

УДК 621.771.23

## ВЛИЯНИЕ УСИЛИЙ ИЗГИБА РАБОЧИХ ВАЛКОВ НА УШИРЕНИЕ ТОНКОЙ СТАЛЬНОЙ ПОЛОСЫ ПРИ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКЕ

*Койнов Т.<sup>1</sup>, д.т.н., профессор кафедры физической металлургии и теплового оборудования*  
*Бельский С.М.<sup>2</sup>, д.т.н., профессор кафедры обработки металлов давлением (belsky-55@yandex.ru)*  
*Мухин Ю.А.<sup>2</sup>, д.т.н., зав. кафедрой обработки металлов давлением*  
*Чупров В.Б.<sup>2</sup>, директор металлургического института*

<sup>1</sup> Университет химической технологии и металлургии  
(1756, Болгария, София, бульвар Климета Охридского, 8)  
<sup>2</sup> Липецкий государственный технический университет  
(398600, Россия, Липецк, ул. Московская, 30)

**Аннотация.** На основе вариационного принципа Журдена для жесткопластического тела и кинематически допустимого поля скоростей разработана математическая модель процесса свободного уширения при тонколистовой горячей прокатке. В качестве функционала вариационного уравнения была использована сумма мощностей внутренних сопротивлений, сил трения скольжения, сил среза, переднего и заднего натяжения. При решении вариационного уравнения Журдена для случая прокатки с натяжением был применен метод Ритца. Вариационное уравнение Журдена превратилось в систему однородных уравнений, левая часть каждого из которых представляла производную по варьируемому параметру. Варьируемыми параметрами стали показатель степени кинематического условия, общее уширение в очаге пластической деформации и уширение в его нейтральном сечении. Разработанная математическая модель процесса уширения горячекатаных полос позволяет исследовать распределение уширения вдоль очага пластической деформации в зависимости от параметров прокатки и полосы. Для проверки адекватности разработанной модели свободного уширения были выполнены экспериментальные исследования на двухвалковом лабораторном стане холодной прокатки. Прокатывались свинцовые образцы, измеренные величины уширения которых совпали с теоретически рассчитанным уширением с точностью менее 10 %. Холодная прокатка свинцовых образцов моделирует горячую прокатку. Теоретический анализ влияния натяжений на процесс свободного уширения при приложении натяжений соответствует практическим результатам, представленным в литературных источниках. Показано, что возникающая при приложении натяжений неравномерность растягивающих напряжений в сечениях входа и выхода очага деформации является причиной появления дополнительных мощностей в уравнении их баланса, приводящих к уменьшению величины уширения. Возникающую неравномерность растягивающих напряжений можно использовать для регулирования величины уширения при тонколистовой прокатке. В свою очередь, неравномерность растягивающих напряжений по ширине прокатываемой полосы можно увеличивать или уменьшать с помощью усилий изгиба рабочих валков прокатной клетки. В работе представлена схема регулирования величины уширения прокатываемой полосы при горячей прокатке с помощью усилий изгиба рабочих валков.

**Ключевые слова:** тонколистовая горячая прокатка, вариационный принцип Журдена, уширение, усилия изгиба, межклетевое натяжение.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-5-348-356

Потребительские свойства горячекатаных стальных полос зависят от большого числа параметров, среди которых важнейшее значение имеют стабильность механических свойств и микроструктура металла по длине и ширине полос, наличие поверхностных дефектов, а также геометрические параметры: ширина, продольная и поперечная разнотолщинность, серповидность, выпуклость и клиновидность профиля поперечного сечения [1 – 37]. Перечисленные выше параметры в значительной степени зависят от распределения температурного поля по длине и ширине прокатываемых на непрерывных широкополосных станах горячей прокатки полос.

Одной из основных характеристик точности геометрических размеров прокатанных полос и листов является их плоскостность. Нарушения плоской формы вызываются неравномерностью остаточных напряжений по ширине полосы, превышающей критическое напряжение

потери полосой плоской формы, и проявляются в виде краевой волнистости или центральной коробоватости.

Прокатка горячих стальных полос (рис. 1, 2) на многоклетевом прокатном стане сопровождается упругими деформациями валковой системы клеток – изгибом валков, их упругим сближением, неравномерным сплющиванием поверхности рабочих валков в контакте с полосой. Величина остаточных напряжений в стенке стальной полосы [6 – 7, 11 – 18] зависит от соотношения выпуклостей входного и выходного профиля поперечного сечения прокатываемой полосы. Величина выпуклости выходного профиля поперечного сечения прокатываемой полосы является результатом сложения величин станочной профилировки рабочих валков, упругого прогиба осей рабочих валков и упругого сплющивания рабочих валков в контакте с полосой. Кроме того, при прокатке происходит износ валков, особенно в местах, соответствующих кромкам проката



Рис. 1. Непрерывный широкополосный стан горячей прокатки 2000 ОАО «Новолипецкий металлургический комбинат»

Fig. 1. Continuous broadband hot-rolling mill 2000 of JSC «NLMK Group»

тываемых полос, который может достигать 0,1 – 0,6 мм за кампанию, а также тепловое расширение валков на ширине полосы на величину до 0,2 – 0,3 мм. Этими процессами обуславливается разность вытяжек металла в очаге деформации по ширине полосы, что может привести к потере полосой плоской формы.

