

Список использованных источников:

1. Николаев В.А. Теория прокатки: Монография. - Запорожье: Издательство Запорожской государственной инженерной академии, 2007. - 228с.
2. Андреюк Л.В. Аналитическая зависимость сопротивления деформации сталей и сплавов от их химического состава / Л.В. Андреюк, Г.Г. Тюленев, Б.С. Прицкер // Сталь. – 1972. – № 6. – С. 522-523.
3. Яковченко А.В. Определение напряжения течения металла с учетом истории процесса нагружения на основе уравнения А.Надаи / А.В.Яковченко, Н.И.Ивлева, А.А. Пугач //Наук. пр. ДонНТУ, сер.Металургія. – Донецьк: ДонНТУ, 2010. – Вип.. 12(177).- С.181-193.
4. Винарский М.С. Планирование эксперимента в технологических исследованиях : учеб. пособие / М.С. Винарский, М.В Лурье. – К.: Техника, 1975. – 168 с.
5. Полухин П.И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов: Справочник / П.И. Полухин, Г.Я. Гун, А.М. Галкин. – М.: Металлургия, 1983. -352с.
6. Андреюк Л.В. Аналитическая зависимость сопротивления деформации металла от температуры, скорости и степени деформации/Л.В. Андреюк, Г.Г. Тюленев //Сталь. – 1972. - №6. – С. 825-828.

Bibliography:

1. Nikolaev V.A. Theory of rolling: Monograph. - Zaporozhia: Publishing house of the Zaporozhia state engineering academy, 2007. - 228p. (Rus.)
2. Andreyuk L.V. Analytical dependence of resistance deformation of steels and alloys on their chemical composition / L.V. Andreyuk, G.G. Tyulenev, B.S. Pricker // Steel. – 1972. – №6. – p. 522, 523. (Rus.)
3. Yakovchenko A.V. Determination of tension of flow of metal taking into account history of process of ladening on the basis of equalization of A.Nadai / A.V.Yakovchenko, N.I.Ivleva, A.A.Pugach //DONNTU – Donetsk: DONNTU, 2010. 12(177) - P.181-193. (Rus.)
4. Vinarskiy M.S. Planning of experiment in technological researches: studies. manual / M.S. Vinarskiy, M.V Lur'e. – K.: of Technician, 1975. – 168p. (Rus.)
5. Polukhin P.I. Resistance the flowage of metals and alloys: Reference book / P.I. Polukhin, G.Y. Gun, A.M. Galkin. – M.: Metallurgy, 1983. -352p. (Rus.)
6. Andreyuk L.V. Analytical dependence of resistance deformation of metal on a temperature, speed and degree of deformation/L.V. Andreyuk, G.G. Tyulenev //Steel. – 1972. - №6. – P. 825-828. (Rus.)

Рецензент: Е.Н. Смирнов
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ДонНТУ»

Статья поступила 30.11.2011

УДК 621.7-97: 621.771.016: 621.771.23

©Сердюк И.А.¹, Хаджинов А.С.², Дворников С.Г.³, Холодный А.А.⁴, Присяжный А.Г.⁵

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРЫ РАСКАТА В
ПРОЦЕССЕ ГОРЯЧЕЙ ЛИСТОВОЙ ПРОКАТКИ МЕТОДОМ
КРИТЕРИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ**

В статье на основе классических уравнений, описывающих процессы теплообмена, предложена математическая модель расчета среднemasсовой температуры металла при горячей листовой прокатке, учитывающая все основные статьи теплового баланса и в достаточной степени соответствующая экспериментальным данным.

Ключевые слова: тепловой поток, температура раската, излучение, конвекция, пленочное кипение, работа деформации.

¹ канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

² канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

³ студент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

⁴ студент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

⁵ старший преподаватель, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

Сердюк І.О., Хаджинов О.С., Дворніков С.Г., Холодний О.А., Присяжний А.Г., Математична модель розрахунку температури розкату в процесі гарячої листової прокатки методом критеріальних рівнянь. В статті на основі класичних рівнянь, що описують процеси теплообміну, запропонована математична модель розрахунку середньомасової температури металу при гарячій листовій прокатці, яка враховує всі основні статті теплового балансу й в достатньому ступені відповідає експериментальним даним.

Ключові слова: тепловий потік, температура розкату, випромінювання, конвекція, плівкове кипіння, робота деформації.

