

УДК 621.771.24

Кухарь В. В.  
Курпе А. Г.

## УТОЧНЕНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ МЕТАЛЛА НА НЕПРЕРЫВНЫХ СТАНАХ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ

Требования рынка по расширению сортамента горячекатаных рулонов обуславливают необходимость в освоении новых технологий на широкополосных станах горячей прокатки 1680 МК «Запорожсталь» и 1700 «ММК имени Ильича». Проектирование технологии, перед ее реализацией на существующем оборудовании, и определение узких мест возможно с помощью инструментов математического моделирования технологического процесса, важной составляющей которого является расчет температурного режима прокатки. Разработка такого инструмента, с учетом особенностей оборудования стана 1680 и стана 1700, позволит оценить их технические возможности и расширить сортament, в том числе производимый по технологии ТМСР.

Моделирование температурного режима горячей прокатки широко исследовано авторами работ [1–12].

Предложенные решения ориентированы как на конкретные комплексы прокатного оборудования, так и на лабораторные образцы станов. Остается вопросом универсальность существующих математических моделей, с возможностью из применения для расчета прокатных комплексов с различным составом основного технологического оборудования.

Важным моментом, отмеченным в работе [1], является потребность в получении точных моделей для проектирования технологии контролируемой прокатки микролегированных марок стали. Также, важность точного определения температуры отмечена авторами работ [2] и [3], с целью обеспечения требуемой структуры мех свойств и качественных характеристик проката.

Следует отметить, что в работах [1–3] и [7] авторами изучались дискретные процессы прокатки без привязки к конкретным производственным комплексам.

В тоже время в работе [4] авторы предлагают расчеты и обосновывают использование различного дизайна технологического оборудования с установкой CoilBox, а также с индукционной печью, что позволяет дополнительно повысить температуру и снизить нагрузки на прокатное оборудование.

Так, в работе [9] авторами описан способ расчета потерь температуры на установке CoilBox, учитывающий потери на каждом витке. Данный способ представляет интерес, однако сам способ или зависимость в работе не приведены. Также необходима проверка погрешности, получаемой при использовании данного метода, так как общая погрешность модели по данным автора составляет более 6 %. В тоже время авторы исследовали технологию в широком диапазоне температур, в том числе в двухфазной области, что позволяет применять модель для процессов низкотемпературной контролируемой прокатки.

Точности в целом математических моделей, разработанных различными учеными, имеют отличия, что связано с различной структурой моделей, подходами и способами расчета.

Так авторами работы [8] предложен адаптированный способ расчета, погрешность которого не превышает 3,4 % по клетям, по сравнению с неадаптированным, погрешность которого составляла до 6 % от фактических данных, по силе прокатки. В работе [9] общая погрешность модели также определена расчетом силы прокатки.

В виде самостоятельного элемента авторами работ [3] и [1010] предложена температурная модель, погрешность которой определена в °С. Так, отклонение температуры в работе [3], определяемое двумя способами, составляет 4,2 °С, в работе [10] отклонение температуры на поверхности двух опытных листов составило от -20 °С до +10 °С и от +10 °С до +30 °С соответственно.

В работе [12] авторами исследовано влияние скоростных процессов на температурный перепад по длине полосы, с учетом смотки на установке CoilBox, однако сама зависимость не приведена. Также авторами принято, что температура металла, смотанного в рулон, не меняется.

В тоже время в работе [13] приведены зависимости для определения потерь температуры при смотке на CoilBox, базирующиеся на дифференциальном уравнении теплопроводности. Данные уравнения не учитывают потери температуры в процессе смотки и размотки полосы, что ограничивает их применение.

Таким образом, существующие зависимости и методы для расчета потерь температуры на установках CoilBox являются упрощенными, не учитывают часть факторов и не обеспечивают необходимую точность расчетов. Имеющейся в литературных источниках информации недостаточно для универсального математического описания процессов охлаждения металла в установках CoilBox. Расчеты, выполняемые инжиниринговыми компаниями, имеют ограниченный доступ. Существующие ограничения обуславливают необходимость в разработке зависимостей для широкого применения в инженерных расчетах температурных процессов прокатки в комплексе с оборудованием CoilBox.