В процессе горячей прокатки валки изнашиваются, причем величина износа (выработки) рабочих валков по длине бочки неодинакова: в местах, соответствующих кромкам прокатываемых полос, износ больше по сравнению с величиной износа средней части. Это происходит из-за того, что в процессе прокатки полосы кромки охлаждаются сильнее, чем средняя часть, и поэтому металл в прикромочных зонах имеет более высокую величину сопротивления деформации.

К настоящему времени разработаны технические решения, связанные с изменением взаимного положения валков в клети для обеспечения эффективного управления профилем поперечного сечения и плоскостностью прокатываемой полосы. К наиболее эффективным методам формирования профиля поперечного сечения прокатываемых на непрерывных широкополосных станах горячей прокатки полос относится проката полос в четырехвалковых клетях с осевой сдвижкой рабочих валков.

С помощью осевой сдвижки рабочих валков можно достичь следующих целей:

- во-первых, формирование заданной выпуклости профиля поперечного сечения полос, прокатываемых в рабочих валках с профилировкой CVC (Continuously Variable Crown);
- во-вторых, уменьшение износа рабочих валков при прокатке в рабочих валках с обычной параболической профилировкой с использованием технологии циклической сдвижки.

Для формирования заданной выпуклости профиля поперечного сечения горячекатаных полос применяют рабочие валки с S-образной профилировкой или



Рис. 2. Горячая прокатка стального листа в клети стана 2000

Fig. 2. Hot-rolling of steel sheet in the mill's stand 2000

CVC-профилировкой. При этом величина выпуклости прокатываемых полос является линейной функцией от величины осевой сдвижки рабочих валков. В процессе горячей прокатки рабочие валки в контакте с полосой вырабатываются (изнашиваются), эффективная выпуклость межвалкового зазора уменьшается, и с помощью осевой сдвижки рабочих валков это уменьшение компенсируется. При этом место контакта кромок прокатываемых полос с рабочими валками постоянно обновляется и происходит «размывание» износа по длине бочки рабочих валков. Этот эффект значительно уменьшается, когда величина осевой сдвижки рабочих валков достигает предельного значения. В этом случае происходит повышенный износ участков поверхности рабочих валков, соответствующих кромкам прокатываемых полос, и на прикромочных участках полос появляются локальные утолщения.

С целью «размывания» износа рабочих валков по длине бочки применяют технологию их циклической сдвижки с обычной параболической профилировкой. При этом методе во время паузы между прокаткой соседних полос рабочие валки смещают относительно друг друга на некоторую величину сначала в одну сторону, а по достижении предельной величины осевой сдвижки – в другую.

При этом снижается воздействие износа рабочих валков по длине бочки. Если длина бочки рабочих валков с обычной (симметричной относительно середины бочки) профилировкой больше длины опорных, то при осевой сдвижке форма межвалкового зазора не изменяется, пока край рабочего валка не заходит за край опорного. Использование метода циклической сдвижки (циклического перемещения) делает возможной беспрограммную прокатку полос.

Разработка технологии горячей прокатки широких полос с осевой сдвижкой рабочих валков является главным условием внедрения технологии беспрограммной прокатки.

Беспрограммная прокатка представляет собой горячую прокатку широких полос без выполнения условия «прокатка от широкого к узкому». Поскольку в процессе горячей прокатки рабочие валки изнашиваются (вырабатываются) неравномерно, то при отсутствии устройств осевой сдвижки рабочих валков необходимо избегать случаев, когда после прокатки узкого металла будут прокатываться более широкие полосы. При этом кромки более широких полос станут прокатываться участками рабочих валков, менее изношенными по сравнению со средними участками, кромки будут обжиматься сильнее и, соответственно, удлиняться больше, и полоса получит нарушение плоскостности в виде краевой волнистости. Такую же неплоскостность получит полоса при холодной прокатке в случае, если перед прокаткой ее профиль поперечного сечения будет иметь прикромочные утолщения. Технология горячей прокатки полос в клетях с осевой сдвижкой рабочих валков позволяет внедрить элементы беспрограммной прокатки.

### Теоретический анализ процесса уширения

Для теоретического анализа тонколистовой прокатки, в частности, процесса уширения металла в очаге деформации, успешно применяют энергетический метод, основанный на начале возможных изменений деформированного состояния (начало Лагранжа). Его разновидностью является вариационный принцип Журдена, в соответствии с которым варьированию подлежат скорости течения металла в очаге пластической деформации.

Вариационное уравнение Журдена для пластического очага деформации записывается следующим образом:

$$\delta \left( \iiint_{\Omega} \Pi_v d\Omega - \iint_S \sigma^n v ds + \sum_{i=1}^n \iint_{S_i} \tau_s |\Delta v_i| ds \right) = 0,$$

где  $\Pi_v = \int_0^H T dH$  – скоростной потенциал;  $T$  и  $H$  – интенсивности касательных напряжений и скоростей сдвиговых деформаций;  $\sigma^n$  и  $v$  – полное напряжение на поверхности  $S$  с единичной внешней нормалью  $n$  и соответствующая скорость перемещения;  $\Delta v_j$  – скачок скоростей на  $i$ -ой поверхности среза  $S_i$ ;  $\delta$  – символ варьирования;  $\tau_s$  – предел текучести на сдвиг.

