

УДК 621.77

к.т.н. Денищенко П. Н.,  
Макаганюк А. С.  
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР, alexandr\_jes@mail.ru)

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕРПОВИДНОСТИ РАСКАТА ПРИ ТОЛСТОЛИСТОВОЙ ПРОКАТКЕ С УЧЁТОМ УШИРЕНИЯ

*Работа посвящена разработке математической модели серповидности раската при толстолистовой прокатке с учётом уширения в четырёхвалковой клетке. Представлена методика количественной оценки эффекта самовыравнивания вытяжек по ширине раската при толстолистовой прокатке.*

**Ключевые слова:** толстолистовая прокатка, четырёхвалковая клетка, серповидность, самовыравнивание вытяжек по ширине раската, уширение.

**Проблема и её связь с научными и практическими задачами.** На современном этапе развития прокатного производства основной тенденцией следует считать освоение и внедрение в производство принципиально новой техники и технологий, обеспечивающих наряду с увеличением объёма производства повышение прямолинейности листовой стали.

Наиболее актуальна проблема получения прямолинейной формы при прокатке листов на станах горячей прокатки. Однако, несмотря на имеющиеся успехи в области улучшения прямолинейности прокатываемых листов, некоторые принципиально важные вопросы остаются малоизученными. Например, не до конца выясненным является механизм нарушения прямолинейности раската при прокатке с уширением.

Выдриным В. Н. показано [1–3], что неравномерность вытяжки и обжатия по ширине полосы даёт правильное представление о процессе нарушения плоскостности лишь в частных случаях; о дефектах неплоскостности полосы правильно судить не по характеру распределения вытяжки, а по характеру распределения скоростей течения металла по ширине полосы в плоскостях входа и выхода очага деформации. Поведение полосы при выходе из валков полностью определяется процессом деформации только в зоне опережения, а при входе в валки — процессами деформации только в зоне отставания.

Железновым Ю. Д., Григоряном Г. Г. и др. было замечено, что неравномерность вытяжек раската после прокатки оказывается меньше рассчитанной в предположении плоской схемы деформации. Это явление вызвано механизмами самовыравнивания, один из которых связан с поперечными перемещениями металла в очаге пластической деформации. Имеется достаточное количество экспериментальных подтверждений его эффективности. На возможность поперечных перемещений при листовой прокатке указывается в работах [4–9].

**Постановка задачи.** При толстолистовой прокатке особое влияние на серповидность раската оказывает поперечная разнотолщинность, которая приводит к неравномерному распределению скоростей течения металла при выходе из валков. Поперечное течение металла в очаге пластической деформации уменьшает неравномерность коэффициентов удлинения и продольных напряжений по ширине прокатываемых полос на выходе из очага пластической деформации [10].

В связи с этим **целью** настоящей работы является разработка математической модели серповидности раската на основе неравномерного распределения выходных скоростей металла с учётом поперечного течения металла в очаге пластической деформации.

**Объект исследования** — технологический процесс прокатки толстолистовой

стали с неравномерной толщиной на входе в валки четырёхвалковой клетки.

**Предмет исследования** — очаг пластической деформации металла неравномерной толщины на входе в валки и с неравномерным распределением продольного и поперечного течения металла.

**Задачи** исследования:

– оценка влияния входной поперечной разнотолщинности на выходное распределение скоростей металла;

– определение влияния уменьшения неравномерности коэффициентов вытяжки по ширине прокатываемого раската за счёт поперечного течения металла;

– определение величины серповидности раската при прокатке металла неравномерной толщины.

**Изложение материала и его результаты.** Подкат шириной  $2B$ , профиль поперечного сечения которого состоит из двух областей  $A$  и  $B$ , имеющих толщины  $h_{0A}$ ,  $h_{0B}$ , входит в очаг пластической деформации со скоростью  $v_0$ , и на выходе из него прокатанная полоса имеет одинаковую толщину  $h_1$ .