Актуальность данных расчетов обусловлена применением оборудования CoilBox на МК «Запорожсталь», а также его установкой в ходе предстоящей реконструкции стана 1700 «ММК имени Ильича».

Целью работы является уточнение методики расчета потерь температуры металла при использовании оборудования CoilBox, учитывающей факторы скорости движения полосы, длину рольганга и длину раската, применительно к условиям непрерывных станов горячей прокатки МК «Запорожсталь» и «ММК имени Ильича».

Типовая модель расчета станов горячей прокатки включает в себя следующие этапы [5, 6]:

1. Расчет размеров исходной заготовки, который включает расчет удельного расхода металла на прокат, пересчет размеров заготовки в горячее состояние.
2. Расчет энергосиловых параметров прокатки включает расчет температурного режима прокатки, коэффициент трения, истинное сопротивление деформации, силу и момент прокатки;
3. Расчет скоростного режима прокатки включает расчет времени прокатки в зависимости от типа скоростного режима, цикл прокатки.
4. Расчет среднего квадратичного момента электродвигателя состоит из расчета моментов по каждому циклу прокатки, среднеквадратичного интеграла, а также мощности двигателя прокатного стана.

Принципы, изложенные в такой структуре расчета, являются универсальными и могут быть применены для моделирования технологии на различных станах горячей прокатки.

В данной работе рассмотрены особенности моделирования технологии горячей прокатки на непрерывных полосовых станах на примере комплекса оборудования стана 1700 «ММК имени Ильича», с учетом проекта реконструкции (позиции 8 и 9), рис. 1. Типовой проект непрерывного стана горячей прокатки на примере стана 1700 «ММК имени Ильича» приведен на рис. 1.

Основное технологическое оборудование непрерывных станов может состоять из одной или нескольких универсальных реверсивных клетей или комбинации реверсивных и нереверсивных вместо нереверсивной черновой группы, промежуточного перемоточного устройства типа CoilBox перед чистовой группой, также возможны и другие варианты.

Расчет температурного режима прокатки учитывает следующие факторы [2, 3, 5–7, 10, 12]:

1. Снижение температуры раската за счет потерь тепла излучением.
2. Потери тепла конвекцией.
3. Потери температуры при контакте металла с валками.
4. Падение температуры вследствие потерь тепла при гидросбиве.
5. Повышение температуры раската за счет энергии деформации.

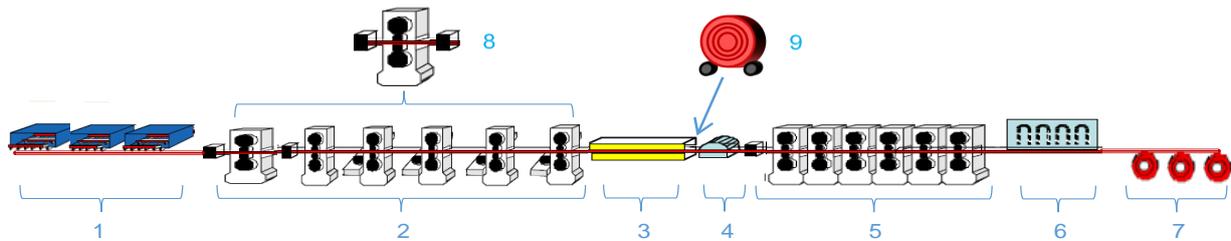


Рис. 1. Схема расположения основного оборудования стана 1700:

1 – участок методических печей; 2 – черновая группа клетей; 3 – теплосохраняющие экраны; 4 – летучие ножницы; 5 – чистовая группа клетей; 6 – установка ускоренного охлаждения; 7 – моталки; 8 – реверсивная черновая клетя; 9 – установка CoilBox

В неререверсивных клетях черновой и чистовой групп суммарное время, затрачиваемое на потери тепла излучением и конвекцией, определяется зависимостью:

$$\tau_{\Sigma} = \tau + \tau_t, \quad (1)$$

где  $\tau$  – время, затрачиваемое на прокатку раската в клетях, сек;

$\tau_t$  – время транспортировки раската между клетями черновой группы, сек.

