

УДК 621.771.23:621.982:669.14-415

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА ГЕОМЕТРИИ СТАЛЬНОГО ЛИСТА ПРИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ПРАВКЕ НА СЕМИРОЛИКОВОЙ ПРАВИЛЬНОЙ МАШИНЕ

*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.** Предложен математический метод определения оптимальных технологических параметров предварительной холодной правки стального листа на семироликовой листопрямительной машине. Расчеты позволяют определить вид и кривизну нейтральной плоскости стального листа при и после правки в зависимости от радиуса рабочих роликов, шага между роликами листопрямительной 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 заводах при производстве широкого листа и толстостенных труб для магистральных трубопроводов.

**Ключевые слова:** стальной лист, листопрямительные машины, кривизна листа, коэффициент пружинения, упругопластическая непрерывная среда.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-11-793-798

После горячей прокатки [1 – 16] стальные листы деформируются при охлаждении из-за остаточных напряжений и часто имеют поверхностные дефекты в холодном состоянии (например, коробоватость, волнистость, серповидность и т. д.). Поэтому стальные листы правят в многороликовых листопрямительных машинах до изготовления металлических изделий, в том числе труб [3 – 7]. Классификация дефектов формы стального листа, ленты и рулона приведена в ГОСТ 21014-88.

Процесс правки листа в многороликовых правильных машинах является обязательной (необходимой) операцией технологических процессов в металлургическом и машиностроительном производстве. Правка листа широко используется крупнейшими российскими металлургическими заводами и компаниями (АО «Объединенная металлургическая компания», ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат», ПАО «Челябинский металлургический комбинат», ПАО «Северсталь» и т. д.) и за рубежом (США, Германия, Китай, Индия и т. д.) [1, 2, 8 – 16].

Широкий стальной лист в основном предназначен для изготовления толстостенных труб большого диаметра, используемых для строительства магистральных нефте- и газопроводов, но может быть также использован в судостроении, машиностроении, атомной энергетике, автомобилестроении, промышленном, гражданском строительстве и других металлоемких отраслях промышленности.

В настоящее время в России существуют три широкополосных прокатных стана 5000 (МКС-5000) для производства широкого толстого стального листа для труб большого диаметра (1020 – 1420 мм) – Выксунский, Магнитогорский и Колпинский (Санкт-Петербург).

Для получения хорошей плоскостности стального листа комплекс МКС-5000 оборудован тремя листопрямительными машинами, способными править листы с пределом текучести металла до 1200 Н/мм<sup>2</sup> за один проход.

При расчетах мощности электродвигателей приводов многороликовых листопрямительных машин (число рабочих роликов  $n \geq 11$ ) в их основу часто закладываются очень грубые предположения о величине изгибающих моментов в точках касания листа с роликами [1, 2]. Постулируется, что эти моменты равны нулю на крайних роликах. Моменты на втором, третьем и четвертом роликах равны моменту при чисто пластическом изгибе листа. Моменты на  $n - 3$ ,  $n - 2$  и  $n - 1$  роликах равны моменту при чисто упругом изгибе листа, а на оставшихся средних ( $n - 8$ ) роликах ( $i = 5, \dots, n - 4$ ) моменты равны полусумме моментов при чисто упругом и чисто пластическом изгибе листа. В действительности эти предположения неверны, так как изгибающие моменты на внутренних роликах меняются от ролика к ролику по нелинейному закону. Однако эти методы при большом числе роликов ( $n \geq 11$ ) дают удовлетворительную точность при оценке энергосиловых параметров машины, но не дают кривизну и форму листа после правки. При небольшом числе роликов ( $n \leq 9$ ) применять вышеуказанный подход не рекомендуется.

Мощность электродвигателей приводов листопрямительных машин, поставляемых на металлургические заводы, задана сверху производителем в технической документации. Поэтому главной задачей технологии правки стального листа является вычисление оптимальных обжатий стальной заготовки рабочими роли-

ками листопрямляющих машин таким образом, чтобы лист на выходе из машины имел минимальные остаточные напряжения и кривизну.

При правке на многороликовых машинах стальной лист считается тонким при толщине менее 3,9 мм и толстым при толщине  $\geq 4,0$  мм.