Если бы прокатка осуществлялась по схеме плоской деформации, то вытяжка и выходная скорость областей металла в областях  $A$ ,  $B$  определялись следующими соотношениями:

$$\lambda_A = \frac{h_{0A}}{h_1}; v_{x1} = v_0 \frac{h_{0A}}{h_1};$$

$$\lambda_B = \frac{h_{0B}}{h_1}; v_{x2} = v_0 \frac{h_{0B}}{h_1}. \quad (1)$$

Границы областей  $A$ ,  $B$  при этом определяются плоскостями, параллельными боковым кромкам полосы и проходящими через отрезки прямых  $aa$  (рис. 1).

Поперечное перемещение металла со скоростью  $v_y$  в очаге деформации на величину  $S$  изменяет границы областей, и области  $A$ ,  $B$  переходят в области  $A'$ ,  $B'$ , причём плоскости, их разделяющие, проходят через отрезки прямых  $a'a'$  (рис. 2).

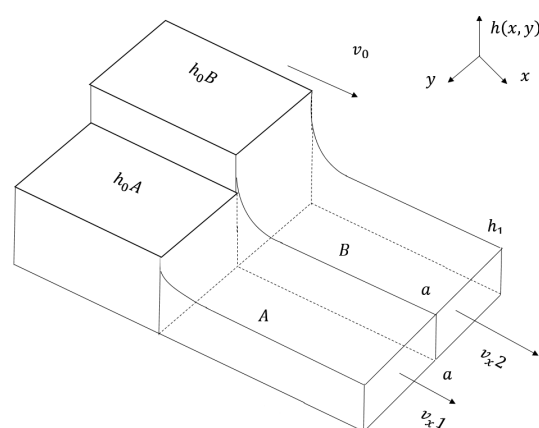


Рисунок 1 Распределение скоростей течения металла при отсутствии уширения

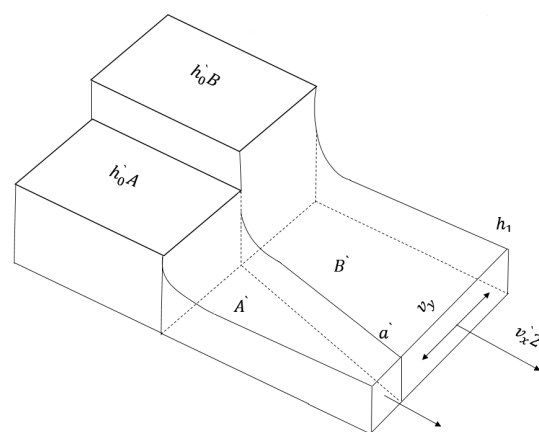


Рисунок 2 Распределение скоростей течения металла при наличии поперечного течения металла

При наличии поперечного перемещения металла в очаге деформации продольная скорость металла в области  $A$   $v_{x1}$  увеличивается, а в области  $B$   $v_{x2}$  — уменьшается по отношению к скоростям в случае плоской схемы деформации.

На рисунке 3 распределение скоростей металла по ширине полосы в случае плоской схемы деформации показано ломаной штрихпунктирной линией с амплитудой  $\Delta v_X = A$ . Распределение продольных скоростей металла по ширине полосы при наличии поперечного перемещения металла в очаге деформации показано сплошной линией с амплитудой  $\Delta v'_X = A'$ ; при этом

коэффициенты вытяжки металла в соответствующих областях, вычисляемые как отношение входной и выходной толщин, остаются неизменными.

Влияние поперечных перемещений металла в очаге деформации на уменьшение неравномерности вытяжек по ширине полосы учитывается коэффициентом  $\rho$ :

$$\frac{\Delta\lambda_{(y)}}{\lambda} = \rho \left[ \frac{\delta h_0(y)}{h_0} - \frac{\delta h_1(y)}{h_1} \right], \quad (2)$$