I.O. Serdiuk, O.S. Chadzhinov, S.G. Dvornikov, O.A. Chlodniy, A.G. Prisyazhnyj. Mathematical model for the calculation of temperature of metal in the process of the hot rolling of sheets by the method of criteria equations. In the article on the basis of classical equation, which describe the processes of heat exchange, a mathematical model is offered for the calculation of average temperature of metal at hot rolling of sheets, which takes into account all of principal items of thermal balance and corresponds substantially to the experimental data.

Keywords: thermal stream, rolling temperature, radiation, convection, film boiling, work of deformation.

Постановка проблеми. Температурный режим горячей листовой прокатки оказывает существенное влияние на геометрические, физические, кинематические, энергосиловые параметры процесса деформации [1], а также структуру и, следовательно, свойства получаемого проката [2-5]. Поэтому правильное определение температуры раската в каждом пропуске при проектировании новых, а также расширении сортамента и совершенствовании технологии (в частности, технологии высокотемпературной термомеханической обработки различных сталей) в условиях действующих листопркатных станов является в настоящее время достаточно актуальной задачей.

Анализ последних исследований и публикаций. Методы количественной оценки температурных условий получения горячекатаного проката предложены во многих научных трудах известных отечественных и зарубежных ученых таких, как В.А. Тягунов, Г.П. Иванцов, М.А. Зайков, Н.Н. Крейндин, А.И. Целиков, А.П. Чекмарев, В.П. Полухин, Ю.Д. Железнов, М.М. Сафьян, С.Л. Коцарь, Ю.В. Коновалов, В. Тринкс, Х. Венцель, О. Павельски, И. Шварцер и др. Выше указанные методы наиболее обстоятельно рассмотрены авторами работ [6,7], на основе которых можно выделить два основных направления решения температурной задачи горячей прокатки. Одно из них базируется на статистическом анализе результатов экспериментальных исследований, а другое (более строгое и универсальное) – на теоретических зависимостях процессов теплопередачи.

Область применения статистических моделей ограничена в связи с тем, что она основана на использовании данных, полученных в конкретных условиях.

Более предпочтительным является второе из указанных выше направлений решения температурной задачи горячей прокатки. Однако, известные модели, построенные на законах теплофизики, учитывают различные и не все статьи теплового баланса прокатываемой полосы, предложены в разное время действия различных систем единиц измерения, привносятся тем самым существенный разноразмерности входящих единиц и соответствующих коэффициентов [6], а также в большей степени соответствуют условиям прокатки в чистовых группах широкополосных станов и чистовых клетях толстолистовых станов [7]. В связи с этим использование указанных моделей для расчета температурных режимов получения горячекатаной листовой стали может привести к значительным погрешностям.

Цель статьи – на основе критериальных уравнений теплообмена предложить уточненную математическую модель расчета температуры раската, наиболее полно и теоретически строго учитывающую статьи теплового баланса в условиях горячей прокатки на листовых станах различных типов.

Изложение основного материала. В модели критериальных уравнений излучение описано уравнением, основанным на известном законе Стефана-Больцмана [6,7]. При этом тепло-

вой поток излучением определяется так:

$$Q_l = q_l \cdot F_{нов}, \quad (1)$$

где q_l – плотность теплового потока излучением, Вт/м²;
 $F_{нов}$ – площадь поверхности раската, м².

Плотность теплового потока излучением рассчитывается по формуле:

$$q_l = \sigma_0 \cdot \varepsilon_{Me} \cdot (T_{Me}^4 - T_в^4), \quad (2)$$

где $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ – постоянная Стефана-Больцмана, Вт/(м²·К⁴);
 ε_{Me} – степень черноты, равная согласно данным В.Х. Мак-Адамса [6] 0,8 во всем диапазоне температур горячей прокатки углеродистых сталей;
 T_{Me} – температура металла перед пропуском, К;
 $T_в$ – температура воздуха, К.

Зависимость плотности теплового потока излучением от температуры металла в интервале 750-1250 °С при постоянных температуре воздуха и степени черноты металла представлена на рис.1.

Анализ расчетных данных, проведенный авторами работы [7], показывает, что в большей части цикла горячей прокатки листовой стали в условиях широкополосных и толстолистовых станов преобладает теплоотдача при свободной (или естественной) конвекции. Интенсивность свободного конвективного теплообмена, зависящего от свойств окружающей среды, характеризуется коэффициентом теплоотдачи, который в рассматриваемом случае определяется безразмерным критерием Нуссельта, рассчитываемым на основе классической формулы Лоренца по методике, подробно изложенной в работах [8-10] и соответствующей фактическим условиям горячей деформации металла на листовых прокатных станах, когда течение охлаждающего раската потока воздуха происходит в турбулентном режиме. При этом тепловой поток конвекцией равен:

$$Q_k = q_k \cdot F_{нов}, \quad (3)$$

где q_k – плотность теплового потока конвекцией, Вт/м².