Листопрямляющие многороликовые машины условно можно разделить на машины предварительной правки листа (от 5 до 7 рабочих роликов), машины правки толстого стального листа (от 8 до 13 рабочих роликов) и машины правки толстого стального листа ( $\geq 14$  рабочих роликов). Обычно толстый стальной лист сначала правят на машине предварительной правки, а затем на машине для правки толстого листа. Высокая плоскостность тонкого стального листа достигается при последовательной правке на всех трех типах машин.

Данная работа посвящена предварительной правке стального листа на примере полностью гидравлической семироликовой правильной машины (рис. 1).

Машина предназначена для холодной правки листа шириной 1500 – 4850 мм, толщиной 7 – 50 мм, длиной до 40 м, с пределом текучести металла до 1000 МПа при температуре листа до 150 °С. Максимальное усилие правки 4000 т позволяет править высокопрочные

стальные листы. Система управления и настройки машины обеспечивают возможность правки листа в реверсивном (обратном) режиме.

Допуски к стальному листу перед обработкой: предельные отклонения по ширине проката  $-0/+30$  мм; предельные отклонения по толщине  $\pm 0,05$  мм для диапазона толщин 4,0 – 7,5 мм и  $\pm 1\%$  для диапазона толщин 7,6 – 12,7 мм; серповидность листа не превышает 2 мм на длине 1 м.

Допуски для готового стального листа: при плоскостности исходного листа не более 15 мм/м допуск после правки листа максимально равен 3 мм/м; серповидность после правки листа не ухудшается.

Правка стального листа осуществляется семью приводными рабочими правильными роликами – тремя верхними и четырьмя нижними. Нижние входные и выходные правильные ролики снабжены отдельными системами настройки их вертикального положения с помощью клиновых пар и гидроцилиндров с позиционным управлением.

Раздельное регулирование правильных роликов позволяет вывести отдельные верхние и нижние ролики из процесса правки путем их вертикального перемещения с помощью системы регулирования клиньев. Подобным образом можно уменьшить количество активных правильных роликов, например с 7 до 5, что позволяет увеличить диапазон силовых параметров правки приблизительно на 50 %.

Не ограничивая общности, далее будем считать, что нижние четыре рабочих ролика неподвижны и расположены на одном горизонтальном уровне ( $H_1 = H_3 = H_5 = H_7 = 0$  мм), а верхние три рабочих ролика имеют независимые вертикальные перемещения.

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

Введем восемь локальных декартовых прямоугольных систем координат  $y-z$  в точках касания листа с рабочими роликами. Оси  $z$  направим по касательной к поверхности роликов слева направо, а оси  $y$  – перпендикулярно к оси  $z$  в сторону центров соответствующих роликов. Будем аппроксимировать в этих системах координат нейтральную линию листа (между соседними точками касания листа и роликов) с помощью кубических полиномов вида  $y(z) = az^2 - bz^3$ . Обозначим  $a_i$  и  $b_i$  – коэффициенты кубических полиномов в  $i$ -ой системе координат ( $i = 1, \dots, 8$ ),  $z_i$  и  $y_i$  – координаты точек касания листа с  $i$ -ым роликом в  $(i-1)$ -ой системе координат.

Математические уравнения для вычисления кривизны листа в точках касания листа с рабочими роликами имеют вид:

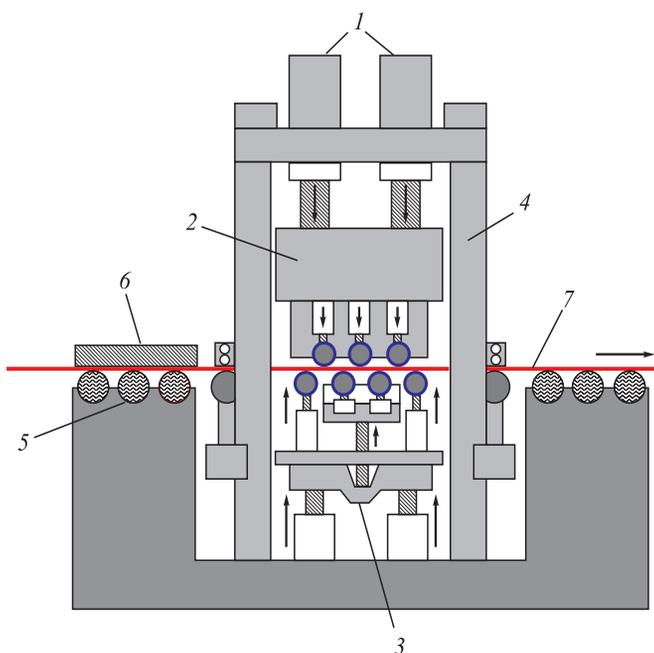


Рис. 1. Схема расположения основных узлов семироликовой листопрямляющей машины:

