

Курпе О.Г.,*
Кухар В.В.,**
Змазнева Є.В.***

*ПрАТ «ММК «ІМЕНІ ІЛЛІЧА»,
МЕТІНВЕСТ ХОЛДІНГ,
**ДВНЗ «Приазовський державний
технічний університет»,
***ПрАТ «МК «АЗОВСТАЛЬ»,
МЕТІНВЕСТ ХОЛДІНГ,
м. Маріуполь, Україна
E-mail: aleksandr.kurpe@metinvestholding.com

УТОЧНЕННЯ РОЗРАХУНКУ ТЕПЛОВИХ ВТРАТ МЕТАЛУ НА СТАНАХ СТЕККЕЛЯ

УДК 621.771.24

В роботі досліджений температурний процес прокатки рулонної сталі на станах типу Стеккель. Авторами запропоновано уточнення способу розрахунку втрат температури розкату випромінюванням та конвекцією, який додатково враховує фактор швидкості руху полоси, довжину рольгангу та довжину дуги контакту металу з валками. Врахування вказаних факторів підвищує точність технологічних розрахунків, забезпечує універсальність розробленого методу відносно різноманітних типів станів Стеккеля. Також авторами розроблена формула для розрахунку змін температури металу при проміжному змотуванні в пічній моталці. Формула уперше враховує вплив на температуру таких параметрів як товщина та довжина полоси, швидкість змотування, температуру металу перед пічною моталкою, діаметр пічного барабану. Розрахунок змінювання температури виконано при умовах одностороннього нагріву термічно тонкого тіла за час рівний часу намотування останнього вітка на барабан. Похибка розрахунку температури металу з урахуванням запропонованих залежностей перевірена на фактичних даних, отриманих на стані Стеккеля заводу Fertiera Valsider і складає від -2,1 % до 0,09 %.

Ключові слова: моделювання, плоский прокат, температурний режим, стан Стеккеля.

Вступ

При проектуванні технології важливо, щоб розрахунки які були виконані з достатньою точністю описували технологічні процеси. Особливо важлива точність при проектуванні технології ТМСП, яка отримала широке застосування, у наслідок своєї економічності та досягненню унікального комплексу властивостей. Ця технологія реалізується в достатньо вузькому діапазоні температур $\gamma - \alpha$ перетворень. Розробка технології ТМСП для умов станів Стеккеля потребує особливого підходу до розрахунків температурних параметрів, з урахуванням особливостей цих станів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Серед існуючих прокатних комплексів, стані Стеккеля займають особливе місце.

Цільовим призначенням станів Стеккеля, які були спроектовані до 60-х років минулого століття було виробництво рулонної трансформаторної сталі, легованих сталей, які вироблялись способом гарячої прокатки в аустенітній області.

З метою розширення сортаменту який вироблявся, стани Стеккеля були модернізовані [3 - 6], та обладнанні установками прискореного охолодження прокату, що дозволило суттєво розширити сортамент який вироблявся, у тому числі за рахунок застосування технології термомеханічного контрольованого процесу (ТМСП) [7 - 10]. Стани Стеккеля останніх поколінь вже мають увесь необхідний комплекс обладнання для виробництва широкого сортаменту вуглецевих, мікролегованих та спеціальних сталей, а також широко використовуються в комплексі ливарно-прокатного модуля [3 - 6].

Таким чином сучасні стани Стеккеля мають широкі технологічні можливості, які дозволяють втілювати відомі способи прокатки [5].

Авторами роботи [5] досконало вивчені основні енергосилові параметри процесу прокатки на стані Стеккеля. Авторами також відзначена необхідність та важливість моделювання технологічного процесу для розрахунку виробничих агрегатів для розглядання динаміки температур, для розгляду динаміки температур, сили та моментів прокатки.

Ця необхідність підтверджується приведеними в роботі [5] графіками з результатами моделювання. Проте, інформація про математичні залежності, які були використані та їх особливості відсутня.

Слід зазначити, що в існуючих літературних джерелах питання моделювання процесів на станах Стеккеля висвітлені недостатньо. Розрахунки, які виконуються інжиніринговими компаніями при проектуванні схожих станів, мають обмежений доступ. Існуючі обмеження обумовлюють необхідність в розробці залежностей, які будуть широко застосовуватися в інженерних розрахунках температурних процесів прокатки на станах Стеккеля.