При расчете чистовой группы в формуле (1) параметр  $\tau_t$  заменяется на  $\tau_{t1}$  – время транспортировки раската между клетями чистовой группы, сек.

При этом для черновой группы, где прокатка осуществляется последовательно в каждой клетке, время, затрачиваемое на прокатку  $\tau$ , определяется расчетом скоростного режима прокатки [5, 6].

Время транспортировки раската между клетями черновой группы определяется зависимостью:

$$\tau_t = \frac{l_r - l}{v_r}, \quad (2)$$

где  $v_r$  – скорость движения полосы по рольгангу, м/с;

$l_r$  – длина рольганга, м;

$l$  – длина транспортируемого раската, м, при условии  $l_r > l$ .

Для чистовой группы, где прокатка осуществляется одновременно в нескольких клетях, время, затрачиваемое на прокатку в клетях, считается по формуле:

$$\tau = \frac{l_{\partial}}{v_{roll} \times 1000}, \quad (3)$$

где  $l_{\partial}$  – длина дуги контакта, мм;

$v_{roll}$  – скорость прокатки, м/сек.

Время транспортировки раската между клетями чистовой группы определяем зависимостью:

$$\tau_{t1} = \frac{l_r}{v_{roll}}. \quad (4)$$

Расчет потерь температуры металла при смотке раската на установке CoilBox можно определить из уравнения Ю. В. Коновалова, В. В. Киселя [6]:

$$\Delta t = k_{uk} \left( \frac{t_0 + 273}{100} \right)^4 \times \tau_c / h_c, \quad (5)$$

где  $h_c$  – толщина рулона, мм;

$t_0$  – температура раската, поступающего на установку CoilBox, °C;

$\tau_c$  – длительность технологической операции, сек;

$k_{uk}$  – коэффициент, определяемый, согласно рекомендациям авторов, по графику [6].

Преобразовав график [6] для определения коэффициента  $k_{uk}$ , получаем зависимость, рис. 2:

$$k_{uk} = (2,0284 \ln(t_0) - 12,195) / 1000. \quad (6)$$

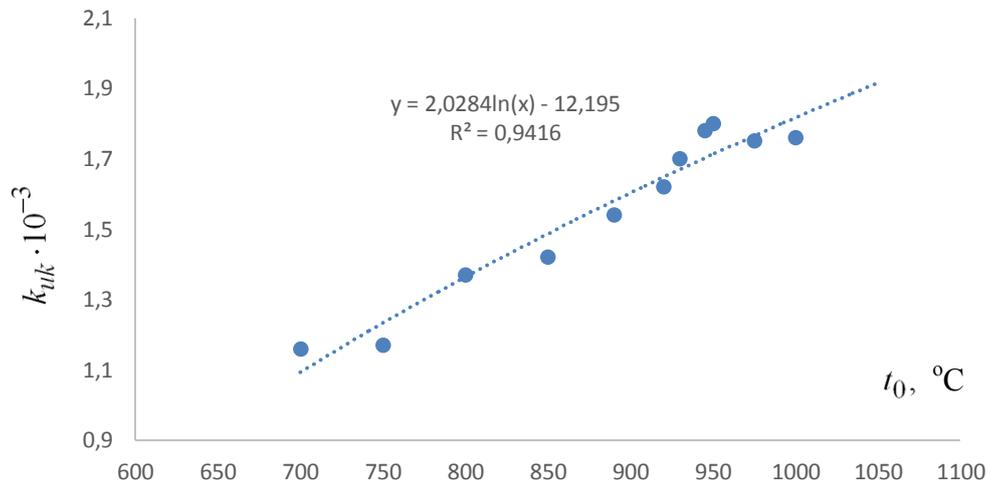


Рис. 2. Зависимость коэффициента  $k_{uk}$  от температуры раската

С учетом зависимости (6), формула для расчета потерь температуры раската после установки CoilBox имеет вид:

$$\Delta t_1 = \frac{\frac{2,0284 \ln t_0 - 12,195}{1000} \times \frac{\tau_c}{h_c} \times t_0 + 273}{100^4}. \quad (7)$$