где  $\Delta\lambda_{(y)}$  и  $\lambda$  — величина текущей неравномерности вытяжек и величина средней вытяжки по ширине полосы;  $\delta h_0(y)$  и  $h_0$  — величина текущей поперечной разнотолщинности и величина средней толщины подката, мм;  $\delta h_1(y)$  и  $h_1$  — величина текущей поперечной разнотолщинности и величина средней толщины полосы, мм;  $\rho = \frac{A'}{A}$  — коэффициент, учитывающий влияние поперечного перемещения металла в очаге пластической деформации ( $0 < \rho < 1$ ; при плоской схеме деформации  $\rho = 1$  [11]), где  $A$  — амплитуда входной неравномерности скоростей металла:

$$A = \cos \phi \left( 1 + \beta - \beta \frac{x_n}{l} \right) \left[ a + \varepsilon \left( \frac{x_n}{l} \right)^2 \right]. \quad (3)$$

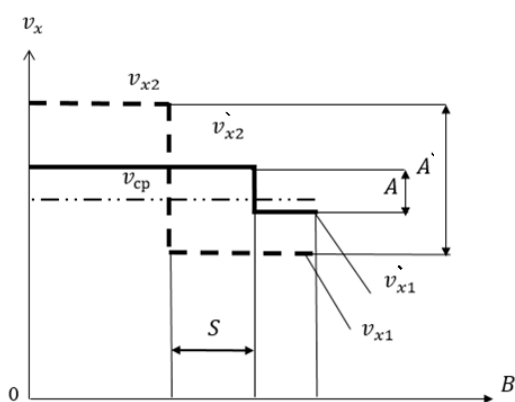


Рисунок 3 Распределение скоростей течения металла и вытяжек при наличии поперечного течения металла

Для уточнения описания процесса уширения в очаге пластической деформации воспользуемся расчётной схемой, приведённой на рисунке 4. Очаг пластической деформации разбит на две области — зону опережения и зону отставания [11]. Форма кромки (штриховая линия) аппроксимирована двумя отрезками прямых — для зоны отставания и зоны опережения. Тогда уравнения, описывающие форму боковых кромок полосы в очаге пластической деформации, запишутся следующим образом:

а) для зоны опережения  $0 \leq x \leq x_n$ :

$$B_{on}(x) = B_0 \left[ 1 + \beta + (\beta_t - \beta) \frac{x}{x_n} \right]; \quad (4)$$

б) для зоны отставания  $x_n \leq x \leq \ell$ :

$$B_{om}(x) = B_0 \left[ 1 + \frac{\beta_t}{1 - t_n} - \frac{\beta_t}{1 - t_n} \frac{x}{\ell} \right], \quad (5)$$

где

$$\beta = \frac{\Delta B}{B_0}, \quad \beta_t = \frac{\Delta B_t}{B_0}, \quad \beta_t = \frac{\Delta B_t}{B_0},$$

$$\Delta B = B_1 - B_0, \quad \Delta B_t = B_n - B_0, \text{ мм,}$$

$$t_n = \frac{x_n}{\ell},$$

где  $\ell, x_n$  — длина очага деформации и зоны опережения, мм;  $B_0, B_n, B_1$  — полуширина полосы на входе, в нейтральном сечении и на выходе соответственно, мм.

Входную неравномерность скоростей опишем функцией  $f'(y)|_{x=\ell} \ll 1$ , а выходную —  $\phi'(y)|_{x=0} \ll 1$ , причём  $f'(x, y)$  и  $\phi'(x, y)$  — самоуравновешенные функции,

$$\text{т. е. } \int_0^{B_0} f'(x, y) dy = 0, \quad \int_0^{B_1} \phi'(y) dy = 0.$$

Функцию неравномерности распределения входных скоростей металла зададим следующим образом:

$$f'(x, y) = A \cos \left[ k\pi \frac{y}{B(x)} \right], \quad (6)$$

где  $B(x)$  — текущая ширина полосы в очаге деформации, мм;  $k$  — целое число, принимающее значения  $\overline{1, n}$ .