Актуальність розрахунків температурних процесів прокатки на стані Стеккеля обумовлена потребою в розширенні асортименту та технічних можливостей при виробництві рулонного прокату на заводі Ferriera Valsider SpA.

Мета роботи

Метою роботи є уточнення методики розрахунку змін температури металу при прокатці на станах Стеккеля, яка враховує фактори швидкості руху полоси, довжину рольгангу та довжину дуги контакту металу з валками, а також фактори, які впливають на температуру розкату в пічних моталках, стосовно до умов стану Стеккеля заводу Ferriera Valsider SpA.

Викладення основного матеріалу

Схема розміщення основного обладнання на прикладі стану Стеккеля заводу Ferrier Valsider SpA наведена на рис. 1.

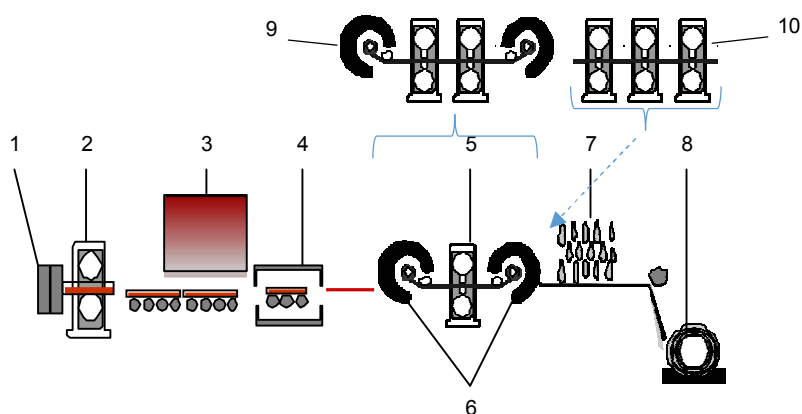


Рис. 1 – Схема технологічної лінії з виробництва гарячекатаних рулонів на заводі Ferriera Valsider SpA:

- 1 – еджер; 2 – чорнова кліть 3170;
3 – штовхальна методична піч; 4 – прохідна роликів піч;
5 – кліть кварто 1780; 6 – пічні моталки;
7 – установка ламінарного охолодження; 8 – моталка;
9 – стан з двома чистовими клітьями кварто; 10 – додаткова група чистових клітей

Відмінною особливістю розрахунку температурного режиму прокатки на стані Стеккеля є необхідність врахування додатково до відомих [11-13] факторів – зміну температури металу в пічних моталках, а також особливостями в розрахунку змін температури розкату на ділянці «стан – пічні моталки».

Сумарний час, який витрачається на втрати тепла випромінюванням та конвекцією на станах Стеккеля, визначається по методиці аналогічній той, що застосовується для чистових груп безперервних станів:

$$\tau_{\Sigma} = \tau + \tau_{t1}, \quad (1)$$

де τ – час, який витрачається на прокатку розкату в кліті, сек;

τ_{t1} – час транспортування розкату між кліттю та пічною моталкою, сек.

Час, який витрачається на прокатку в кліті, рахується по формулі:

$$\tau = \frac{l_q}{v_{roll} \times 1000}, \quad (2)$$

де l_q – довжина дугі контакту, мм; v_{roll} – швидкість прокатки, м/сек.

Час транспортування розкату між кліттю та пічними моталками визначається залежністю:

$$\tau_{t1} = \frac{l_r}{v_{roll}}, \quad (3)$$

де l_r – довжина рольгангу між кліттю та пічною моталкою, м.

Розрахунок змінення температури металу в пічних моталках виконується за наступними залежностями.

Для розрахунку допустимих розмірів заготовки (сляба), який використовується для виробництва гарячекатаного рулону, виконуємо перевірку максимально-можливої маси рулону для змотування в пічній моталці, виходячи з її конкретних технічних характеристик (допустимої маси (M_{\max}) та максимального діаметру рулону який змотується), т:

$$M_{\max/wind} = \left(\frac{\pi D_{\max/coil}^2}{4} - \frac{\pi D_d^2}{4} \right) \times \frac{b}{1000} \times 7,85, \quad (4)$$

де D_d – діаметр пічного барабану, м;

$D_{\max/coil}$ – максимальний діаметр рулону в пічці, за характеристиками обладнання, м; b – ширина прокату, мм; 7,85 – питома щільність сталі, г/мм³.