Длительность технологической операции смотки и размотки рулона определяем следующим образом:

$$\tau_c = \frac{L}{v_w \times 1000} + \frac{L}{v_{uw} \times 1000} + \tau_p, \quad (8)$$

где  $L$  – длина раската, мм;

$v_w$  – скорость смотки, м/с;

$v_{uw}$  – скорость размотки, м/с;

$\tau_p$  – время нахождения смотанного рулона на установке, с.

Толщину рулона определяем из уравнения:

$$H \times B \times L \times \rho = \pi R^2 - \pi r^2 B \times \rho, \quad (9)$$

где  $H, B, L$  – толщина, ширина и длина сматываемого раската, мм;

$\rho$  – плотность стали, 7,85 г/см<sup>3</sup>;

$R$  – наружный радиус рулона после смотки на установке CoilBox, мм;

$r$  – внутренний формируемый радиус рулона, согласно характеристикам установки, мм.

После преобразования уравнения (9) получаем зависимость для определения наружного радиуса рулона:

$$R = \sqrt{\frac{H \times L}{\pi} + r^2}, \quad (10)$$

Толщина рулона, получаемого после смотки, рассчитывается:

$$h_c = \sqrt{\frac{H \times L}{\pi} + r^2} - r \times 1,05, \quad (11)$$

где 1,05 – коэффициент неплотности смотки.

С учетом зависимости (8) и (11), формула для расчета потерь температуры раската после установки CoilBox приобретает вид:

$$\Delta t_1 = \frac{2,0284 \ln t_o - 12,195}{1000} \times \frac{\frac{L}{v_w \times 1000} + \frac{L}{v_{uw} \times 1000} + \tau_p}{\sqrt{\frac{H \times L}{\pi} + r^2} - r \times 1,05} \times t_o + 273 / 100^4. \quad (12)$$

Следует отметить, что полученная зависимость учитывает потери температуры металла в стационарном состоянии смотанного рулона. Для учета дополнительных потерь температуры металла от неучтенных факторов (влияние толщина подката, потери температуры на начальном этапе смотки и в конце размотки, влияние эффекта «термоса» при выдержке рулона в смотанном состоянии) выполнена обработка массива расчетных данных компании «Primetals», рис. 3.

В результате обработки данных получена следующая зависимость для определения потерь температуры от неучтенных факторов:

$$\Delta t_{ur} = -16,05 \ln \tau_p + 76,694. \quad (13)$$

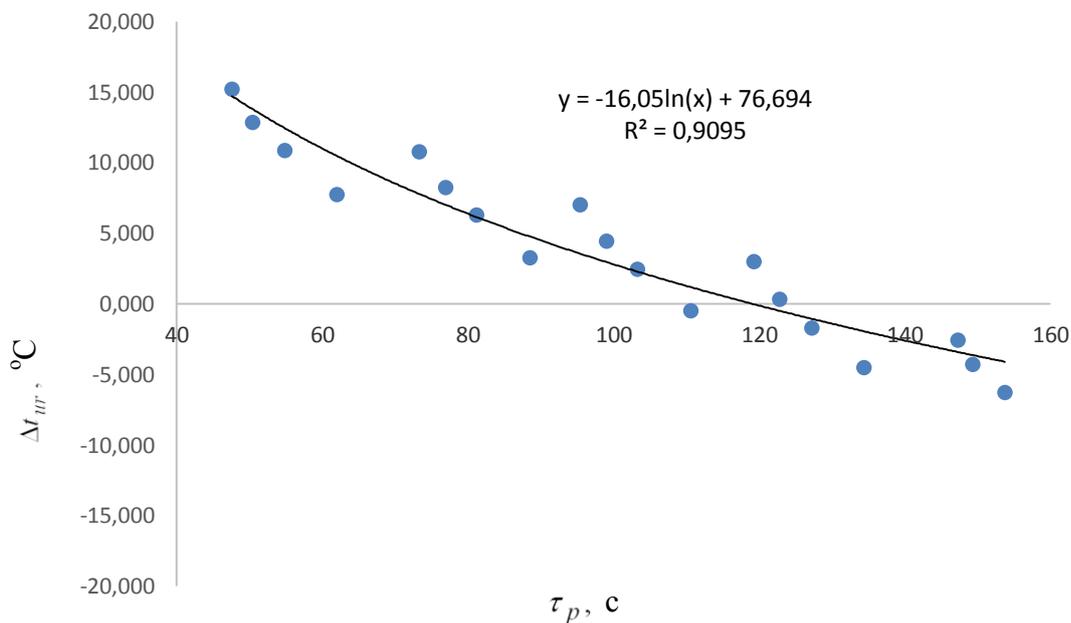


Рис. 3. Зависимость потерь температуры от неучтенных факторов, выраженных через  $\tau_p$

Таким образом, с учетом зависимости (13), суммарные потери температуры металла после установки CoilBox определяем:

$$\Delta t_{\Sigma} = \Delta t_1 + \Delta t_{ur}. \quad (14)$$

Изменение температуры металла на установке Coil-Box в зависимости от времени охлаждения (изменение скорости смотки/размотки) и толщины сформированного рулона,

при прочих равных условиях, полученные с использованием зависимости (14), приведены на рис. 4.

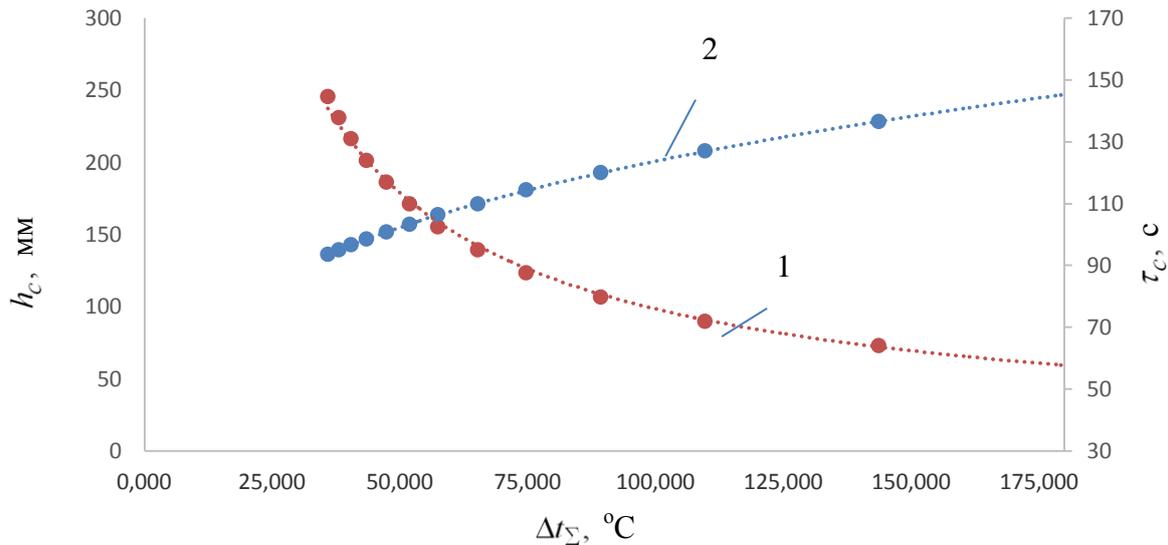


Рис. 4. Зависимость потерь температуры от толщины смотанного рулона (1), времени охлаждения (2)

Полученные формулы (12–14) применимы в температурном диапазоне 700–1100 °С, времени охлаждения рулона на установке от 30 сек до 1000 сек, для углеродистых и микролегированных марок сталей. Для проверки результатов расчетов в других диапазонах требуется проведение дополнительных исследований.