- 1 – главные цилиндры настройки верхней опорной рамы;
- 2 – верхняя кассета роликов; 3 – нижняя кассета роликов;
- 4 – станина; 5 – рольганг; 6 – центральные направляющие листа;
- 7 – стальной лист

Fig. 1. Scheme of main nodes of the seven-roller sheet-straightening machine:

- 1 – master cylinders of setting for the upper support frame, 2 – upper cassette of rollers, 3 – lower cassette of rollers, 4 – frame, 5 – roll-table, 6 – sheet central guides, 7 – steel sheet

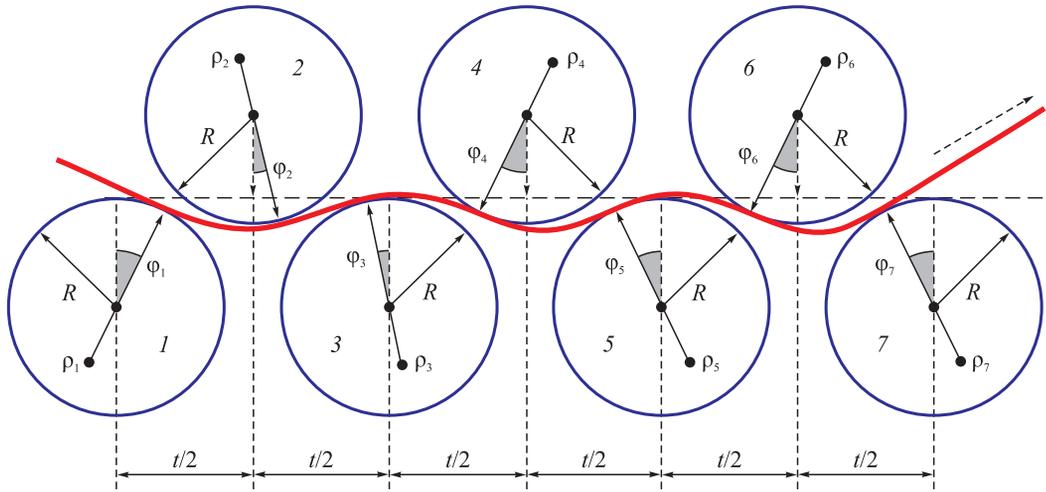


Рис. 2. Схема правки листа между семью рабочими роликами

Fig. 2. Scheme of sheet's flattening between seven working rollers

– первый и второй ролики

$$z_2 = \left( \frac{t}{2} - R_0 \sin \varphi_1 + R_0 \cos \varphi_2 \right) \cos \varphi_1 + [H_2 - R_0(1 - \cos \varphi_1) - R_0(1 - \cos \varphi_2)] \sin \varphi_1,$$

$$y_2 = - \left( \frac{t}{2} - R_0 \sin \varphi_1 + R_0 \cos \varphi_2 \right) \sin \varphi_1 + [H_2 - R_0(1 - \cos \varphi_1) - R_0(1 - \cos \varphi_2)] \cos \varphi_1,$$

$$a_1 = \frac{3y_2 + \operatorname{tg}(\varphi_1 + \varphi_2)z_2}{z_2^2}, \quad b_1 = \frac{2y_2 + \operatorname{tg}(\varphi_1 + \varphi_2)z_2}{z_2^3},$$

$$\varepsilon_{1,2} = 2a_1, \quad \rho_{1,2} = \frac{1}{2a_1},$$

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

– второй и третий ролики

$$z_3 = \left( \frac{t}{2} - R_0 \sin \varphi_2 - R_0 \cos \varphi_3 \right) \cos \varphi_2 + [H_2 - R_0(1 - \cos \varphi_2) - R_0(1 - \cos \varphi_3)] \sin \varphi_2,$$

