

РАЗДЕЛ III ПРОЦЕССЫ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ В МЕТАЛЛУРГИИ

УДК621.771.23.669.71

Ноговицын А. В.
Баранов И. Р.

МЕТОД РАСЧЕТА ПРОТЯЖЕННОСТИ ЗОН КРИСТАЛЛИЗАЦИИ И ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ВАЛКОВОЙ РАЗЛИВКЕ-ПРОКАТКЕ

Особенностью работы двухвалковых кристаллизаторов является совмещение процессов затвердевания металла и его последующей пластической деформации в пространстве между двумя вращающимися навстречу друг другу валками [1, 2]. Металл, находящийся в межвалковом пространстве, последовательно перемещается через области кристаллизации и деформации. Поперечное сечение зоны кристаллизации-деформации при непрерывной валковой разливке-прокатке схематично представлено на рис. 1.

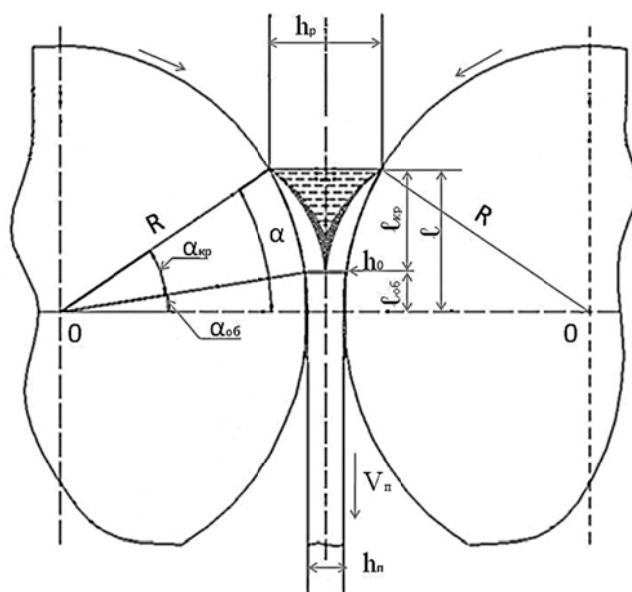


Рис. 1. Схема поперечного сечения непрерывной валковой разливки-прокатки:

R – внешний радиус валка; l – общая длина зоны кристаллизации – деформации; α – угол контакта металла с валком; $l_{кр}$ – длина зоны кристаллизации; $\alpha_{кр}$ – угол области кристаллизации; $l_{об}$ – длина зоны деформации; $\alpha_{об}$ – угол области деформации (участок прокатки); h_p – поперечный размер ванны жидкого металла; h_0 – толщина полосы в начале зоны деформации; h_n – толщина полосы на выходе из валков; V_n – скорость выхода полосы из валков

Важность информации о длине участка кристаллизации является ключевой при изучении процесса формирования листа в двухвалковом кристаллизаторе [2, 3], однако сложность непосредственного экспериментального установления границы между двумя характерными областями зоны кристаллизации-деформации заставляет обращаться к математическому моделированию.

Целью работы является получение методики математического расчета основных параметров валковой разливки, приближенных к экспериментальным значениям.

Рост толщины корки с достаточной степенью достоверности можно описать функцией квадратного корня [4, 5], впервые предложенной в 1974 году в работе М. К. Флемингса [6]:

$$\delta = k\sqrt{\tau}, \quad (1)$$

где k – коэффициент кристаллизации, мм/с^{0,5};

τ – время, с.

Бровман М. Я. в работе [7] приводит следующие данные о величине коэффициента k при кристаллизации металлов в слитках (табл. 1).