Для жесткопластической среды вариационное уравнение Журдена будет иметь вид:

$$\delta \left( \iiint_{\Omega} \tau_s H d\Omega - \iint_S \sigma^n v ds + \sum_{i=1}^n \iint_{S_i} \tau_s |\Delta v_i| ds \right) = 0.$$

Первый интеграл в этом уравнении представляет собой мощность внутренних сопротивлений, второй –

мощность внешних сил на границах очага – сил трения скольжения между валками и полосой, переднего и заднего натяжения, третий – мощность сил среза.

При использовании метода Ритца вариационное уравнение Журдена для случая прокатки с натяжением в развернутом виде записывается как [5]

$$\frac{\partial}{\partial a_j} (N_1 + N_2 + N_3 - N_4 + N_5) = 0,$$

где  $N_1$  – мощность внутренних сопротивлений;  $N_2$  – мощность сил трения скольжения;  $N_3$  – мощность сил среза;  $N_4$  – мощность переднего натяжения;  $N_5$  – мощность заднего натяжения;  $a_j$  – варьируемые параметры.

Последнее полученное уравнение далее будем называть уравнением Журдена-Ритца для определения мощностей.

Под знаком дифференцирования находится выражение для полной мощности прокатки.

Для описания процесса уширения в очаге пластической деформации воспользуемся расчетной схемой, приведенной на рис. 3. Очаг пластической деформации разбит на две области – зону опережения и зону отставания. Форма кромки (штриховая линия) аппроксимирована двумя отрезками прямых – для зоны отставания и зоны опережения. В соответствии со схемой приняты следующие обозначения:  $v_0, v_1, v_x, v_y$  – входная и выходная скорости полосы и проекции скорости течения металла боковой кромки на оси  $x$  и  $y$  соответственно;  $h_0, h_i, h_1, B_0, B_i, B_1$  – толщина и полуширина полосы на входе, в нейтральном сечении и на выходе соответственно;  $l, x_i$  – длина очага деформации и зоны опережения.

Тогда уравнения, описывающие форму боковых кромок полосы в очаге пластической деформации, запишутся следующим образом:

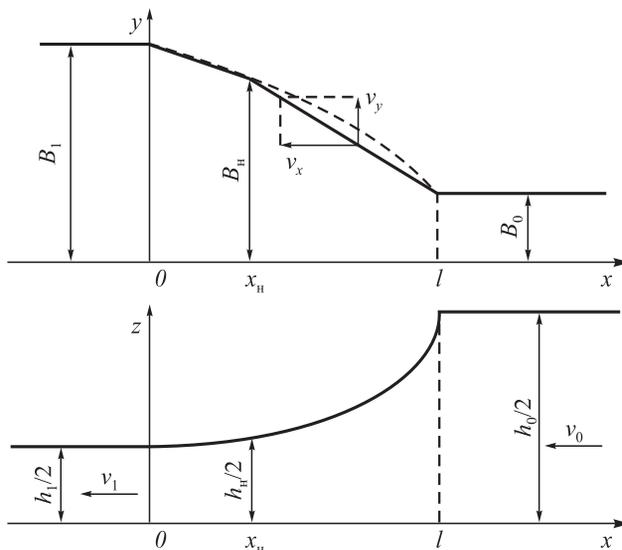


Рис. 3. Расчетная схема

Fig. 3. The design scheme

– для зоны опережения  $0 \leq x \leq x_n$

$$B_{\text{он}}(x) = B_0 \left[ 1 + \beta + (\beta_t - \beta) \frac{x}{x_n} \right];$$

– для зоны отставания  $x_n \leq x \leq l$

$$B_{\text{от}}(x) = B_0 \left[ 1 + \frac{\beta_t}{1-t_n} - \frac{\beta_t}{1-t_n} \frac{x}{l} \right],$$

где  $\beta = \frac{\Delta B}{B_0}$ ;  $\beta_t = \frac{\Delta B_t}{B_0}$ ;  $\Delta B = B_1 - B_0$ ;  $\Delta B_t = B_n - B_0$ ;  $t_n = \frac{x_n}{l}$ .

Из кинематических соображений получаем следующие условия для боковой кромки:

– для зоны опережения  $0 \leq x \leq x_n$

$$\left. \frac{v_y}{v_x} \right|_{\text{кр}} = \frac{\Delta B - \Delta B_t}{x_n};$$

– для зоны отставания  $x_n \leq x \leq l$

$$\left. \frac{v_y}{v_x} \right|_{\text{кр}} = \frac{\Delta B_t}{l - x_n}.$$

Для произвольной материальной точки с текущей координатой  $(x, y)$  определяем в соответствии с [6–7] следующий закон изменения скоростей течения металла:

– для зоны опережения  $0 \leq x \leq x_n$

$$\frac{v_y}{v_x} = \frac{\Delta B - \Delta B_t}{x_n} \left[ \frac{y}{B_{\text{он}}(x)} \right]^p;$$

– для зоны отставания  $x_n \leq x \leq l$

$$\frac{v_y}{v_x} = \frac{\Delta B_t}{l - x_n} \left[ \frac{y}{B_{\text{от}}(x)} \right]^p,$$

где  $p$  – варьируемый параметр.