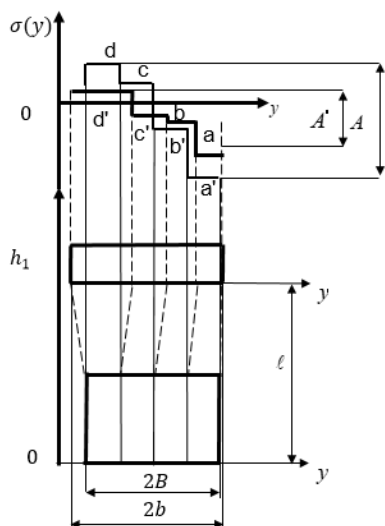
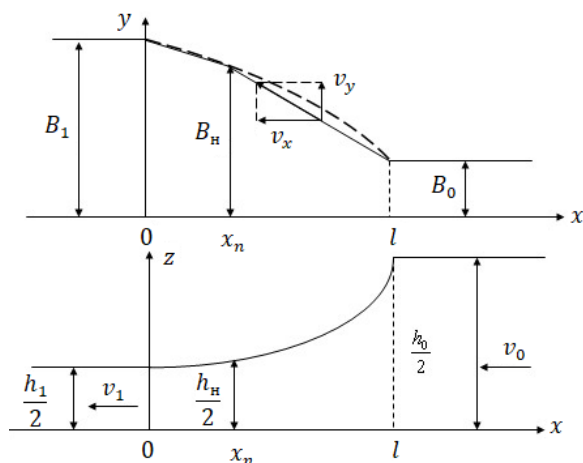


Рисунок 4 Механизм уменьшения неравномерности остаточных напряжений при прокатке с уширением



$v_0, v_1, v_x, v_y$  — входная и выходная скорости полосы и проекции скорости течения металла боковой кромки на оси  $x, y$  соответственно, мм/с;  
 $h_0, h_n, h_1$  — толщина полосы на входе, в нейтральном сечении и на выходе соответственно, мм

Рисунок 5 Расчётная схема для определения уширения

Назовём отношение амплитуды неравномерности выходных скоростей металла в полосе, прокатанной с уширением, к амплитуде выходных скоростей металла в той же полосе, но прокатанной без уширения (рис. 5, 6), коэффициентом  $\rho_B$ . Заметим, что при  $\Delta B = 0$  задача становится плоской и  $\rho_B$  становится равным единице. Функция неравномерности распределения выходных скоростей металла:

$$\phi'(x, y) = A \rho_B \cos \left[ k\pi \frac{y}{B(x)} \right], \quad (7)$$

где  $0 < \rho_B < 1$  — коэффициент, учитывающий влияние поперечного перемещения металла в очаге пластической деформации.

Для очага деформации будем предполагать модель жёсткопластических сред с упругими внешними зонами, то есть считаем, что металл, не обладающий эластичностью в деформационном очаге, сразу же приобретает её на выходе из деформационного очага. Применяя принцип вариации Журдена к такой определённой деформации, получаем уравнение [8], аналогичное [11], но без учёта натяжений при прокатке

$$\delta \left( \iiint_{\Omega} \Pi_v d\Omega - \iint_S \bar{v} ds + \sum_{i=1}^n \iint_{S_i} \tau_s |\Delta v_i| ds \right) = 0, \quad (8)$$

где  $\Pi_v = \int_0^H T dH$  — скоростной потенциал;  $T$  и  $H$  — интенсивности касательных напряжений и скоростей сдвиговых деформаций, МПа;  $\tau_s$  — предел текучести на сдвиг, МПа;  $\Delta v_i$  — скачок скоростей на  $i$ -ой поверхности среза  $S_i$ , мм/с;  $\delta$  — символ варьирования.