Таблица 1

Значения коэффициента k для некоторых металлов и сплавов [7]

Металл	$k, \text{ м/с}^{0,5} \times 10^{-3}$
Углеродистые стали	2,7 – 3,6
Никель	3,7 – 3,8
Цинк	4,0 – 5,0
Латуни (типа Л63)	6,0 – 6,5
Алюминий	6,2 – 6,7
Магний	6,8 – 7,0
Медь	7,2 – 7,4

В свою очередь, Бровман М. Я. в работах [7, 8] утверждает, что поскольку при валковой разливке металла время затвердевания мало, то следует использовать в таких случаях формулу:

$$\delta(\tau) = (x_0^2 + 2k_0\tau)^{1/2} - x_0, \quad (2)$$

где k_0 и x_0 – постоянные величины для данного металла.

Функция (2) близка к линейному виду:

$$\delta = \frac{k_0}{x_0} \cdot \tau. \quad (2')$$

В табл. 2 приведены значения величин k_0 и x_0 , полученные авторами работы [8], а также рассчитанные нами значения $\frac{k_0}{x_0}$. При расчете $\frac{k_0}{x_0}$ брали отношения крайних значений k_0 и x_0 .

Таблица 2

Значения величин k_0 , x_0 и $\frac{k_0}{x_0}$ для некоторых металлов [8]

Металл (сплав)	$k_0 \times 10^{-5}, \text{ м}^2/\text{с}$	$x_0 \times 10^{-3}, \text{ м}$	$\frac{k_0}{x_0} \times 10^{-2}, \text{ м/с}$
Углеродистые стали	0,45–1,0	2,4–5,3	0,19
Никель	0,55–1,20	3,0–5,4	0,18–0,22
Цинк	0,80–1,80	3,0–7,0	0,26–0,27
Латунь	1,8–3,2	4,0–7,0	0,45–0,46
Алюминий	1,8–2,8	4,2–7,8	0,36–0,43
Магний	1,8–3,2	7,8–8,5	0,23–0,38
Медь	1,8–2,8	7,7–9,8	0,23–0,3

Следует отметить, что опубликованных работ по экспериментальному исследованию параметров процесса непрерывной валковой разливки-прокатки известно крайне мало. Одной из них является работа французского исследователя, сотрудника фирмы Pechiney, С. Берковичи [9]. Указанная работа посвящена определению оптимальных режимов эксплуатации установки с двухвалковым кристаллизатором Jumbo 3С на примере непрерывной разливки-прокатки чистого алюминия марки АА1050.

Другой известной авторам научной работой является экспериментальное исследование, проведенное доцентом Национальной Металлургической Академии Украины (НМетАУ, г. Днепропетровск) Гридиным А. Ю. в Институте материаловедения Ганноверского университета им. Лейбница [10]. Работа посвящена новому экспериментальному методу нахождения длины зоны деформации при валковой разливке-прокатке путем микроструктурного анализа материала, оставшегося между валками после их контролируемой остановки во время разливки. К сожалению, данная работа не предусматривала исследований при различных скоростных режимах и с разными уровнями налива металла, поэтому массив полученных параметров недостаточен для построения теоретической модели и ее анализа.

Остановимся более подробно на анализе результатов, полученных в работе [9]. Методом для определения протяженности зоны послужил ввод в ходе разливки в зону кристаллизации удерживаемых термопар и тонких цилиндрических штифтов до момента смыкания фронтов кристаллизации. Исследования проводились для двух значений толщины выходной полосы – 6 и 10 мм, использовались валки двух диаметров – 620 и 960 мм. Результат устанавливался как среднее значение в 6 различных точках измерения по ширине полосы, равной 1100 мм. Большинство измерений проводилось с увеличением скорости разливки до момента появления дефектов (прилипание к валкам, дефекты кристаллизации) на выходящей из валков-кристаллизаторов полосе. Схема межвалкового пространства в процессе разливки-прокатки согласно исследованию С. Берковичи представлена на рис. 2.