Проверка зависимости (14) выполнялась на данных, полученных авторами работы [4]. Отклонение расчетной температуры металла на выходе из CoilBox от фактической составило от –4,2 % до –6,4 %, табл. 1.

Таблица 1

Проверка зависимости для определения потерь температуры металла при смотке на установке CoilBox

* r, мм	$t_o$ , °C	L, мм	$v_w$ , м/с	$v_{uw}$ , м/с	* $\tau_p$ , с	H, мм	$t_1$ (факт), °C	$h_c$ , мм	$\Delta t_{\Sigma}$ (факт), °C	$\tau_c$ , с	$\Delta t_{\Sigma}$ (расчет), °C	$t_1$ (расчет), °C	$\Delta$ , %
700	1096	64558	2,2	1,79	70	23	992	295,2	104,0	135,4	41,0	1055,0	-6,4
700	1018	243417	6,5	6,25	70	6,1	942	295,2	76,0	146,4	36,4	981,6	-4,2
700	1053	228437	6,5	6,25	70	6,5	965	295,2	88,0	141,7	38,6	1014,4	-5,1

\* данные отсутствуют в работе [4], приняты по характеристикам аналогичного оборудования на МК «Запорожсталь».

В табл. 1,  $t_1 = t_o - \Delta t_{\Sigma}$  – температура металла на выходе из CoilBox, °C.

Полученные отклонения могут быть связаны с отсутствием информации о дополнительных факторах потерь и месте установки пирометров для замера температур.

Также проверка выполнена на расчетных данных компании «Primetals».

Отклонение температуры металла на выходе из CoilBox, определенной по зависимости (14), от расчетных данных компании «Primetals» составило от –0,91 % до 0,39 %. Стандартное отклонение составило 2,95 °C.

Проверка точности расчета температурного режима прокатки с учетом зависимостей (1–4) выполнена на математической модели [5], адаптированной для условий непрерывного стана 1700 «ММК имени Ильича», табл. 2.

Таблица 2

## Проверка расчета температурного режима прокатки

Параметр	Черновая группа	Чистовая группа			
	№ клетки				
	Кл4а	кл6	кл7	кл8	кл9
$t_1$ (расчет), °С	1068	972	932	885	854
$t_1$ (факт), °С	1075	963	921	874	845
$\Delta$ , %	-0,66	0,89	1,19	1,21	1,1

В табл. 2,  $t_1$  – температура раската после прокатки в соответствующей клетки.

Отклонения расчетных температур проката от фактических в клетки 4а черновой группы и в клетях 6–9 чистовой группы, по результатам прокатки горячекатаных рулонов размерами  $1,2 \times 1000$  мм из стали марки 08пс по ГОСТ 9045 (аналог DC01 по EN 10130), плавка № 262753-3 составили от –0,66 % до 1,21 %.

Таким образом, точность усовершенствованного расчета температурного режима прокатки, в том числе с использованием оборудования CoilBox, позволяет его использовать при проектировании технологии ТМСП.

## ВЫВОДЫ

В данной работе уточнены особенности расчета времени, затрачиваемом на потери тепла излучением и конвекцией на непрерывных станах при последовательной прокатке и прокатке раската одновременно в нескольких клетях. Погрешность расчета температурного режима прокатки на базе фактических данных по стану 1700 «ММК имени Ильича» составила от –0,66 % до 1,2 %.

