0 (1 - \cos \varphi_5) - R_0 (1 - \cos \varphi_6),$$

$$z_{65} = \Delta z_{65} \cos \varphi_5 - \Delta y_{65} \sin \varphi_5,$$

$$y_{65} = \Delta z_{65} \sin \varphi_5 + \Delta y_{65} \cos \varphi_5;$$

$$\Delta z_{76} = \frac{t}{2} + R_0 \sin \varphi_6 - R_0 \sin \varphi_7,$$

$$\Delta y_{76} = H_6 - R_0 (1 - \cos \varphi_6) - R_0 (1 - \cos \varphi_7),$$

$$z_{76} = \Delta z_{65} \cos \varphi_6 - \Delta y_{76} \sin \varphi_6,$$

$$y_{76} = \Delta z_{65} \sin \varphi_6 + \Delta y_{76} \cos \varphi_6.$$

Проекции главных векторов сил в точках касания листа с роликами определяются как

$$F_{01y} = N_1 \cos \varphi_1 - F_{n1} \sin \varphi_1,$$

$$F_{01z} = N_1 \sin \varphi_1 - F_{n1} \cos \varphi_1;$$

$$F_{02y} = F_{01y} - N_2 \cos \varphi_2 + F_{n2} \sin \varphi_2,$$

$$F_{02z} = F_{01z} + N_2 \sin \varphi_2 + F_{n2} \cos \varphi_2;$$

$$F_{03y} = F_{02y} + N_3 \cos \varphi_3 + F_{n3} \sin \varphi_3,$$

$$F_{03z} = F_{02z} - N_3 \sin \varphi_3 + F_{n3} \cos \varphi_3;$$

$$F_{04y} = F_{03y} - N_4 \cos \varphi_4 - F_{n4} \sin \varphi_4,$$

$$F_{04z} = F_{03z} - N_4 \sin \varphi_4 + F_{n4} \cos \varphi_4;$$

$$F_{05y} = F_{04y} + N_5 \cos \varphi_5 + F_{n5} \sin \varphi_5,$$

$$F_{05z} = F_{04z} - N_5 \sin \varphi_5 + F_{n5} \cos \varphi_5.$$

Добавки к реакциям сил в точках касания листа с роликами составят

$$\Delta N_2 = -F_{01y} \cos \varphi_2 + F_{01z} \sin \varphi_2,$$

$$\Delta F_{n2} = F_{01y} \sin \varphi_2 + F_{01z} \cos \varphi_2;$$

$$\Delta N_3 = F_{02y} \cos \varphi_3 - F_{02z} \sin \varphi_3,$$

$$\Delta F_{n3} = F_{02y} \sin \varphi_3 + F_{02z} \cos \varphi_3;$$

$$\Delta N_4 = -F_{03y} \cos \varphi_4 - F_{03z} \sin \varphi_4,$$

$$\Delta F_{n4} = -F_{03y} \sin \varphi_4 + F_{03z} \cos \varphi_4;$$

$$\Delta N_5 = F_{04y} \cos \varphi_5 - F_{04z} \sin \varphi_5,$$

$$\Delta F_{n5} = F_{04y} \sin \varphi_5 + F_{04z} \cos \varphi_5;$$

$$\Delta N_6 = -F_{05y} \cos \varphi_6 - F_{05z} \sin \varphi_6,$$

$$\Delta F_{n6} = -F_{05y} \sin \varphi_6 + F_{05z} \cos \varphi_6.$$

Нормальные реакции рабочих роликов в точках касания с листом описываются уравнениями

$$N_1 = \frac{M_2 - F_{п1}y_{21}}{z_{21}};$$

$$N_2 = \frac{-M_3 + M_2 - F_{п2}y_{32} - \Delta N_2 z_{32} - \Delta F_{п2}y_{32}}{z_{32}};$$

$$N_3 = \frac{M_4 - M_3 - F_{п3}y_{43} - \Delta N_3 z_{43} - \Delta F_{п3}y_{43}}{z_{43}};$$

$$N_4 = \frac{-M_5 + M_4 - F_{п4}y_{54} - \Delta N_4 z_{54} - \Delta F_{п4}y_{54}}{z_{54}};$$

$$N_5 = \frac{M_6 - M_5 - F_{п5}y_{65} - \Delta N_5 z_{65} - \Delta F_{п5}y_{65}}{z_{65}};$$

$$N_6 = \frac{M_6 - F_{п6}y_{76} - \Delta N_6 z_{76} - \Delta F_{п6}y_{76}}{z_{76}};$$

$$N_7 = \frac{M_6 - F_{п7} [z_{76} \sin(\varphi_6 + \varphi_7) - y_{76} \cos(\varphi_6 + \varphi_7)]}{z_{76} \cos(\varphi_6 + \varphi_7) + y_{76} \sin(\varphi_6 + \varphi_7)}.$$

Нормальные реакции рабочих роликов семироликовой правильной машины при  $E = 2 \cdot 10^{11}$  Па,  $R = 125$  мм,  $\sigma_T = 5 \cdot 10^8$  Па,  $h = 10$  мм,  $t = 270$  мм,  $\rho_1 = -1$  м,  $H_2 = 12$  мм,  $H_4 = 6$  мм и  $H_6 = 1$  мм показаны на рис. 4.