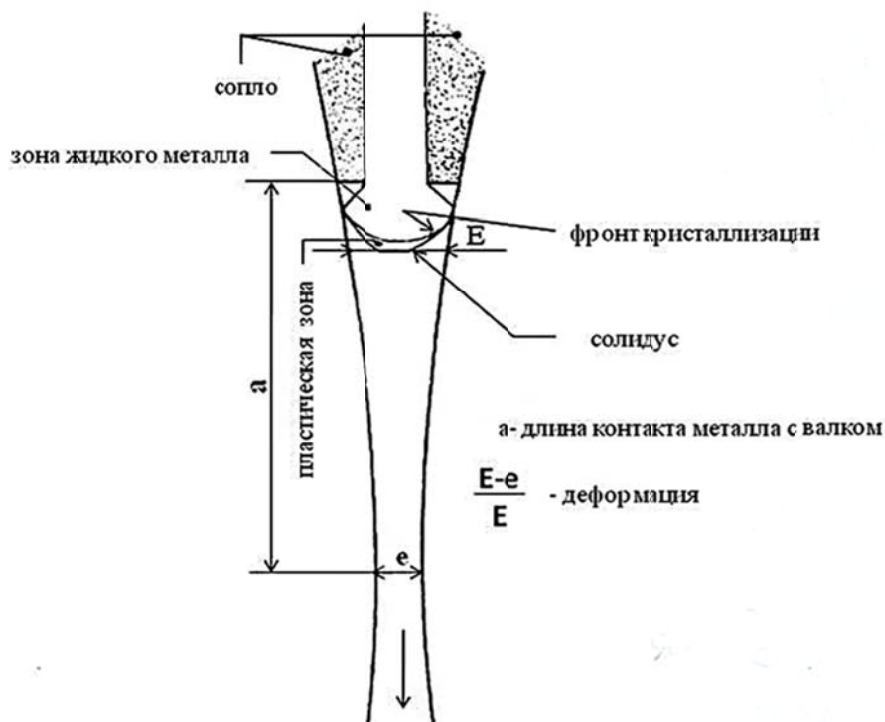


Рис. 2. Схема межвалкового пространства по эксперименту С. Берковичи

По полученным данным С. Берковичи построил графики зависимости протяженности зоны кристаллизации от величины скорости прокатки [9]

По результатам исследований автором работы [9] были сделаны следующие выводы:

– межвалковое пространство в процессе непрерывной разливки-прокатки можно разделить на три зоны: колодец, где металл полностью в жидком состоянии; мягкая зона; зона горячей прокатки (металл полностью в твердом состоянии);

– как показали тепловые измерения при разливке-прокатке алюминия и сплавов при различных режимах работы установки, мягкая зона очень мала (1 мм и менее);

– в стационарном состоянии при установившихся температурных режимах разливки металла и охлаждения валков глубина зоны кристаллизации равномерна по всей ширине полосы;

– длина зоны кристаллизации увеличивается с увеличением скорости разливки, уровня заливки металла, толщины выходной полосы;

– в исследуемых случаях величина зоны кристаллизации мала по сравнению с величиной зоны контакта металла с валком и не превышает 20 % .

С целью определения толщины корочки металла $\delta_{\text{эксп}}$ по экспериментальным данным [9] о протяженности зоны кристаллизации $\ell_{\text{кр}}$ нами разработан следующий алгоритм, основанный на геометрических построениях.

Сначала рассчитываем поперечный размер ванны жидкого металла по известным значениям радиуса валков R , высоты налива расплава ℓ и конечной толщины полосы h_n , исходя из следующего соотношения:

$$h_p = h_n + 2\sqrt{R^2 + \ell^2} - 2R . \quad (3)$$

Затем определяем общий угол контакта металла с валком:

$$\alpha = 2 \arcsin\left(\frac{1}{2} \sqrt{(h_p - h_n) / R}\right) . \quad (4)$$