Рассмотрим выражение для скоростей течения металла (рис. 7) в очаге деформации с учётом уширения:

$$v_x = v_{ex} \left[ 1 + f \frac{h_x - h_1}{\Delta h} \frac{B_0}{B_1} + \varphi \frac{h_0 - h_x}{\Delta h} \frac{B_1}{B_x} \right]. \quad (9)$$

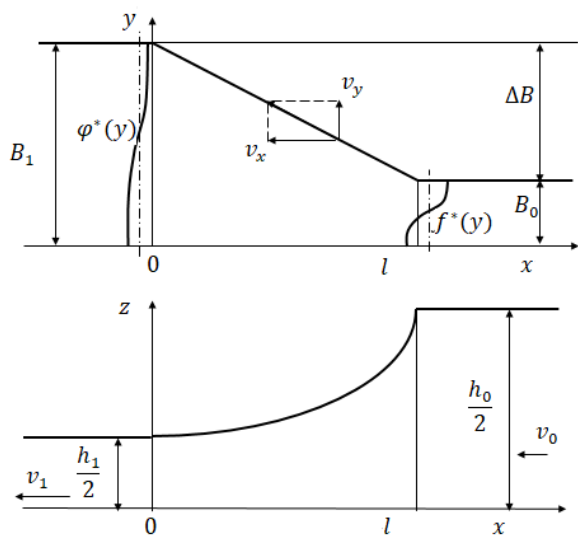


Рисунок 6 Расчётная схема распределения скоростей с учётом уширения

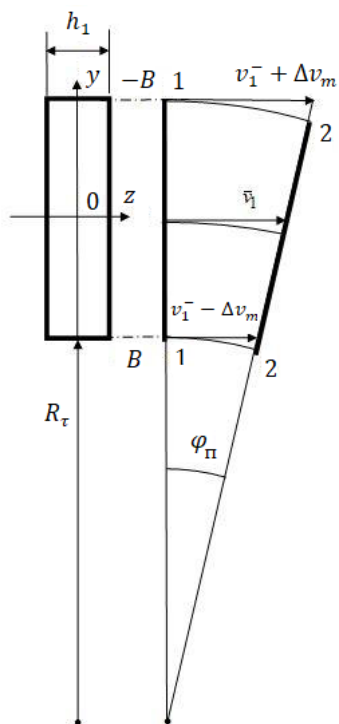


Рисунок 7 Схема процесса образования серповидности раската

Радиус поворота поперечного сечения:

$$r = \frac{b_1}{\frac{\mu_{aa}}{\mu_{bb}} - 1}, \quad (10)$$

где  $h_x, B_x$  — толщина и ширина металла в нейтральном сечении, мм;  $\mu_{aa}, \mu_{bb}$  — коэффициенты вытяжек с учётом неравномерности выходных скоростей:

$$\mu_{aa} = \frac{h_0 V_{cp}}{h_1 V_{aa}}, \quad (11)$$

где  $V_{cp}, V_{aa}$  — средняя скорость по ширине раската и скорость на выходе из валков, мм/с.

Полученная математическая модель была реализована на ЭВМ в среде Microsoft Excel. При помощи разработанной модели выполнены расчёты величин серповидности раскатов при прокатке на толстолистовом стане 3000 филиала № 12 ЗАО «ВТС». ТЛС 3000 состоит из двух реверсивных четырёхвалковых клеток — черновой и чистовой. Диаметр рабочих валков чистовой клетки 900 мм, длина бочки 3000 мм. Определили серповидность раската после первого прохода в чистовой клетки из подката толщиной 50 мм, шириной 2220 мм, длиной 5218 мм из стали 09Г2С, переданного после прокатки в черновой клетки. Исходная поперечная разнотолщинность подката составила 0,3 мм (назовём это сечение *aa*). На рисунках 8 и 9 приведены расчётные схемы для определения скоростей выхода металла из очага деформации и величины серповидности раската. Расчёт величины серповидности раската выполнен исходя из условия, что сечение раската на входе в очаг деформации имеет разные толщины левой и правой кромок, а на выходе из валков толщина раската одинаковая по всей ширине. Расчётные данные представлены в таблицах 1–4.

Таким образом, результаты расчёта показали работоспособность модели по определению величины серповидности раската при толстолистовой прокатке. Для подтверждения адекватности модели необходимо проведение экспериментальных исследований.