Скорость  $v_x$  определим из закона постоянства секундных объемов:

$$v_0 h_0 B_0 = v_1 h_1 B_1 = v_x h_x B_x = v_a h_n B_n \cos \gamma,$$

где  $v_a$  – окружная скорость рабочего вала;  $\gamma$  – нейтральный угол;  $R$  – радиус рабочего вала;  $\cos \gamma =$

$$= \sqrt{1 - \left( \frac{x_n}{R} \right)^2}.$$

Используя известные соотношения теории пластичности и действуя так же, как в работах [6–7], найдем выражения для интенсивности скоростей деформаций, мощностей внутренних сопротивлений, скольжения, среза и натяжений. По сравнению с моделью работ [6–7] в разрабатываемой модели появятся

мощность среза в нейтральном сечении и мощности переднего и заднего натяжений. Получим систему из трех уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial p} (N_1 + N_2 + N_3 - N_4 + N_5) = 0; \\ \frac{\partial}{\partial (\Delta B)} (N_1 + N_2 + N_3 - N_4 + N_5) = 0; \\ \frac{\partial}{\partial (\Delta B_t)} (N_1 + N_2 + N_3 - N_4 + N_5) = 0. \end{cases}$$

Данная система уравнений представляет собой математическую модель процесса уширения прокатываемых полос, с помощью которой можно изучать распределение уширения в очаге деформации в зависимости от различных параметров прокатки и полосы, включая натяжения.

### Экспериментальные исследования процесса уширения

Для проверки разработанной модели был проведен эксперимент на лабораторном прокатном стане (диаметр рабочих валков 120 мм). Прокатывали свинцовые образцы без натяжения, после выхода переднего конца образца из межвалкового зазора стан останавливали, валки разводили и образец извлекали для измерений. Условия и результаты эксперимента приведены в табл. 1–3.

Результаты теоретического расчета проведенных экспериментов представлены в табл. 4 и на рис. 4, 5.

Таблица 1

#### Условия эксперимента

Table 1. Conditions of the experiment

Номер эксперимента	$h_0$ , мм	$2B_0$ , мм	$h_1$ , мм	$2B_1$ , мм	$\Delta h$ , мм	$2\Delta B$ , мм	$l$ , мм
1	10,1	30,1	8,15	31,4	1,95	1,3	15,0
2	10,0	15,4	7,8	16,8	2,2	1,4	16,0

Таблица 2

#### Измерения ширины образца в очаге деформации (эксперимент 1)

Table 2. Measures of width of a sample in the deformation zone (experiment 1)

Расстояние от входного сечения, мм	0	3	6	9	12	15
$2B(x)$ , мм	30,10	30,45	30,80	31,10	31,30	31,40

Таблица 3

**Измерения ширины образца в очаге деформации (эксперимент 2)**

*Table 3. Measures of width of a sample in the deformation zone (experiment 2)*

Расстояние от входного сечения, мм	0	4	7	10	13	16
$2B(x)$ , мм	15,4	15,8	16,2	16,6	16,7	16,8

На рис. 4 тонкой линией изображены результаты экспериментов, а толстой – результат теоретического расчета.

Для исследования влияния натяжения на уширение были просчитаны оба случая при попеременном приложении переднего и заднего натяжения. В обоих случаях удельное натяжение принималось равным  $\approx 20\%$  предела текучести на растяжение. В этом месте необходимо привести замечание И.Я. Тарновского [5] о неизменности величины полного натяжения при варьировании величины уширения, только при этом условии возможно корректное применение принципа Журдена.

Таблица 4

**Результаты теоретического расчета**

*Table 4. The results of theoretical calculation*

Номер эксперимента	$l$ , мм	$x_i$ , мм	$2\Delta B_i$ , мм	$2\Delta B$ , мм	(эксперимент – теория), мм	Относительная ошибка, %
1	15,3	5,2	1,1	1,37	-0,07	-5,4
2	16,25	4,4	1,16	1,28	0,12	8,6

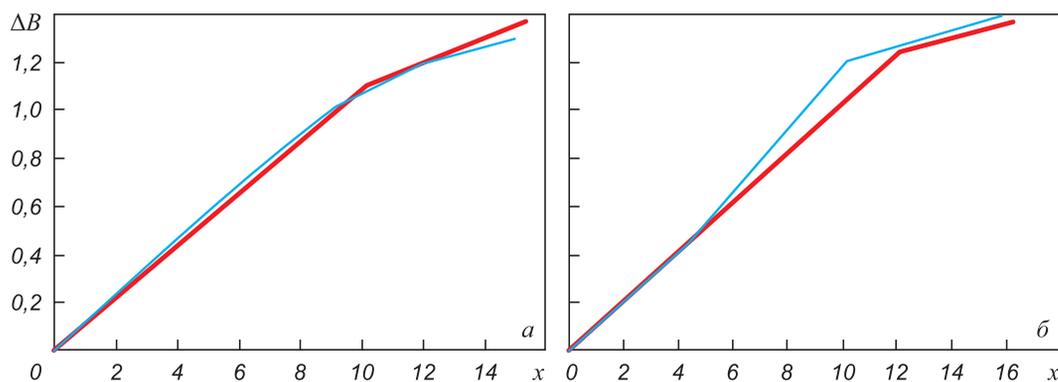


Рис. 4. Сравнение экспериментальных и расчетных данных: а – эксперимент 1; б – эксперимент 2