Зная высоту наливки металла в межвалковое пространство, а так же экспериментально найденную длину зоны кристаллизации, можем найти длину зоны деформации (прокатки):

$$\ell_{\text{об}} = \ell - \ell_{\text{кр}} . \quad (5)$$

и центральный угол зоны деформации:

$$\alpha_{\text{об}} = \arcsin(\ell_{\text{об}} / R) . \quad (6)$$

По рассчитанному значению угла зоны деформации $\alpha_{\text{об}}$ и известной толщине полосы на выходе h_n из валков-кристаллизаторов определяем толщину полосы при смыкании затвердевших на валках корок металла h_0 :

$$h_0 = h_n + \alpha_{\text{об}}^2 R . \quad (7)$$

Экспериментальное значение толщины затвердевшей корки $\delta_{\text{эксп}}$ в момент смыкания встречных фронтов кристаллизации определяется геометрическим соотношением:

$$\delta_{\text{эксп}} = \left(R + \frac{h_0}{2}\right) / \cos(\alpha_{\text{об}}) - R . \quad (8)$$

Теоретическая величина толщины затвердевшей корки δ , рассчитанная по формуле (1) и (2), определяется временем τ контакта расплава с поверхностью валка. Если исходить из гипотезы прилипания металла к валку, то значение τ_1 определяется отношением длины дуги кристаллизации $s_{\text{кр}}$ к линейной скорости вращения валка w :

$$\tau_1 = s_{кр} / w, \quad (9)$$

где $s_{кр} = R \cdot \alpha_{кр}$; $\alpha_{кр} = \alpha - \alpha_{об}$.

Возможен так же иной подход к определению времени кристаллизации, если исходить из гипотезы плоских сечений. Из условия постоянства секундных объемов имеем известное соотношение:

$$h_i V_i^{cp} = h_n V_n = const,$$

где h_i , V_i^{cp} – длина и средняя скорость течения металла в i -ом сечении межвалкового зазора.

Согласно гипотезе плоских сечений, скорость течения металла в каждом i -м поперечном сечении валкового зазора – постоянна.

В этом случае средняя скорость металла в i -м сечении межвалкового пространства будет определяться по формуле:

$$V_i^{cp} = \frac{h_n V_n}{h_i}. \quad (10)$$

В целом скорость течения металла в зоне кристаллизации приняли как среднее значение скоростей на уровне заливки металла и уровне смыкания фронтов кристаллизации:

$$V_m = \frac{\frac{h_n V_n}{h_p} + \frac{h_n V_n}{h_0}}{2}. \quad (11)$$

В этом случае время до момента смыкания фронтов кристаллизации будет равно:

$$\tau = \ell_{кр} / V_m. \quad (12)$$

Из полученных расчетных данных следует, что в случае применения теории прилипания металла к валкам, расчетные значения толщины затвердевшей корки ближе к экспериментальным данным при значении коэффициента $k = 7,4$.

Расчетная толщина корки для метода плоских сечений имеет минимальную погрешность при коэффициенте $k = 6$.

При этом коэффициент корреляции расчетных значений толщины корки по отношению к экспериментальным значениям составляет для метода плоских сечений 0,9. В случае использования гипотезы прилипания разливаемого металла к поверхности валка коэффициент корреляции равен 0,81.

Необходимо отметить, что более высокий коэффициент корреляции при использовании метода плоских сечений был достигнут за счет большего совпадения расчетных значений с экспериментальными при разливке «толстых» полос (10 мм) с высоким уровнем налива 133–70 мм в опытах 1–7 (рис. 3).

По полученным результатам построили графики экспериментальной и расчетной толщины корки в плоскости смыкания фронтов кристаллизации (рис. 3).

Для дальнейшего анализа вышеизложенные методы расчета применили к экспериментальным данным Гридина А. Ю. [10]. Как уже описывалось выше, работа [9] посвящалась нахождению величины зоны деформации металлографическим методом.

По аналогии с С. Берковичи исследования проводились при разливке технически чистого алюминия с содержанием последнего 99,7 %. Основные технологические параметры эксперимента приведены в табл. 3.