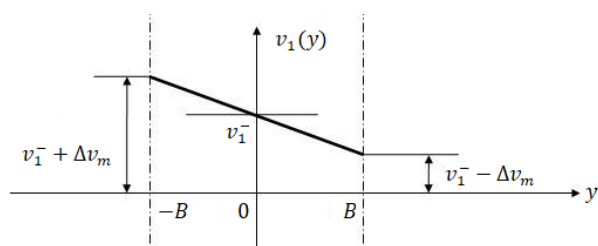


Рисунок 8 Расчётная схема для определения скоростей выхода металла из очага деформации

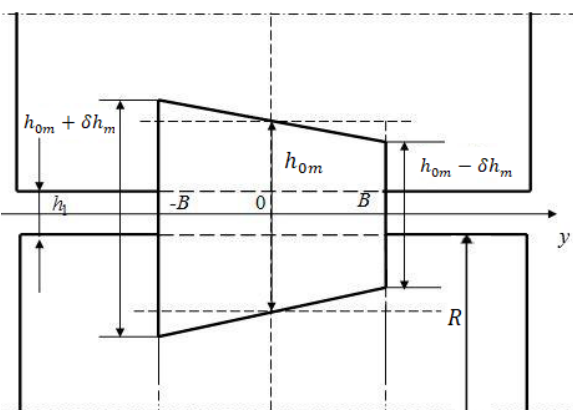


Рисунок 9 Расчётная схема для определения величины серповидности раската

Таблица 1

Режим обжатий в сечении *aa*

№ прох.	$\Delta h$ , мм	$H$ , мм	$B$ , мм	$\Delta b$ , мм	$V$ , м/с	$\mu$
0	---	50,3	2220	---	---	---
1	9,3	41	2222	2	1,2	1,23

### Библиографический список

1. Выдрин, В. Н. Об основах планшетности полосы [Текст] / В. Н. Выдрин // Теория и технология прокатки : сб. науч. тр. — Челябинск, 1972. — Вып. 102. — С. 208–219.

Таблица 2  
Режим обжатий в сечении *bb*

№ прох.	$\Delta h$ , мм	$H$ , мм	$B$ , мм	$\Delta b$ , мм	$V$ , м/с	$\mu$
0	---	50	2220	---	---	---
1	9	41	2222	2	1,2	1,22

Таблица 3

Сводная таблица результатов расчёта параметров серповидности раската

№	$V(aa)$ , мм/с	$V(bb)$ , мм/с	$V(cp)$ , мм/с	$L(aa)$ , мм	$L(bb)$ , мм	$\varphi$ , град
1	1868	1885	1877	6399	6391	0,20

Таблица 4

Сводная таблица результатов расчёта параметров без учёта поперечного перемещения металла

№ прох.	$\Delta h(aa)$ , мм	$\Delta h(bb)$ , мм	$B$ , мм	$L(aa)$ , мм	$L(bb)$ , мм
1	9,3	9	2220	6427	6363

**Выводы и направление дальнейших исследований.** Выполненные исследования позволили сделать следующие выводы:

1. Получена работоспособная математическая модель серповидности раската при толстолистовой прокатке учитывающая неравномерное распределение выходных скоростей и поперечное течение металла в очаге пластической деформации.

2. Разработана методика количественной оценки эффекта самовыравнивания вытяжек по ширине раската при толстолистовой прокатке, учитывающая уширение. Расчёт показал, что наличие абсолютного уширения 2 мм сокращает разность вытяжек на 87,5 %, что позитивно сказывается на уменьшении серповидности.

Дальнейшие исследования будут направлены на подтверждение адекватности разработанной модели и разработку методики прогноза серповидности с учётом температурного градиента по ширине раската.

2. Выдрин, В. Н. Постановка задачи по исследованию условия получения планшетных листов при холодной прокатке [Текст] / В. Н. Выдрин, Н. В. Судаков, Е. А. Остсемин // Теория и технология прокатки : сб. науч. тр. — Челябинск, 1978. — Вып. 209. — С. 23–30.