Розрахунок змінення температури металу в пічній моталці виконуємо для умов одностороннього нагріву термічно тонкого тіла (нескінченної полоси товщиною рівною товщині розкату за час рівний часу намотування останнього вітка на барабан), згідно з залежністю, отриманої із рівняння [1]:

$$t_{met/fur} = t_{fur} - (t_{fur} - t_{met}) \times \exp \left(\alpha_{\Sigma} \times \frac{-\tau_w}{\frac{h}{1000} \times 7,85 \times c_p} \right), \quad (5)$$

де t_{fur} – температура в пічці, °C;

t_{met} – температура металу перед піччю, °C;

α_{Σ} – сумарний коефіцієнт тепловіддачі;

c_p – теплоємність сталі яка прокатується, Дж/(кг К), h – товщина прокату, мм; τ_w – тривалість намотки останнього вітка, сек.

Тривалість намотки останнього вітка на барабан пічної моталки визначаємо з формули:

$$\tau_w = \frac{2\pi R_{d/met}}{v_{rol}}, \quad (6)$$

де $R_{d/met}$ – радіус барабану з металом, м;

v_{rol} – швидкість руху полоси (швидкість прокатки), м/с.

Радіус барабану з металом визначаємо по залежності:

$$R_{d/met} = \sqrt{\frac{h \times l}{\pi \times 1000} + R_d^2}, \quad (7)$$

де h, l – товщина та довжина прокату відповідно, мм;

R_d – радіус барабану пічної моталки, м;

Визначаємо сумарний коефіцієнт тепловіддачі:

$$\alpha_{\Sigma} = \alpha_{conv} + \alpha_{rad}, \quad (8)$$

де α_{conv} – коефіцієнт тепловіддачі через конвекцію;

α_{rad} – коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням.

Коефіцієнт тепловіддачі через конвекцію визначаємо по формулі [2]:

$$\alpha_{conv} = 5,7 + (3,13v_{rol} \times \rho_q) \quad (9)$$

где ρ_q – щільність димових газів, кг/м^3 (для природного газу $0,7 \text{ кг/м}^3$).

Коефіцієнт тепловіддачі випромінювання визначаємо по формулі [1]:

$$\alpha_{rad} = 5,7 \times 0,8 \times \frac{\left(\frac{t_{fur} + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{t_{met} + 273}{100}\right)^4}{t_{fur} - t_{met}}, \quad (10)$$

Теплоємність розраховуємо на підставі наступного рівняння:

$$c_p = 1000 \times \left[(-1 \times 10^{-7}) \times t_{met}^2 + 0,0004t_{met} + 0,4281 \right]. \quad (11)$$

Рівняння (11) отримано шляхом обробки та усереднення даних по середній теплоємності вуглецевих та низьколегованих сталей при різноманітних температурах (табл. 1) [2].

З метою спрощення розрахунків, дані по вуглецевим та низьколегованим маркам сталі на рис. 2 були усереднені, що не знизило точність ($R^2 = 0,9185$), а також дало змогу застосовувати отримане рівняння для обох типів марок сталі.

Таблиця 1

Середня теплоємність вуглецевих та низьколегованих сталей при різноманітних температурах

Тип сталі	Параметр	Величина параметру												
	$t_{met}, ^\circ\text{C}$	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300
Вуглецеві	$c_p, \text{кДж/кг К}$	0,486	0,507	0,523	0,54	0,561	0,59	0,62	0,695	0,695	0,691	0,687	0,682	0,682
Низьколеговані	$c_p, \text{кДж/кг К}$	0,486	0,502	0,519	0,536	0,548	0,586	0,645	0,695	0,687	0,674	0,67	0,67	-

Результати обробки даних табл. 1, наведені на рис. 2.