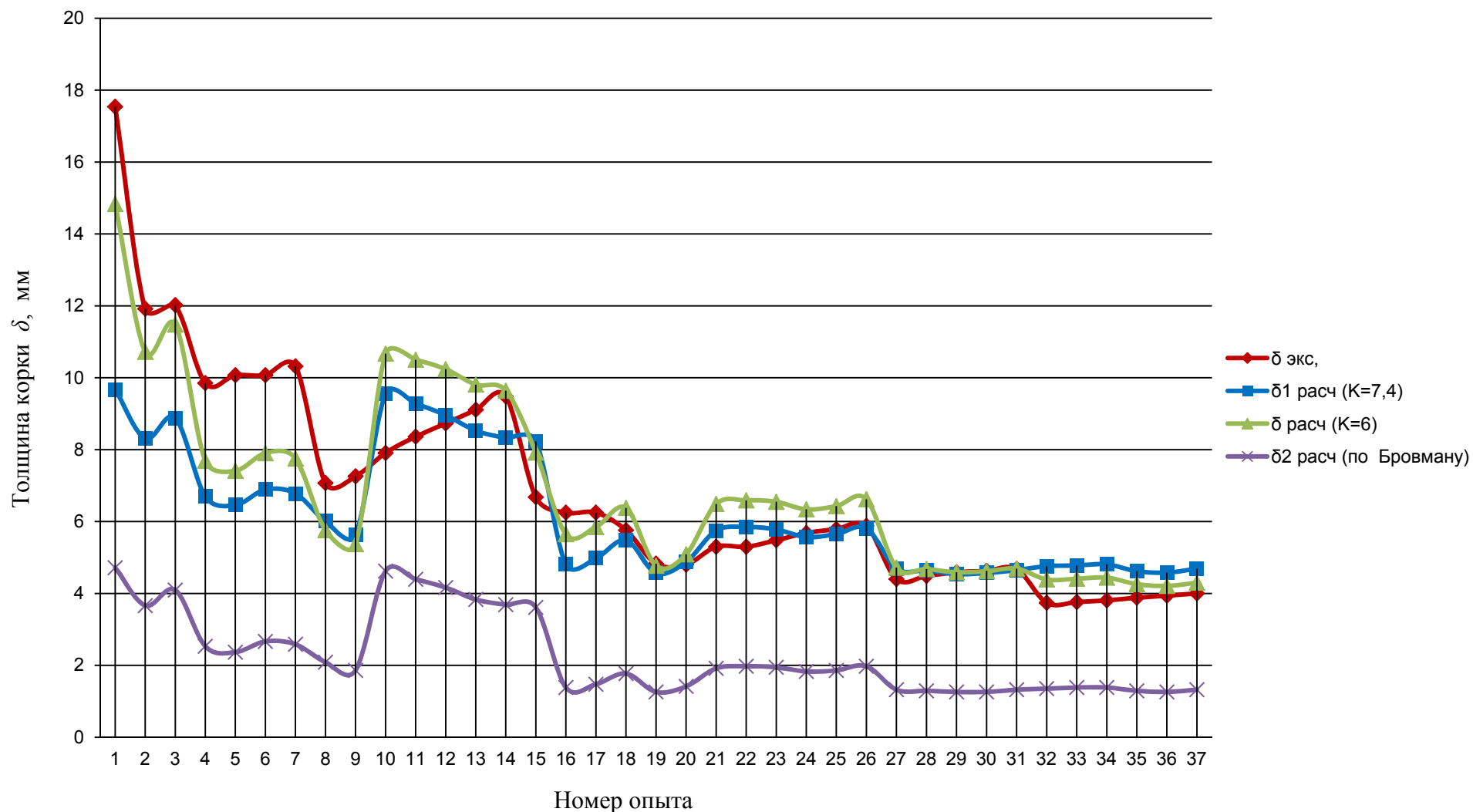


Рис. 3. Экспериментальные [9] значения толщины корки ($\delta^{\text{экс}}$) закристаллизовавшегося алюминия и расчетные значения по методу плоских сечений ($\delta^{\text{расч}}$), гипотезы прилипания ($\delta_1^{\text{расч}}$) и методу Бровмана М. Я. [8] ($\delta_2^{\text{расч}}$)

Таблица 3

Основные параметры валковой разливки-прокатки по эксперименту Гридина А. Ю. [10]