3. Выдрин, В. Н. Теоретическое и экспериментальное исследование условий получения планшетных листов при несимметричной и симметричной прокатке [Текст] / В. Н. Выдрин, Н. В. Судаков, Е. А. Остсемин // Теоретические проблемы прокатного производства : тезисы докл. и сообщений III всесоюзной науч.-техн. конф. — Днепропетровск, 1980. — С. 184.

4. Железнов, Ю. Д. Прокатка ровных листов и полос [Текст] / Ю. Д. Железнов. — М. : Металлургия, 1971. — 200 с.

5. O'Connor, H. W. Shape Flatness in Thin Strip Rolling // ASME Paper. — 1971. — Vol. 13. — P. 9–13.

6. Bernsmann, G. P. Lateral Material Flow During Cold Rolling of Strip // Iron and steel Engineer. — 1972. — Vol. 49. — P. 67–71.

7. Григорян, Г. Г. Настройка, стабилизация и контроль процесса тонколистовой прокатки [Текст] / Г. Г. Григорян, Ю. Д. Железнов, Черный В. А. и др. — М. : Металлургия, 1975. — 368 с.

8. Железнов, Ю. Д. Исследование точной тонколистовой прокатки [Текст] : автореф. дис. ... докт. техн. наук / Ю. Д. Железнов. — М., 1971. — 267 с.

9. Бельский, С. М. Расчёт распределения усилия прокатки по ширине полосы и остаточных напряжений в полосе вариационным методом [Текст] / С. М. Бельский, С. Л. Коцарь, Б. А. Поляков // Изв. вузов. Чёрная металлургия. — 1990. — № 10. — С. 32–34.

10. Belskiy, S. M. Mathematical Model of hot-rolled Strip's Camber Formation / S. M. Belskiy, I. P. Mazur // 8th International Conference on Physical and Numerical Simulation of Materials Processing. — Lipetsk State Technical University, 2016. — P. 5–7.

11. Бельский, С. М. Совершенствование технологий формообразования полос и листов на основе развития теории симметричной и асимметричной горячей прокатки [Текст] : автореф. дис. ... докт. техн. наук / С. М. Бельский. — Липецк, 2009. — 368 с.

© Денищенко П. Н.

© Макаганюк А. С.

**Рекомендована к печати к.т.н., проф. каф. ММК ДонГТУ Ульянищким В. Н., к.т.н., пом. нач. СПЦ филиала № 12 ЗАО «ВТС» по технологии Чичкан А. А.**

Статья поступила в редакцию 27.02.20.

**к.т.н. Денищенко П. Н., Макаганюк О. С. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР, alexander\_jes@mail.ru)**

### **МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СЕРПОПОДІБНОСТІ РОЗКАТУ ПРИ ТОВСТОЛИСТОВІЙ ПРОКАТЦІ З УРАХУВАННЯМ РОЗШИРЕННЯ**

Роботу присвячено розробці математичної моделі серпоподібності розкату при товстолистовій прокатці з урахуванням розширення в чотиривалковій клітці. Представлено методику кількісної оцінки ефекту самовирівнювання витяжок по ширині розкату при товстолистовій прокатці.

**Ключові слова:** товстолистова прокатка, чотиривалкова кліть, серпоподібність, самовирівнювання витяжок по ширині розкату, розширення.

**PhD in Engineering Denishchenko P. N., Makaganiuk A. S. (DonSTU, Alchevsk, LPR, alexander\_jes@mail.ru)**

### **MATHEMATICAL MODELING OF THE HOT-ROLLED BREAKDOWN CAMBER DURING THICK-SHEET ROLLING TAKING INTO ACCOUNT THE BROADENING**

The work is devoted to the development of a mathematical model of the hot-rolled breakdown camber during thick-sheet rolling taking into account the broadening in a four-high rolling mill. The paper presents a method for quantifying the effect of self-alignment the cogging back along the width of the hot-rolled breakdown during thick-sheet rolling.

**Key words:** thick-sheet rolling, four-high rolling mill, camber, self-alignment the cogging back along the width of the hot-rolled breakdown, broadening.