$$y_3 = - \left( \frac{t}{2} - R_0 \sin \varphi_2 - R_0 \cos \varphi_3 \right) \sin \varphi_2 + [H_2 - R_0(1 - \cos \varphi_2) - R_0(1 - \cos \varphi_3)] \cos \varphi_2,$$

$$a_2 = \frac{3y_3 + \operatorname{tg}(\varphi_2 + \varphi_3)z_3}{z_3^2}, \quad b_2 = \frac{2y_3 + \operatorname{tg}(\varphi_2 + \varphi_3)z_3}{z_3^3},$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_{2,3} = 2a_2, \quad \rho_2 = \rho_{2,3} = \frac{1}{2a_2},$$

$$\varepsilon_{3,2} = \frac{2a_2 - 6b_2z_3}{\left[ 1 + (2a_2z_3 - 3b_2z_3^2)^2 \right]^{3/2}}, \quad \rho_{3,2} = \frac{1}{\varepsilon_{3,2}};$$

– третий и четвертый ролики

$$z_4 = \left( \frac{t}{2} + R_0 \sin \varphi_3 - R_0 \cos \varphi_4 \right) \cos \varphi_3 - [H_4 - R_0(1 - \cos \varphi_3) - R_0(1 - \cos \varphi_4)] \sin \varphi_3,$$

$$y_4 = \left( \frac{t}{2} + R_0 \sin \varphi_3 - R_0 \cos \varphi_4 \right) \sin \varphi_3 + [H_4 - R_0(1 - \cos \varphi_3) - R_0(1 - \cos \varphi_4)] \cos \varphi_3,$$

$$a_3 = \frac{3y_4 - \operatorname{tg}(\varphi_3 + \varphi_4)z_4}{z_4^2}, \quad b_3 = \frac{2y_4 - \operatorname{tg}(\varphi_3 + \varphi_4)z_4}{z_4^3},$$

$$\varepsilon_3 = \varepsilon_{3,4} = 2a_3, \quad \rho_3 = \rho_{3,4} = \frac{1}{2a_3},$$

$$\varepsilon_{4,3} = \frac{2a_3 - 6b_3z_4}{\left[ 1 + (2a_3z_4 - 3b_3z_4^2)^2 \right]^{3/2}}, \quad \rho_{4,3} = \frac{1}{\varepsilon_{4,3}};$$

– четвертый и пятый ролики

$$z_5 = \left( \frac{t}{2} + R_0 \sin \varphi_4 - R_0 \cos \varphi_5 \right) \cos \varphi_4 - [H_4 - R_0(1 - \cos \varphi_4) - R_0(1 - \cos \varphi_5)] \sin \varphi_4,$$

$$y_5 = \left( \frac{t}{2} + R_0 \sin \varphi_4 - R_0 \cos \varphi_5 \right) \sin \varphi_4 + [H_4 - R_0(1 - \cos \varphi_4) - R_0(1 - \cos \varphi_5)] \cos \varphi_4,$$

$$a_4 = \frac{3y_5 - \operatorname{tg}(\varphi_4 + \varphi_5)z_5}{z_5^2}, \quad b_4 = \frac{2y_5 - \operatorname{tg}(\varphi_4 + \varphi_5)z_5}{z_5^3},$$

$$\varepsilon_4 = \varepsilon_{4,5} = 2a_4, \quad \rho_4 = \rho_{4,5} = \frac{1}{2a_4},$$

$$\varepsilon_{5,4} = \frac{2a_4 - 6b_4z_5}{\left[ 1 + (2a_4z_5 - 3b_4z_5^2)^2 \right]^{3/2}}, \quad \rho_{5,4} = \frac{1}{\varepsilon_{5,4}};$$