Вертикальная сила давления верхней кассеты роликов (сила верхней кассеты роликов) на стальной лист рассчитывается как

$$F_{\text{верх}} = N_2 \cos \varphi_2 - F_{п2} \sin \varphi_2 + N_4 \cos \varphi_4 - F_{п4} \sin \varphi_4 + N_6 \cos \varphi_6 - F_{п6} \sin \varphi_6.$$

Вертикальная сила давления листа на нижнюю кассету роликов равна

$$F_{\text{нижн}} = N_1 \cos \varphi_1 - F_{п1} \sin \varphi_1 + N_3 \cos \varphi_3 - F_{п3} \sin \varphi_3 + N_5 \cos \varphi_5 - F_{п5} \sin \varphi_5 + N_7 \cos \varphi_7 - F_{п7} \sin \varphi_7.$$

Сила давления верхней кассеты роликов на стальной лист при правке на семироликовой машине при  $E = 2 \cdot 10^{11}$  Па,  $R = 125$  мм,  $\sigma_T = 5 \cdot 10^8$  Па,  $h = 10$  мм,  $t = 270$  мм,  $\rho_1 = -1$  м,  $H_2 = 12$  мм,  $H_4 = 6$  мм и  $H_6 = 1$  мм составит  $F_{\text{верх}} = F_{\text{нижн}} = 1636,86$  кН = 166,856 т.

**Правка неплоскостности листа путем деформации осей рабочих роликов.** Основной причиной волнистости и коробления листа является его неравномерное обжатие по ширине при горячей прокатке из-за неодинакового размера щели между прокатными роликами. Неравномерное обжатие влечет за собой разную по величине вытяжку отдельных участков листа – более обжатые участки получают большую вытяжку по длине листа, чем менее обжатые. Взаимодействие различно вытянутых продольных участков листа вызывает боль-

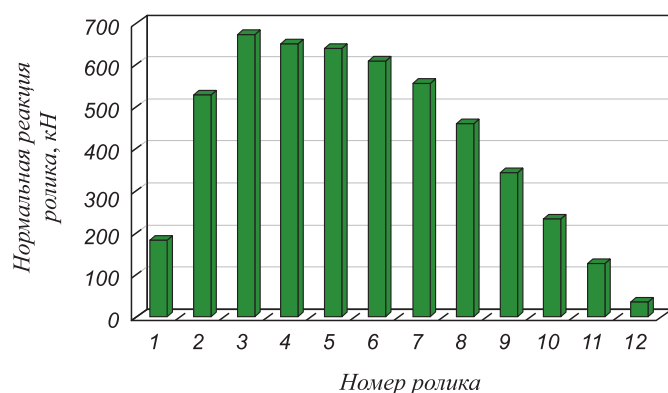


Рис. 4. Нормальные реакции рабочих роликов

Fig. 4. Normal reactions of the working rollers

шие внутренние остаточные напряжения сжатия в более вытянутых участках и напряжения растяжения в менее вытянутых. Эти остаточные напряжения вызывают потерю устойчивости плоской формы листа и образование местной волнистости и коробоватости его поверхности.

Волнистость и коробоватость листов могут быть выправлены только путем выравнивания продольной длины различно обжатых участков листа. Для коррекции местных дефектов листа задается искривление осей нижних рабочих роликов листопрямительной машины с помощью индивидуального перемещения нижних опорных роликов, опирающихся на пять подвижных упоров, что вызывает неравномерный по ширине прогиб листа при правке.

Большому прогибу подвергаются менее вытянутые участки листа. Для каждого вида распределения волнистости и коробоватости по ширине листа требуется специальная настройка машины – выгиб оси рабочих роликов на соответствующих участках.

**Выводы.** Предложен аналитический метод определения реакций опор рабочих роликов, изгибающих моментов и остаточных напряжений в стенке стального листа при холодной правке на семироликовой листопрямительной машине. Результаты исследований могут быть широко использованы на металлургических заводах при производстве толстого стального листа, а также стальных труб большого и среднего диаметров для нефтегазовых магистральных трубопроводов [1 – 16].

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Mazur I.P., Dolmatov A.P., Borisov S.S. Investigation and numerical modeling of the process of cold rolling HSLA steels // Materials Science Forum. 2012. Vol. 704 – 705, pp. 832 – 841.
2. Astakhov A.A., Dunaev D.N., Mazur I.P. Machining profiling of the working rolls as a way to control cross-section of the rolled steel // Materials Science Forum. 2013. Vol. 762, pp. 337 – 342.
3. Mazur I.P. Monitoring the surface quality in sheet rolling // Steel in Translation. 2011. Vol. 41. No. 4, pp. 326 – 331.
4. Mazur I., Koinov T. Quality control system for a hot-rolled metal surface // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. 2014. Vol. 49. No. 1, pp. 71 – 76.