Разработана зависимость для определения потерь температуры раската при смотке на установке CoilBox, учитывающая влияние скорости смотки/размотки, времени нахождения рулона на установке, а также дополнительные потери, такие как влияние толщина подката, потери температуры на начальном этапе смотки и в конце размотки, влияние эффекта «термоса» при выдержке рулона в смотанном состоянии. Погрешность предложенной зависимости проверена на различных данных и составила от –0,91 % / 0,39 % до –4,2 % / –6,4 %.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kim J. An analytical model for the prediction of strip temperatures in hot strip rolling / J. Kim, J. Lee, S. M. Hwang // *International journal of heat mass transfer*. – 2009. – № 52. – С. 1864–1874.
2. Kiuchi M. (I). Overall Thermal Analysis of Hot Plate/Sheet Rolling / M. Kiuchi (I), J. Yanagimoto, E. Wakamatsu // *Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, Tokyo, Japan Received on January 3*. – 2000. – С. 209–212.
3. Moon C. H. An approximate method for computing the temperature distribution over material thickness during hot flat rolling / C. H. Moon, Y. Lee // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2012. – № 55. – С. 310–315.
4. Васильев А. А. Новая технология горячей прокатки широкополосной стали / А. А. Васильев, В. А. Николаев // *Вестник Череповецкого государственного университета*. – Череповец, 2013. – Вып. 4. – Т. 2. – С. 5–10.
5. Курпе А. Г. Моделирование технологического процесса прокатки толстых листов на стане 3600 ОАО «МК «Азовсталь»: автореф. дис. к-та техн. наук : 05.16.05 / ФГУП ЦНИИЧермет им. И. П. Бардина. – М., 2006. – 23 с.
6. Коновалов Ю. В. Расчет параметров листовой прокатки. Справочник / Ю. В. Коновалов, А. Л. Остапенко, В. И. Пономарев. – М. : Металлургия, 1986. – 430с.
7. Pal S. K. Temperature distribution in steel during hot rolling: pseudo-bond graph view / S. K. Pal, D. A. Linkens // *Simulation Modelling Practice and Theory*. – 2002. – № 10. – С. 69–85.
8. Optimization of Temperature and Force Adaptation Algorithm in Hot Strip Mill / W. Peng, Z. Liu, X. Yang, J. Cao, D. Zhang // *Journal of iron and steel research, International*. – 2014. – № 21(3). – С. 300–305.
9. Phaniraj M. P. Thermo-mechanical modeling of two phase rolling and microstructure evolution in the hot strip mill Part I. Prediction of rolling loads and finish rolling temperature / M. P. Phaniraj, B. B. Behera, A. K. Lahiri // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2005. – № 170. – С. 323–335.

10. Estimation of plate temperatures in hotrolling based on an extended Kalman filter / K. Speicher, A. Steinboeck, D. Wild, T. Kiefer, A. Kugi // 16th IFAC Symposium on Automation in Mining, Mineral and Metal Processing. – San Diego, California, USA. – August 25–28, 2013. – С. 409–414.

11. Temperature field analysis and its application in hot continuous rolling of Inconel 718 superalloy / F. Sui, L. Chen, X. Liu, L. Wang, W. Li Sin // Acta Metall. Science Direct (Engl. Lett.) Vol.22. – Apr. 2009. – № 2. – С. 81–90.

12. Коноводов Д. В. Исследование влияния скоростных режимов смотки и размотки подката в "coilbox" на температурный перепад по длине полосы / Д. В. Коноводов, А. В. Мокиевец, О. М. Кузьмина // Plastic deformation of metals, сб. научн. трудов : в 2-х т. – Т.1. – Днепропетровск : Акцент ПП. – 2014. – Т. 1. – 264 с. – 39–43.

13. Исследование изменения температуры полосы в промежуточном перемоточном устройстве на широкополосных станах горячей прокатки / Д. В. Коноводов, Е. А. Каракаш, А. В. Мокиевец, В.С. Панченко // Обработка материалов давлением. – 2013. – № 3. – С. 160–164. – ISSN 2076-2151. (36).

## REFERENCES

1. Kim J. An analytical model for the prediction of strip temperatures in hot strip rolling / J. Kim, J. Lee, S.M. Hwang // International journal of heat mass transfer. – 2009. – № 52. – S. 1864–1874.

2. Kiuchi M. (I). Overall Thermal Analysis of Hot Plate/Sheet Rolling / M. Kiuchi (I), J. Yanagimoto, E. Wakamatsu // Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, Tokyo, Japan Received on January 3. – 2000. – S. 209–212.