– пятый и шестой ролики

$$z_6 = \left( \frac{t}{2} + R_0 \sin \varphi_5 - R_0 \cos \varphi_6 \right) \cos \varphi_5 - [H_6 - R_0(1 - \cos \varphi_5) - R_0(1 - \cos \varphi_6)] \sin \varphi_5,$$

$$y_6 = \left( \frac{t}{2} + R_0 \sin \varphi_5 - R_0 \cos \varphi_6 \right) \sin \varphi_5 + [H_6 - R_0(1 - \cos \varphi_5) - R_0(1 - \cos \varphi_6)] \cos \varphi_5,$$

$$a_5 = \frac{3y_6 - \operatorname{tg}(\varphi_5 + \varphi_6)z_6}{z_6^2}, \quad b_5 = \frac{2y_6 - \operatorname{tg}(\varphi_5 + \varphi_6)z_6}{z_6^3},$$

$$\varepsilon_5 = \varepsilon_{5,6} = 2a_5, \quad \rho_5 = \rho_{5,6} = \frac{1}{2a_5},$$

$$\varepsilon_{6,5} = \frac{2a_5 - 6b_5z_6}{\left[ 1 + (2a_5z_6 - 3b_5z_6^2)^2 \right]^{3/2}}, \quad \rho_{6,5} = \frac{1}{\varepsilon_{6,5}};$$

– шестой и седьмой ролики

$$z_7 = \left( \frac{t}{2} + R_0 \sin \varphi_6 - R_0 \cos \varphi_7 \right) \cos \varphi_6 - [H_6 - R_0(1 - \cos \varphi_6) - R_0(1 - \cos \varphi_7)] \sin \varphi_6,$$

$$y_7 = \left( \frac{t}{2} + R_0 \sin \varphi_6 - R_0 \cos \varphi_7 \right) \sin \varphi_6 + [H_6 - R_0(1 - \cos \varphi_6) - R_0(1 - \cos \varphi_7)] \cos \varphi_6,$$

$$a_6 = \frac{3y_7 - \operatorname{tg}(\varphi_6 + \varphi_7)z_7}{z_7^2}, \quad b_6 = \frac{2y_7 - \operatorname{tg}(\varphi_6 + \varphi_7)z_7}{z_7^3},$$

$$\varepsilon_6 = \varepsilon_{6,7} = 2a_6, \quad \rho_6 = \rho_{6,7} = \frac{1}{2a_6},$$

$$\varepsilon_{7,6} = \frac{2a_6 - 6b_6z_7}{\left[ 1 + (2a_6z_7 - 3b_6z_7^2)^2 \right]^{3/2}}, \quad \rho_{7,6} = \frac{1}{\varepsilon_{7,6}}.$$

Граничные условия имеют вид:

$$\rho_{1,2} = \rho_1, \quad \rho_{2,1} = -\rho_{2,3}, \quad \rho_{3,2} = -\rho_{3,4}, \quad \rho_{4,3} = -\rho_{4,5},$$

$$\rho_{5,4} = -\rho_{5,6}, \quad \rho_{6,5} = -\rho_{6,7}, \quad \rho_7 = \rho_{7,6} = \beta(\rho_{6,7})\rho_{6,7},$$

где коэффициент пружинения листа равен [8 – 10]

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

Численные расчеты (первый случай) для прогиба и кривизны стального листа в семироликовой правильной машине при  $E = 2 \cdot 10^{11}$  Па,  $R = 125$  мм,  $\sigma_T = 500 \cdot 10^6$  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. 3, 4.

При правильном подборе обжатий листа роликами и не очень большой начальной кривизне стальные листы

при правке быстро «забывают» о своей первоначальной кривизне и после четвертого ролика кривизна всех листов становится практически одинаковой. Для этого величина обжатия листа первыми четырьмя роликами должна достигнуть оптимального значения, а доля пластической деформации по толщине листа должна составлять от 67 до 80 %. После четвертого ролика обжатия стального листа подбираются так, чтобы свести кривизну листа на седьмом ролике практически к нулю.

Результаты расчетов при  $E = 2 \cdot 10^{11}$  Па,  $R = 125$  мм,  $\sigma_T = 500 \cdot 10^6$  Па,  $h = 10$  мм,  $t = 270$  мм,  $H_2 = 12$  мм,  $H_4 = 6$  мм,  $H_6 = 1$  мм и различных значениях радиуса начальной кривизны листа на первом ролике  $\rho_1$  приведены в таблице.