Fig. 4. Comparison of experimental and calculated data: а – experiment 1; б – experiment 2

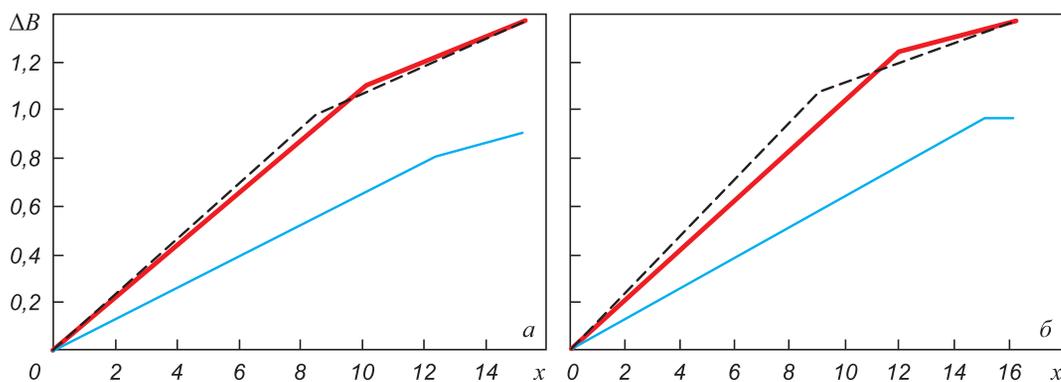


Рис. 5. Влияние переднего и заднего натяжения на уширение: а – условия эксперимента 1; б – условия эксперимента 2

Fig. 5. Influence of front and back tension on the widening: а – conditions of experiment 1; б – conditions of experiment 2

Результаты расчета изображены на рис. 5. Толстая линия соответствует распределению уширения по очагу деформации без натяжений, штриховая – при приложении только переднего натяжения, тонкая – при приложении только заднего натяжения. Теоретический расчет поведения боковых кромок очага деформации при приложении натяжений соответствует практическим результатам. Например, независимость величины уширения от переднего натяжения отмечалась в работах [8, 9].

### Неравномерность распределения удельных натяжений по ширине полосы и уширение

Далее обратимся к уравнению Журдена-Ритца. В него с разными знаками входят  $N_4$  – мощность переднего натяжения и  $N_5$  – мощность заднего натяжения. В соответствии с этим уравнением величина уширения при такой комбинации толщин и натяжений, когда эти мощности компенсируют друг друга, должна совпадать с величиной уширения при прокатке без натяжения. Однако многочисленные экспериментальные исследования свидетельствуют, что величина уширения при прокатке с передним и задним натяжением меньше, чем при прокатке без натяжений. Возникает вопрос, как эти факты согласуются с уравнением баланса энергии. Можно предположить, что приложение натяжений является причиной появления в уравнении Журдена-Ритца дополнительных мощностей сил, действующих во входном и выходном сечениях очага деформации.

Для проверки этого предположения с помощью программного пакета NISA/DISPLAY фирмы EMRC (США) методом конечных элементов были построены поля напряжений в пластине, одна сторона которой за-

креплена по перемещениям, а другая равномерно нагружена растягивающими напряжениями. Такое закрепление моделирует выходное сечение очага деформации. Поле напряжений для случая приложения равномерно распределенного натяжения на расстоянии ширины полосы от очага деформации представлено на рис. 6.

Видно, что распределение растягивающих напряжений в выходном сечении очага деформации имеет ярко выраженную неравномерность, которую в общем случае можно описать функцией  $\sigma_x = \varphi(y)$ . Этой неравномерностью обусловлено появление мощности, называемой мощностью, расходуемой полосой на накопление потенциальной энергии [10], которая выносятся полосой из очага деформации. Ее величина вычисляется следующим образом:

$$N_{\text{пот}} = \tau_s v_1 h_1 \int_0^B \frac{\sigma_x^2}{2E} dy.$$

Эта мощность должна появиться в уравнении Журдена-Ритца вместе с мощностью переднего натяжения. Кроме того, напряженное состояние полосы, к которой приложено натяжение, характеризуется наличием напряжений сжатия в направлении, перпендикулярном направлению прокатки, которые также влияют на уменьшение величины уширения полосы при прокатке с натяжением.

Аналогичные рассуждения справедливы и в отношении заднего натяжения.

Изменение величин усилий изгиба рабочих валков способствует перераспределению удельных натяжений по ширине прокатываемой полосы. При этом изменяется баланс мощностей и, соответственно, изменяется величина уширения (рис. 7).