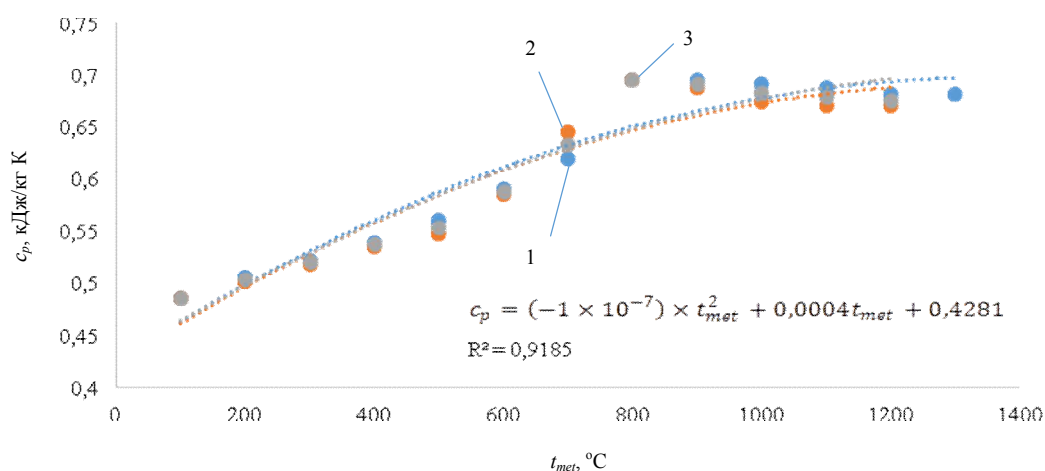


Рис. 2 – Залежність теплоємності вуглецевих (1), низьколегованих (2) сталей, а також середніх значень (3) від температури

Таким чином, рівняння яке було отримане (11) може бути застосовано з достатньою точністю як для розрахунків вуглецевих так і для низьколегованих сталей в діапазоні температур від 100 °С до 1200 °С.

Перевірка отриманих залежностей (1) та (5) була виконана на математичній моделі, яка була адаптована до умов стану Стеккеля, заводу Ferriera Valsider SpA.

Відхилення розрахованих температур прокату від фактичних, отриманих при виробництві гарячекатаних ролонів розмірами 6x1500 мм із мікрولهгованої сталі В638 (аналог Х60 по API 5L) партії CL16/11369А, CL16/20707А склало від 0,09 % до -2,1 % (табл. 2).

Таблиця 2

Результати розрахунку температурного режиму прокатки по розробленим залежностям

№ партії	Кількість проходів в кліті, шт	t_{met} на початку прокатки, °С (факт)	t_{met} наприкінці прокатки, °С (факт)	t_{met} наприкінці прокатки, °С (розрахунок)	Δt , %	Середнє відхилення без врахування залежностей (1 - 3)
CL16/11369А	7	980	875	876	0,09	20,1
CL16/20707А	5	1030	920	901	-2,1	25,9

Середнє відхилення при розрахунку температурного режиму прокатки без врахування розроблених залежностей склало 20,1 % і 25,9 % для партії CL16/11369А, CL16/20707А відповідно. Середнє відхилення без врахування залежностей (1-3) розраховано за усю кількість проходів, так як є більш показовим і відображує середню похибку, а ні накопичену, за всю кількість проходів.

Також, за допомогою адаптованої моделі виконано розрахунок сили прокатки при виробництві ролонів розмірами 6x1500 мм, партія CL16/11369А. Результати розрахунку наведені на рис. 3.

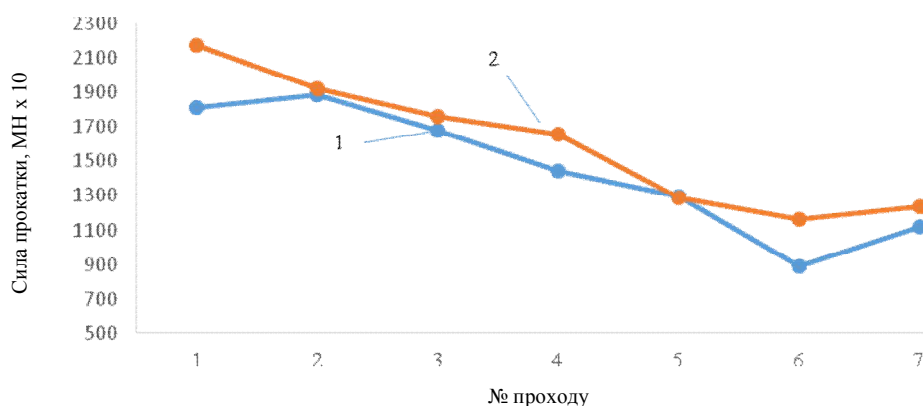


Рис. 3 – Змінення розрахованої (1) та фактичної (2) сили прокатки по проходам на стані Стеккеля при виробництві ролонів розмірами 6x1500 мм

Середнє відхилення розрахованої сили прокатки від фактичної по результатах моделювання склало 9,8 %. Основні відхилення отримані в першому проході та в шостому проході при низьких значеннях навантаження. Дані відхилення потребують додаткового вивчення.