Параметр	Значение
Температура разливки, °С	680
Скорость разливки, м/мин	2,7
Высота зоны кристаллизации-деформации, мм	60
Толщина готовой полосы, мм	4,25
Расход охлаждающей жидкости, л/мин	112
Температура охлаждающей жидкости, °С	16

В ходе проведения эксперимента была установлена величина зоны деформации, которая составила 34,2 мм, что соответствует толщине корочки на одном валке 5,54 мм. Нами установлено, что такие значения толщины корочки при применении гипотезы прилипания металла к валкам обеспечивает коэффициент $k = 7,4$. Использование гипотезы плоских сечений приводит к значительно заниженному значению $k \approx 4$, которое находится далеко за пределами принятого в практике диапазона (см. табл. 1).

ВЫВОДЫ

Метод расчета толщины затвердевшей корочки металла при валковой разливке, основанный на формуле «квадратного корня» и гипотезе прилипания металла к валку, дает наиболее близкие к экспериментальным результаты, чем метод, основанный на гипотезе плоских сечений.

Коэффициент кристаллизации для валковой разливки k превышает максимальное значение коэффициента кристаллизации металлов в слитках на 10 %.

Метод Бровмана М. Я. [7, 8] при предложенных в работе [8] значениях эмпирических коэффициентов k_0 и x_0 дает значительно заниженные результаты толщины затвердевшей корочки по отношению к экспериментальным данным [9, 10], полученным непосредственно при валковой разливке-прокатке.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Непрерывное литье тонких лент в валковый кристаллизатор [Текст]* / Э. Ф. Барановский, В. М. Ильющенко, Г. П. Короткин, Е. В. Кулагин // *Литейное производство*. – 1999. – № 9. – С. 31–33.
2. Николаев В. А. *Некоторые особенности процесса бесслитковой прокатки стальных полос* / В. А. Николаев // *Производство проката*. – 2007. – № 5. – С. 11–13.
3. Рудой Л. С. *Двухвалковая установка непрерывной разливки стали (ДВ УНРС)* / В. А. Николаев // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2010. – № 7. – С. 244–246.
4. Степанов А. Н. *Производство листа из расплава [Текст]* / А. Н. Степанов, Ю. В. Зильберг, А. А. Неуструев. – М.: *Металлургия*, 1978. – 160 с.
5. Ефимов В. А. *Разливка и кристаллизация стали* / В. А. Ефимов. – М.: *Металлургия*, 1984. – 552 с.
6. Флемингс М. *Процессы затвердевания* / М. Флемингс. – М.: *Мир*, 1977. – 423 с.
7. Бровман М. Я. *Непрерывная разливка металлов* / М. Я. Бровман. – М.: «ЭКОМЕТ», 2007. – 484 с.
8. Бровман М. Я. *Протяженность зоны пластической деформации и допустимая скорость при бесслитковой прокатке* / М. Я. Бровман, В. А. Николаев, В. П. Полухин // *Металлы*. – 2007. – № 1. – С. 44–49.
9. Berkovici S. J. *Optimisation of 3C roll caster by automatic control* / S. J. Berkovici // *Proc. of conference «Light Metals»*. – TMS : New York, 1985. – P. 1285–1299.
10. Гридин А. Ю. *Экспериментальный метод определения длины зоны деформации при непрерывной валковой разливке-прокатке* / А. Ю. Гридин // *Вестник национального технического университета «ХПИ»*. – Вып. 42. – С. 48–58.

Ноговицын А. В. – д-р техн. наук, ст. науч. сотрудник, зав. отделом ФТИМС НАН Украины;
 Баранов И. Р. – вед. инженер ФТИМС НАН Украины.

ФТИМС НАН Украины – Физико-технологический институт металлов и сплавов Национальной академии наук Украины, г. Киев.

E-mail: alexey.nogovitsyn@gmail.com; ivanbir@ukr.net

Статья поступила в редакцию 09.11.2012 г.