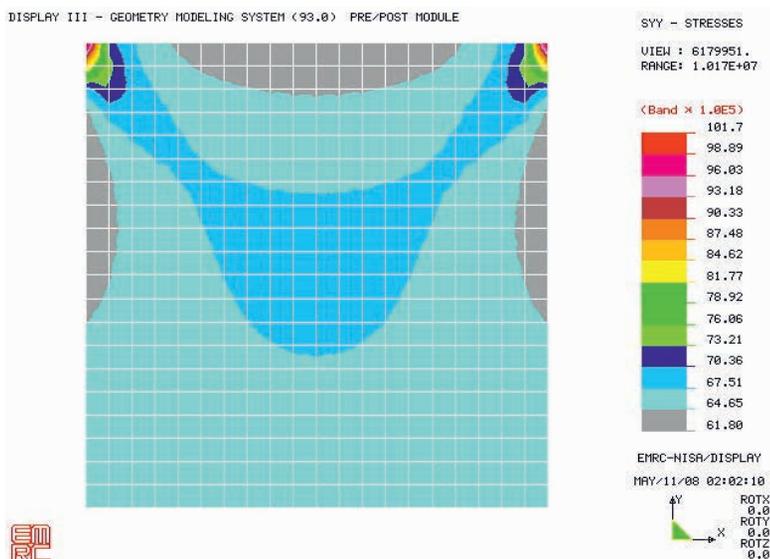


Рис. 6. Распределение растягивающих напряжений

Fig. 6. Distribution of tensile stresses

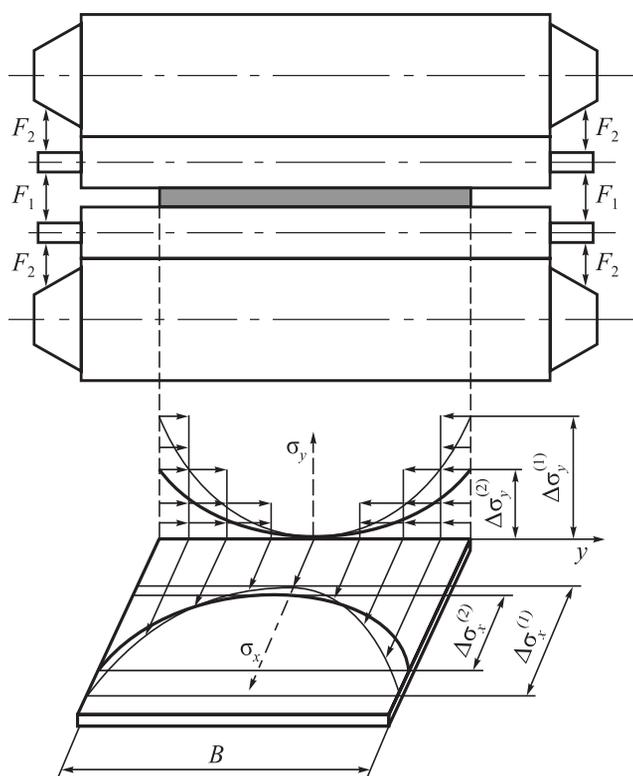


Рис. 7. Воздействие усилий изгиба рабочих валков на распределение удельных натяжений на входе и выходе очага деформации

Fig. 7. Influence of bending efforts of working rolls on the distribution of specific tensions at the entrance and exit of deformation's zone

При уменьшении усилий противоизгиба  $F_1$  или увеличении усилий дополнительного изгиба  $F_2$  рабочих валков растягивающие напряжения в прикромочных областях прокатываемой полосы уменьшаются, при этом уширение полосы увеличивается. И, наоборот, при увеличении усилий противоизгиба  $F_1$  или уменьшении усилий дополнительного изгиба  $F_2$  растягивающие напряжения в прикромочных областях увеличиваются, при этом уширение полосы уменьшается.

**Выводы.** Разработана и экспериментально подтверждена математическая модель процесса уширения прокатываемых полос, которая позволяет исследовать распределение уширения вдоль очага пластической деформации в зависимости от параметров прокатки и полосы. Показано, что натяжение уменьшает величину уширения при тонколистовой горячей прокатке. При тонколистовой горячей прокатке с натяжением усилия изгиба рабочих валков изменяют распределение растягивающих напряжений по ширине полосы в сечениях входа и выхода очага деформации, что является причиной изменения величины уширения.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Hu J., Marciniak Z., Duncan J. Mechanics of Sheet Metal Forming. – Butterworth-Heinemann, 2002. – 211 p.
2. Banabic D. Multiscale modeling in sheet metal forming. – Springer, 2016. – 405 p.