5. 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.
6. 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.
7. Mukhin Yu.A., Solov'ev V.N., Bobkov E.B. Formation of the structure of metal in the finishing group of stands of the hot-rolling mill // *Steel in Translation*. 2001. Vol. 31. No. 3, pp. 77 – 80.
8. Mukhin Yu.A., Belyanskij A.D., Zajtsev V.S., Tret'yakov A.I., Baryshev V.G. Production of hot rolled strip with guaranteed mechanical properties // *Steel in Translation*. 1992. No. 12, pp. 61 – 63.
9. Mukhin Yu.A., Belyanskij A.D., Kolpakov S.S., Nikitin V.E., Mel'nikov A.V. Improvement of hot strip rolling conditions to reduce rolled-in scale // *Steel in Translation*. 1993. No. 7, pp. 41 – 43.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. Zdor V.A., Brovman M.Ya. Casting-rolling unit with cambered rolls // *Russian metallurgy (Metally)*. 2012. Vol. 2012. No. 9, pp. 757 – 762.
14. Brovman M.Ya. Stress state of cylindrical pipe with variable mechanical properties // *Russian engineering research*. 2011. Vol. 31. No. 8, pp. 737 – 741.
15. Brovman M.Ya. Bending deformation of rotating metallic tubes // *Russian metallurgy (Metally)*. 2010. Vol. 2010. No. 9, pp. 779 – 789.
16. Brovman T.V. Design of welded double layer pipelines // *Welding international*. 2012. Vol. 26. No. 7, pp. 553 – 554.

Поступила 17 октября 2016 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. Vol. 59. No. 12, pp. 870–874.

## CALCULATION OF STEEL SHEET'S CURVATURE UNDER PRELIMINARY FLATTENING ON THE SEVEN-ROLLER STRAIGHTENING MACHINE

**V.N. Shinkin**

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

**Abstract.** The mathematical method is proposed for determining the forces and bending moments at preliminary cold flattening of the thick steel sheet on the seven-roller sheet-straightening machine. The calculations allow us to determine the support reaction of working rollers, residual stresses in the wall of steel sheet, the proportion of plastic deformation on the sheet thickness and the relative deformation of the longitudinal surface fibers of the sheet under straightening depending on the rollers' radius. It is also possible to establish the pitch between the straightening machines' working rollers, the magnitude of sheet reduction by the upper rollers, the sheet thickness, as well as elastic modulus, yield stress and hardening modulus of the sheet metal. The results of the research can be used at metallurgical plants.

**Keywords:** steel sheet, sheet-straightening machines, curvature of sheet, springback coefficient, elastoplastic continuous medium.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2016-12-870-874

### REFERENCES

1. Mazur I.P., Dolmatov A.P., Borisov S.S. Investigation and numerical modeling of the process of cold rolling HSLA steels. *Materials Science Forum*. 2012, vol. 704-705, pp. 832–841.
2. Astakhov A.A., Dunaev D.N., Mazur I.P. Machining profiling of the working rolls as a way to control cross-section of the rolled steel. *Materials Science Forum*. 2013, vol. 762, pp. 337–342.
3. Mazur I.P. Monitoring the surface quality in sheet rolling. *Steel in Translation*. 2011, vol. 41, no. 4, pp. 326–331.
4. Mazur I., Koinov T. Quality control system for a hot-rolled metal surface. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2014, vol. 49, no. 1, pp. 71–76.
5. 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.
6. 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.
7. Mukhin Yu.A., Solov'ev V.N., Bobkov E.B. Formation of the structure of metal in the finishing group of stands of the hot-rolling mill. *Steel in Translation*. 2001, vol. 31, no. 3, pp. 77–80.
8. Mukhin Yu.A., Belyanskij A.D., Zajtsev V.S., Tret'yakov A.I., Baryshev V.G. Production of hot rolled strip with guaranteed mechanical properties. *Steel in Translation*. 1992, no. 12, pp. 61–63.
9. Mukhin Yu.A., Belyanskij A.D., Kolpakov S.S., Nikitin V.E., Mel'nikov A.V. Improvement of hot strip rolling conditions to reduce rolled-in scale. *Steel in Translation*. 1993, no. 7, pp. 41–43.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. Zdor V.A., Brovman M.Ya. Casting-rolling unit with cambered rolls. *Russian metallurgy (Metally)*. 2012, vol. 2012, no. 9, pp. 757–762.
14. Brovman M.Ya. Stress state of cylindrical pipe with variable mechanical properties. *Russian engineering research*. 2011, vol. 31, no. 8, pp. 737–741.
15. Brovman M.Ya. Bending deformation of rotating metallic tubes. *Russian metallurgy (Metally)*. 2010, vol. 2010, no. 9, pp. 779–789.
16. Brovman T.V. Design of welded double layer pipelines. *Welding International*. 2012, vol. 26, no. 7, pp. 553–554.

### Information about the author:

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

Received October 17, 2016