Висновки

1. В цій роботі уточнені особливості розрахунку часу, який витрачається на втрати тепла випромінюванням та конвекцією на станах Стеккеля.

2. Розроблена залежність для визначення змін температури розкату при змотуванні на пічній моталці стану Стеккеля, яка враховує вплив температури пічного простору, температуру металу перед змотуванням, сумарний коефіцієнт тепловіддачі, теплоємність сталі, товщину прокату, тривалість намотування останнього вітка.

3. Похибка розрахунку температури металу з урахуванням запропонованих залежностей перевірена на фактичних даних, отриманих на стані Стеккеля заводу Ferriera Valsider s.p.a. склала від -2,1 % до 0,09 %.

4. Отримані залежності перевірені при розрахунку сили прокатки на адаптованій моделі для стану Стеккеля, середня похибка склала 9,8 %.

Література

1. Матрюков Б.С. Теория, конструкции и расчеты металлургических печей / Б.С. Матрюков. – М. : Металлургия, 1978. – Т. 2. – 272 с.
2. Расчет нагревательных и термических печей: Справочное издание / под ред. В.М. Тымчака и В.Л. Гусовского. – М. : Металлургия, 1983. – 480 с.
3. John G. Lenard. Primer on flat rolling: Second edition / John G. Lenard. – Department of Mechanical and Mechatronics Engineering University of Waterloo. Elsevier Ltd. – Ontario, Canada. – 2014. – 404p.
4. Коновалов Ю.В. Справочник прокатчика. Производство горячекатаных листов и полос: Справочное издание в 2-х книгах / Ю.В. Коновалов. – М. : «Теплотехник», 2008. Книга 1. – 640 с.
5. Кнеппе Г. Экономическое производство полос из коррозионной стали на станах Стеккеля / Г. Кнеппе, В. Роде ; пер. с нем. // Черные металлы, М. : Металлургия. – декабрь 1993. – С. 33-43.
6. Bohlin A. New technologies on Avesta Polarit's Steckel rolling mill / A. Bohlin, H. Nygren, O. Jepsen et al. // MPT International. – 2002. – №6. – P. 56-62. / Прокатное производство. ОАО Черметинформация. Новости черной металлургии за рубежом. Новые технологии на прокатном стане Стеккеля. – 2003. – №3. С. 53-55.
7. Collins L.E. Processing of Niobium-Containing Steels by Steckel Mill Rolling / L.E. Collins // Niobium Science and Technology, Niobium. – Bridgeville. PA. – 2001. – P. 527-542.
8. Braga Flávia Vieira. Recrystallization of niobium stabilized ferritic stainless steel during hot rolling simulation by torsion tests / Flávia Vieira Braga, Diana Pérez Escobarb, Thompson Junior Ávila Reisb, Nilton José Lucinda de Oliveirab, Margareth Spangler Andradeb // Journal of Materials Research and Technology. – 2016. – №5(1). – P.92-99.
9. Collins L. E. Production of High Strength Line Pipe Steel by Steckel Mill Rolling and Spiral Forming / L. E. Collins, F. Hamad, M. Kostic, T. Lawrence // Frontier Pipe Research Unit, IPSCO, P. O. Box 1670, 100 Armour Rd, Regina, SK S4P 3C7, Canada. – 2013. – p. 17.
10. Gray M. Niobium bearing steels in pipeline projects / M. Gray // Niobium science and technology: Proc. Int. Symposium on Niobium, Orlando, Florida, – Dec. 2–5, 2001. – P. 23–45.
11. 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. – P. 1864-1874.
12. 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. – P. 209-212.
13. 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. – P. 310–315.