3. Moon C. H. An approximate method for computing the temperature distribution over material thickness during hot flat rolling / C. H. Moon, Y. Lee // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2012. – № 55. – S. 310–315.

4. Vasil'ev A. A. Novaja tehnologija gorjachej prokatki shirokopolosnoj stali / A. A. Vasil'ev, V. A. Nikolaev // Vestnik Cherepoveckogo gosudarstvennogo universiteta. – Cherepovec, 2013. – Vyp. 4. – Т. 2. – S. 5–10.

5. Kurpe A. G. Modelirovanie tehnologicheskogo processa prokatki tolstyh listov na stane 3600 OAO «MK «Azovstal'»: avtoref. dis. k-ta tehn. nauk : 05.16.05 / FGUP CNIChermert im. I. P. Bardina. – M., 2006. – 23 s.

6. Konovalov Ju. V. Raschet parametrov listovoj prokatki. Spravochnik / Ju. V. Konovalov, A. L. Ostapenko, V. I. Ponomarev. – M. : Metallurgija, 1986. – 430s.

7. Pal S. K. Temperature distribution in steel during hot rolling: pseudo-bond graph view / S. K. Pal, D. A. Linkens // Simulation Modelling Practice and Theory. – 2002. – № 10. – S. 69–85.

8. Optimization of Temperature and Force Adaptation Algorithm in Hot Strip Mill / W. Peng, Z. Liu, X. Yang, J. Cao, D. Zhang // Journal of iron and steel research, International. – 2014. – № 21(3). – S. 300–305.

9. Phaniraj M. P. Thermo-mechanical modeling of two phase rolling and microstructure evolution in the hot strip mill Part I. Prediction of rolling loads and finish rolling temperature / M. P. Phaniraj, B. B. Behera, A. K. Lahiri // Journal of Materials Processing Technology. – 2005. – № 170. – S. 323–335.

10. Estimation of plate temperatures in hotrolling based on an extended Kalman filter / K. Speicher, A. Steinboeck, D. Wild, T. Kiefer, A. Kugi // 16th IFAC Symposium on Automation in Mining, Mineral and Metal Processing. – San Diego, California, USA. – August 25–28, 2013. – S. 409–414.

11. Temperature field analysis and its application in hot continuous rolling of Inconel 718 superalloy / F. Sui, L. Chen, X. Liu, L. Wang, W. Li Sin // Acta Metall. Science Direct (Engl. Lett.) Vol.22. – Apr. 2009. – № 2. – S. 81–90.

12. Konovodov D. V. Issledovanie vlijaniya skorostnyh rezhimov smotki i razmotki podkata v "coilbox" na temperaturnyj perepad po dline polosy / D. V. Konovodov, A. V. Mokievcev, O. M. Kuz'mina // Plastic deformation of metals, sb. nauchn. Trudov : v 2-h t. – Т.1. – Днепропетровск : Акцент ПП. – 2014. – Т. 1. – 264 с. – 39–43.

13. Issledovanie izmeneniya temperatury polosy v promezhutochnom peremotochnom ustrojstve na shirokopolosnyh stanah gorjachej prokatki / D. V. Konovodov, E. A. Karakash, A. V. Mokievcev, V.S. Panchenko // Obrabotka materialov davleniem. – 2013. – № 3. – S. 160–164. – ISSN 2076-2151. (36).

Кухарь В. В. – д-р техн. наук, проф., зав. каф. ОМД ПГТУ;

Курпе А. Г. – канд. техн. наук, нач. техн. упр. ЧАО «ММК им. Ильича».

ПГТУ – Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь.

ЧАО «ММК им. Ильича» – Частное акционерное общество «Мариупольский металлургический комбинат имени Ильича», г. Мариуполь.

E-mail: [kvv.mariupol@gmail.com](mailto:kvv.mariupol@gmail.com); [aleksandr.kurpe@metinvestholding.com](mailto:aleksandr.kurpe@metinvestholding.com)

Статья поступила в редакцию 18.03.2018 г.