3. Wilko C. E. Formability. A review of parameters and processes that control, limit or enhance the formability of sheet metal. – Springer, 2011. – 112 p.
4. Lin J., Balint D., Pietrzyk M. Microstructure evolution in metal forming processes. – Woodhead Publishing, 2012. – 416 p.
5. Тарновский И.Я., Римм Э.Р. Уширение и расход мощности при прокатке в гладких валках с натяжением // Изв. вуз. Черная металлургия. 1964. № 7. С. 96 – 103.
6. Бельский С.М., Третьяков В.А., Барышев В.В., Кудинов С.В. Исследование процесса формирования ширины сляба в черновой группе широкополосного стана // Изв. вуз. Черная металлургия. 1998. № 1. С. 24 – 29.
7. Скороходов В.Н., Чернов П.П., Мухин Ю.А., Бельский С.М. Математическая модель процесса свободного уширения при прокатке полос // Сталь. 2001. № 3. С. 38 – 40.
8. Выдрин В.Н., Батин Ю.Т. Исследование влияния натяжения (подпора) на поперечную деформацию: В сб. науч. тр. «Теория и технология прокатки». Вып. 54. – Челябинск, 1968. С. 220 – 224.
9. Теория прокатки: Справочник / А.И. Целиков, А.Д. Томленов, В.И. Зюзин и др. – М.: Металлургия, 1982. – 335 с.
10. Григорян Г.Г., Коцарь С.Л., Железнов Ю.Д. Учет схемы деформации при анализе формообразования в процессе листовой прокатки // Изв. вуз. Черная металлургия. 1976. № 7. С. 88 – 92.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. Shinkin V.N. Asymmetric three-roller sheet-bending systems in steel-pipe production // Steel in Translation. 2017. Vol. 47. No. 4. P. 235 – 240.
16. Muhin U., Belskij S., Makarov E. Simulation of accelerated strip cooling on the hot rolling mill run-out roller table // Frattura ed Integrita Strutturale. 2016. Vol. 37. P. 305 – 311.
17. Muhin U., Belskij S., Makarov E. Application of between-stand cooling in the production hot-rolled strips // Frattura ed Integrita Strutturale. 2016. Vol. 37. P. 312 – 317.
18. 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 Integrita Strutturale. 2016. Vol. 37. P. 318 – 324.
19. Kang S.-J. Sintering, Densification, grain growth and microstructure. – Butterworth-Heinemann, 2004. – 280 p.
20. Banabic D. Multiscale modeling in sheet metal forming. – Springer, 2016. – 405 p.
21. Hu J., Marciniak Z., Duncan J. Mechanics of Sheet Metal Forming. – Butterworth-Heinemann, 2002. – 211 p.
22. 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.
23. 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.
24. Shinkin V.N. Failure of large-diameter steel pipe with rolling scabs // Steel in Translation. 2017. Vol. 47. No. 6. P. 363 – 368.
25. Lenard J.G. Metal Forming Science and Practice. – Elsevier Science, 2002. – 378 p.

26. Hingole R.S. Advances in metal forming. Expert system for metal forming. – Springer, 2015. – 116 p.
27. Qin Y. Micromanufacturing engineering and technology. – William Andrew, 2015. – 858 p.
28. Predeleanu M., Ghosh S.K. Materials processing defects. Vol. 43. – Elsevier Science, 1995. – 434 p.
29. 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.
30. 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.
31. 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.
32. 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.
33. Calladine C.R. Plasticity for engineers. Theory and applications. – Woodhead Publishing, 2000. – 328 p.
34. Chakrabarty J. Theory of plasticity. – Butterworth-Heinemann, 2006. – 896 p.
35. Bhattacharyya D. Composite sheet forming. Vol. 11. – Elsevier Science, 1997. – 530 p.
36. Predeleanu M., Gilormini P. Advanced methods in materials processing defects. Vol. 45. – Elsevier Science, 1997. – 422 p.
37. Abe T., Tsuruta T. Advances in engineering plasticity and its applications (AEPA'96). – Pergamon, 1996. – 938 p.

Поступила 2 ноября 2017 г.

IZVESTIYA VUZov. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2018. VOL. 61. NO. 5, pp. 348–356.

## INFLUENCE OF BENDING EFFORTS OF WORKING ROLLS ON WIDENING OF THE THIN STEEL STRIP DURING HOT ROLLING

*T. Koinov<sup>1</sup>, S.M. Bel'skii<sup>2</sup>, Yu.A. Mukhin<sup>2</sup>, V.B. Chuprov<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> University of Chemical Technology and Metallurgy, Sofia, Bulgaria

<sup>2</sup> Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia

**Abstract.** Based on the Jourdain variation principle, a mathematical model of the process of free widening in hot rolling of thin sheet metal is developed. The principle applies to rigid-plastic materials and for the cinematically admissible area of speeds. As a functional of the variational equation, sum of the powers of internal resistances, frictional forces, shear forces, front and back tension was used. When solving the Jourdain variational equation for the case of rolling with tension, the Ritz method was applied. The Jourdain variational equation was transformed into a system of homogeneous equations, the left side of each represented a derivative with respect to a varying parameter. Varying parameters were the exponent of the kinematic condition, general widening in the plastic deformation zone and the widening in its neutral section. The developed model allows to study the distribution of the widening on length of the deformation zone depending on the parameters of rolling process and sheet metal. To test the adequacy of the developed free-widening model, experimental studies were carried out on a two-roll cold rolling mill. Lead samples were rolled, the measured widening values of which coincided with the theoretical calculated with an accuracy of less than 10%. Cold rolling of lead samples simulates hot rolling. Theoretical analysis of the influence of tension on the process of free widening when applying tension is consistent with the practical results presented in the literature. It is shown that the unevenness of tensile stresses in the input and output sections of the deformation zone arising from the application of tension causes the appearance of additional powers in the power balance equation, leading to a decrease in magnitude of the widening. The resulting unevenness of the tensile stresses can be used to control magnitude of the widening in thin-sheet rolling. In turn, unevenness of the tensile stresses along the width of rolled strip can be increased or decreased by means of the bending forces of work rolls of the rolling stand. The article presents a scheme for controlling the value of the rolling band widening during hot rolling with the help of bending forces of work rolls.