Особого внимания требует правка толстых высокопрочных стальных листов, для которых отношение предела текучести к пределу прочности превышает 85 – 90 %. В этом случае металл листа становится более «хрупким», при его правке сложнее попасть в зону оптимальных значений пластических деформаций и легко приблизиться к пределу прочности металла на поверхности стального листа, что в свою очередь может вызвать появление нежелательных дефектов металла.

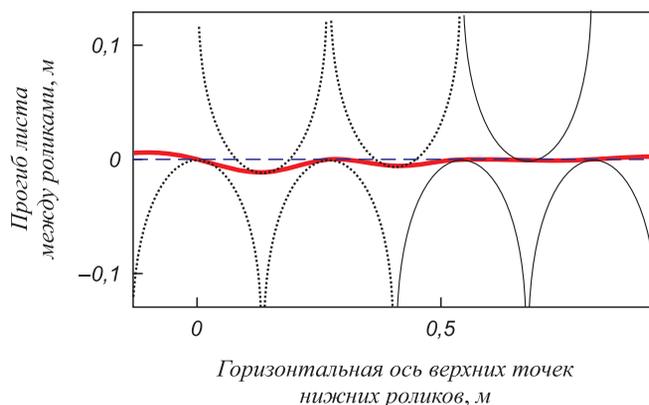


Рис. 3. Прогиб листа

Fig. 3. Sheet's deflection

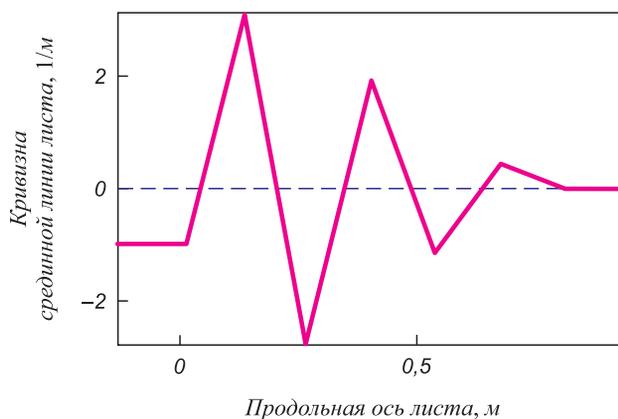


Рис. 4. Кривизна листа

Fig. 4. Curvature of the sheet

Радиусы кривизны стального листа  
в точках касания роликов

Curvature radii of the steel sheet at the contact points  
with rollers

	$\rho_1 = 0,5 \text{ м}$	$\rho_1 = 1 \text{ м}$	$\rho_1 = \infty \text{ м}$	$\rho_1 = -1 \text{ м}$	$\rho_1 = -0,5 \text{ м}$
$\rho_2, \text{ м}$	0,430	0,385	0,349	0,320	0,297
$\rho_3, \text{ м}$	-0,378	-0,371	-0,364	-0,357	-0,352
$\rho_4, \text{ м}$	0,518	0,515	0,512	0,509	0,507
$\rho_5, \text{ м}$	-0,868	-0,866	-0,864	-0,863	-0,861
$\rho_6, \text{ м}$	2,259	2,256	2,254	2,251	2,249
$\rho_7, \text{ м}$	>100	>100	>100	>100	>100

Возможны разные сочетания величин обжатия на рабочих роликах. Например, можно задавать максимальное обжатие не на втором ролике, а на четвертом, постепенно увеличивая кривизну листа от первого к четвертому ролику. Это позволяет легче «заправить» лист в правильную машину, избежать резких изменений кривизны листа и эффективнее использовать правку листа в реверсивном (обратном) режиме.

**Выводы.** Предложен аналитический метод определения кривизны стального листа при холодной правке в семироликовой листопрямительной машине.

Результаты исследования могут быть широко использованы на металлургических заводах при производстве стального листа и производстве стальных труб большого и среднего диаметров для магистральных газонефтепроводов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Королев А.А. Механическое оборудование прокатных и трубных цехов. – М.: Металлургия, 1987. – 480 с.
2. Машины и агрегаты металлургических заводов. Т. 3. Машины и агрегаты для производства и отделки проката / А.И. Целиков, П.И. Полухин, В.М. Гребеник и др. – М.: Металлургия, 1988. – 432 с.