Надійшла в редакцію 26.03.2018

Kurpe O.G., Kukhar V.V., Zmazneva E.V. **Calculation refinement of metal heat loses on the Steckel rolling mills.**

The thesis improves the calculation methodology of metal heat loss during hot rolling procedure at Steckel mills. The proposed methodology can be implemented at different complexes on the Steckel mill base at all temperature ranges and modes of hot rolling production for carbon and microalloying steel grades. It offers engineering analysis of unaccounted temperature losses of feed by means of radiation and convection, which, in the first time, through the time factor, additionally accounts for strip motion speed factors, roller table length, and also length of rolls contact arc with metal. Regular links between these factors, time spent and value of heat loss, were previously unknown. So the calculation under the available methodologies resulted in significant measures of inaccuracy. The accountability of the above mentioned factors increases the engineering simulation accuracy, ensures the versatility of the elaborated method with respect to different types of Steckel mills and makes the scientific novelty of the study. The formula was developed to calculate the temperature loss while space coiling at the furnace coiler. In the first time the formula accounts for the influence on the temperature of such variables as strip thickness and length, coiling speed, temperature of metal before furnace coiler, inside diameter of the furnace reeling. The calculation of the temperature change was made within one-sided heating of the thermally thin body during the period equal to reeling of the last wrap onto the drum, and this is the remarkable novelty and the academic novelty. The improved model was verified based on actual data from Steckel rolling mill, Ferreria Valsider SpA shop (metallurgical shop successful working in Verona province, Italy, part of the Metinvest Group since 2001). The improved model can be used for hot rolling process technology simulation at the Steckel mills with various in-line equipment arrangement.

Key words: simulation, flat products, temperature conditions, Steckel rolling mill/

References

1. Mastrjukov B.S. Teorija, konstrukcii i raschety metallurgicheskikh pechej. M. Metallurgija, 1978. T. 2. 272 s.
2. Raschet nagrevatel'nyh i termicheskikh pechej: Spravochnoe izdanie. pod red. V.M. Tymchaka i V.L. Gusovskogo. M. Metallurgija, 1983. 480 s.
3. John G. Lenard. Primer on flat rolling: Second edition. John G. Lenard. Department of Mechanical and Mechatronics Engineering University of Waterloo. Elsevier Ltd. Ontario, Canada. 2014. 404p.
4. Konovalov Ju.V. Spravochnik prokatchika. Proizvodstvo gorjachekatanyh listov i polos: Spravochnoe izdanie v 2-h knigah. M. «Teplotehnik», 2008. Kniga 1. 640 s.
5. Knepe G. Jekonomicheskoe proizvodstvo polos iz korrozionnoj stali na stanah Stekkelja. G. Knepe, V. Rode ; per. s nem. Chernye metally, M. Metallurgija. dekabr' 1993. S. 33-43.
6. Bohlin A. New technologies on Avesta Polarit's Steckel rolling mill / A. Bohlin, H. Nygren, O. Jepsen et al. MPT International. 2002. №6. P. 56-62. Prokatnoe proizvodstvo. OAO Chermetininformacija. Novosti chernoj metallurgii za rubezhom. Novye tehnologii na prokatnom stane Stekkelja. 2003. №3. S. 53-55.
7. Collins L.E. Processing of Niobium-Containing Steels by Steckel Mill Rolling. Niobium Science and Technology, Niobium. Bridgeville. PA. 2001. P. 527-542.
8. Bragaa Flávia Vieira. Recrystallization of niobium stabilized ferritic stainless steel during hot rolling simulation by torsion tests. Flávia Vieira Bragaa, Diana Pérez Escobarb, Thompson Junior Ávila Reisb, Nilton José Lucinda de Oliveirab, Margareth Spangler Andradeb. Journal of Materials Research and Technology. 2016. №5(1). P.92-99.
9. Collins L. E. Production of High Strength Line Pipe Steel by Steckel Mill Rolling and Spiral Forming. L. E. Collins, F. Hamad, M. Kostic, T. Lawrence. Frontier Pipe Research Unit, IPSCO, P. O. Box 1670, 100 Armour Rd, Regina, SK S4P 3C7, Canada. 2013. p. 17.
10. Gray M. Niobium bearing steels in pipeline projects. M. Gray. Niobium science and technology: Proc. Int. Symposium on Niobium, Orlando, Florida, Dec. 2-5, 2001. P. 23-45.
11. 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. P. 1864-1874.
12. 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. P. 209-212.
13. 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. P. 310-315.