**Keywords:** thin-sheet hot rolling, Jourdain variational principle, widening, bending forces, between-stands tension.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2018-5-348-356

### REFERENCES

1. Hu J., Marciniak Z., Duncan J. *Mechanics of Sheet Metal Forming*. Butterworth-Heinemann, 2002, 211 p.

2. Banabic D. *Multiscale modeling in sheet metal forming*. Springer, 2016, 405 p.
3. Wilko C. E. *Formability. A review of parameters and processes that control, limit or enhance the formability of sheet metal*. Springer, 2011, 112 p.
4. Lin J., Balint D., Pietrzyk M. *Microstructure evolution in metal forming processes*. Woodhead Publishing, 2012, 416 p.
5. Tarnovskii I.Ya., Rimm E.R. Widening and power consumption during the rolling in smooth rollers with tension. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1964, no. 7, pp. 96–103. (In Russ.).
6. Bel'skii S.M., Tret'yakov V.A., Baryshev V.V., Kudinov S.V. Study of formation of slab's width of in the roughing group of wideband mill. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1998, no. 1, pp. 24–29. (In Russ.).
7. Skorokhodov V.N., Chernov P.P., Mukhin Yu.A., Bel'skii S.M. Mathematical model of process of free spreading during strip rolling. *Stal'*. 2001, no. 3, pp. 38–40. (In Russ.).
8. Vydrin V.N., Batin Yu.T. Study of the influence of strain (support) on lateral deformation. In: *Teoriya i tekhnologiya prokatki: sb. nauch. tr.* [Theory and technology of rolling: Coll. of sci. works]. Issue 54. Chelyabinsk, 1968, pp. 220–224. (In Russ.).
9. Tselikov A.I., Tomlenov A.D., Zyuzin V.I., Tret'yakov A.V., Nikitin G.S. *Teoriya prokatki. Spravochnik* [Theory of rolling. Handbook]. Moscow: Metallurgiya, 1982, 335 p. (In Russ.).
10. Grigoryan G.G., Kotsar' S.L., Zheleznov Yu.D. Account of deformation scheme in the analysis of forming process of sheet rolling. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1976, no. 7, pp. 88–92. (In Russ.).
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. 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.

15. Shinkin V. N. Asymmetric three-roller sheet-bending systems in steel-pipe production. *Steel in Translation*. 2017, vol. 47, no. 4, pp. 235–240.
16. 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, pp. 305–311.
17. Muhin U., Belskij S., Makarov E. Application of between-stand cooling in the production hot-rolled strips. *Frattura ed Integrità Strutturale*. 2016, vol. 37, pp. 312–317.
18. 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, pp. 318–324.
19. Kang S.-J. *Sintering. Densification, grain growth and microstructure*. Butterworth-Heinemann, 2004, 280 p.
20. Banabic D. *Multiscale modeling in sheet metal forming*. Springer, 2016, 405 p.
21. Hu J., Marciniak Z., Duncan J. *Mechanics of Sheet Metal Forming*. Butterworth-Heinemann, 2002, 211 p.
22. 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.
23. 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.
24. Shinkin V.N. Failure of large-diameter steel pipe with rolling scabs. *Steel in Translation*. 2017, vol. 47, no. 6, pp. 363–368.
25. Lenard J.G. *Metal Forming Science and Practice*. Elsevier Science, 2002, 378 p.
26. Hingole R.S. *Advances in metal forming. Expert system for metal forming*. Springer, 2015, 116 p.
27. Qin Y. *Micromanufacturing engineering and technology*. William Andrew, 2015, 858 p.
28. Predeleanu M., Ghosh S.K. *Materials processing defects*. Vol. 43. Elsevier Science, 1995, 434 p.
29. 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.
30. 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.
31. 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.
32. 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.
33. Calladine C.R. *Plasticity for engineers. Theory and applications*. Woodhead Publishing, 2000, 328 p.
34. Chakrabarty J. *Theory of plasticity*. Butterworth-Heinemann, 2006, 896 p.
35. Bhattacharyya D. *Composite sheet forming*. Vol. 11. Elsevier Science, 1997, 530 p.
36. Predeleanu M., Gilormini P. *Advanced methods in materials processing defects*. Vol. 45. Elsevier Science, 1997, 422 p.
37. Abe T., Tsuruta T. *Advances in engineering plasticity and its applications (AEPA '96)*. Pergamon, 1996, 938 p.

**Information about the authors:**

**T. Koinov**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Physical Metallurgy and Thermal Equipment

**S.M. Bel'skii**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair "Metal Forming" (bel'sky-55@yandex.ru)

**Yu.A. Mukhin**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair "Metal Forming"

**V.B. Chuprov**, Cand. Sci. (Eng.), Director of Metallurgical Institute

Received November 2, 2017