3. 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. P. 65 – 70.
4. 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. P. 77 – 81.
5. 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. P. 60 – 64.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. Chikalov S.G., Fadeev M.M., Kolikov A.P. Mathematical model of roll-press piercing of square billets. Communication 1 // Steel in Translation. 1999. Vol. 29. No. 11. P. 74 – 77.
12. Chikalov S.G., Fadeev M.M., Kolikov A.P. Mathematical model of push piercing of square blooms. Report 2 // Steel in Translation. 2000. Vol. 30. No. 3. P. 69 – 73.
13. Kolikov A.P., Kondratov L.A. Growth of steel-tube production // Metallurgist. 2008. Vol. 52. No. 1 – 2. P. 53 – 61.
14. Romantsev B.A., Kolikov A.P., Samusev S.V. Progress in the production of seamless and welded pipe // Steel in Translation. 2009. Vol. 39. No. 3. P. 257 – 261.
15. Osadchii V.Y., Gaas E.A., Zvonarev D.Y., Kolikov A.P. Shaping of thick sheet in the production of welded large-diameter pipe // Steel in Translation. 2014. Vol. 44. No. 5. P. 374 – 378.
16. Kolikov A.P., Leletko A.S., Matveev D.B. etc. Residual stress in welded pipe // Steel in Translation. 2014. Vol. 44. No. 11. P. 808 – 812.

Поступила 25 октября 2016 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. VOL. 59. NO. 11, PP. 793–798.

CALCULATION METHOD OF STEEL SHEET'S GEOMETRY  
UNDER PRELIMINARY FLATTENING ON SEVEN-ROLLER STRAIGHTENING MACHINE

V.N. Shinkin

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

**Abstract.** The mathematical method for determining of the optimal technological parameters of cold straightening of steel sheet on the twelve-roller sheet-straightening machine is proposed. The calculations allow us to determine the type and the curvature of the neutral line of steel sheet under straightening depending on the rolls' radius, the pitch between straightening machines' working rolls, magnitude of the sheet reduction by the upper rollers, the sheet thickness, as well as elastic modulus, yield stress and hardening modulus of the sheet metal. The research results can be used at the metallurgical plants.

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

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-11-793-798

REFERENCES

1. Korolev A.A. *Mekhanicheskoe oborudovanie prokatnykh i trubnykh tsekhov* [Mechanical equipment of rolling and pipe shops]. Moscow: Metallurgiya, 1987, 480 p. (In Russ.)
2. Tselikov A.I., Polukhin P.I., Grebenik V.M. etc. *Mashiny i agregaty metallurgicheskikh zavodov. T. 3. Mashiny i agregaty dlya proizvodstva i otdelki prokata* [Machines and units of metallurgical plants. Vol. 3: Machines and units for production

- and decoration of rolling]. Moscow: Metallurgiya, 1988, 432 p. (In Russ.)
3. 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.
  4. 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.
  5. 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.
  6. 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.
  7. 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.
  8. 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.
  9. 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.
  10. 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.
  11. Chikalov S.G., Fadeev M.M., Kolikov A.P. Mathematical model of roll-press piercing of square billets. Communication 1. *Steel in Translation*. 1999, vol. 29, no. 11, pp. 74–77.
  12. Chikalov S.G., Fadeev M.M., Kolikov A.P. Mathematical model of push piercing of square blooms. Report 2. *Steel in Translation*. 2000, vol. 30, no. 3, pp. 69–73.
  13. Kolikov A.P., Kondratov L.A. Growth of steel-tube production. *Metallurgist*. 2008, vol. 52, no. 1–2, pp. 53–61.
  14. Romantsev B.A., Kolikov A.P., Samusev S.V. Progress in the production of seamless and welded pipe. *Steel in Translation*. 2009, vol. 39, no. 3, pp. 257–261.
  15. Osadchii V.Y., Gaas E.A., Zvonarev D.Y., Kolikov A.P. Shaping of thick sheet in the production of welded large-diameter pipe. *Steel in Translation*. 2014, vol. 44, no. 5, pp. 374–378.
  16. Kolikov A.P., Leletko A.S., Matveev D.B., Kadil'nikov S.V., Kulyutin S.A. Residual stress in welded pipe. *Steel in Translation*. 2014, vol. 44, no. 11, pp. 808–812.

**Information about the authors:**

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

Received October 25, 2016