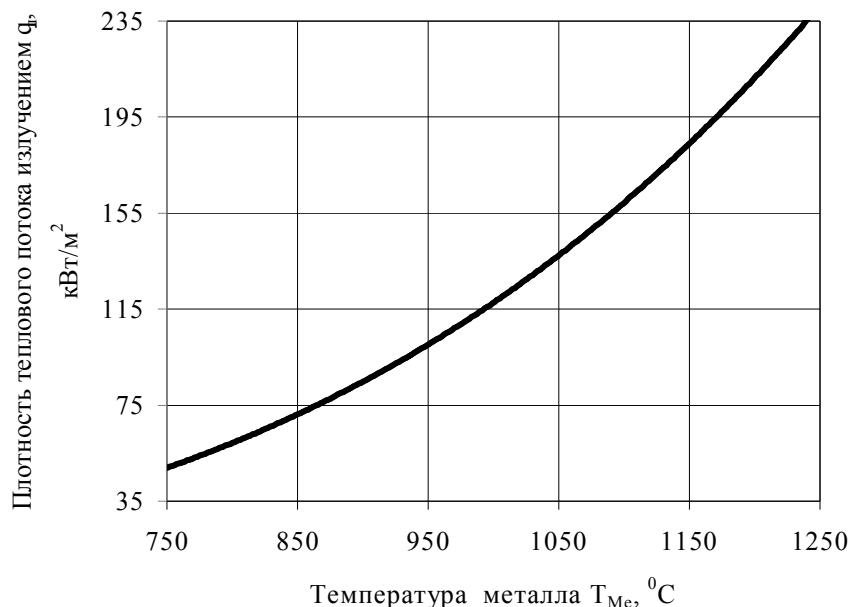


Рис. 1 – Зависимость плотности теплового потока излучением от температуры металла при температуре воздуха $t_в = 20$ оС и степени черноты металла $\varepsilon_{Me} = 0,8$

Плотность теплового потока конвекцией вычисляется на базе общего уравнения теплопередачи Ньютона-Рихмана [6], критерия Нуссельта и связанных с ним критериев Грасгофа и Прандтля:

$$q_k = \alpha_k \cdot (T_{Me} - T_в), \quad (4)$$

$$\alpha_k = \frac{Nu \cdot \lambda_g}{l}, \quad (5)$$

$$Nu = 0,135 \cdot (Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{3}}, \quad (6)$$

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot l^3}{\nu^2}, \quad (7)$$

$$Pr = \frac{\nu}{a}, \quad (8)$$

где α_k – коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/(м²·К);
 Nu – критерий Нуссельта;
 λ_g – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·К);
 l – характерный размер охлаждаемой поверхности, равный ширине листа b , м; Gr и Pr – соответственно критерии Грасгофа и Прандтля;
 g – ускорение свободного падения, м/с²;
 β – температурный коэффициент объемного расширения воздуха, 1/К;
 ΔT – разность температур между поверхностью раската и воздухом, К;
 ν – кинематический коэффициент вязкости воздуха, м²/с;
 a – коэффициент температуропроводности воздуха, м²/с.

После детального анализа зависимости критерия Нуссельта от основных условий теплообмена, в частности, теплофизических свойств воздуха, значения которых приведены в справочной литературе [9,10], и совместного решения уравнений (4)-(8) для определения плотности теплового потока конвекцией получено аналитическое выражение:

$$q_k = 1,62 \cdot \sqrt[3]{(T_{Me} - T_g)^4}. \quad (9)$$

Графическое изображение зависимости плотности теплового потока при конвекции от температуры раската при постоянной температуре воздуха представлено на рис.2. Сравнительный анализ кривых, приведенных на рис.1 и 2, показывает, что при снижении температуры металла в интервале от 1250 до 750 °С часть конвективной составляющей теплового баланса от тепловых потерь за счет излучения увеличивается в 2,5 раза (от 8 до 20%), т.е. влияние теплоотдачи конвекцией на среднемассовую температуру прокатываемой в последних пропусках полосы заметно усиливается.

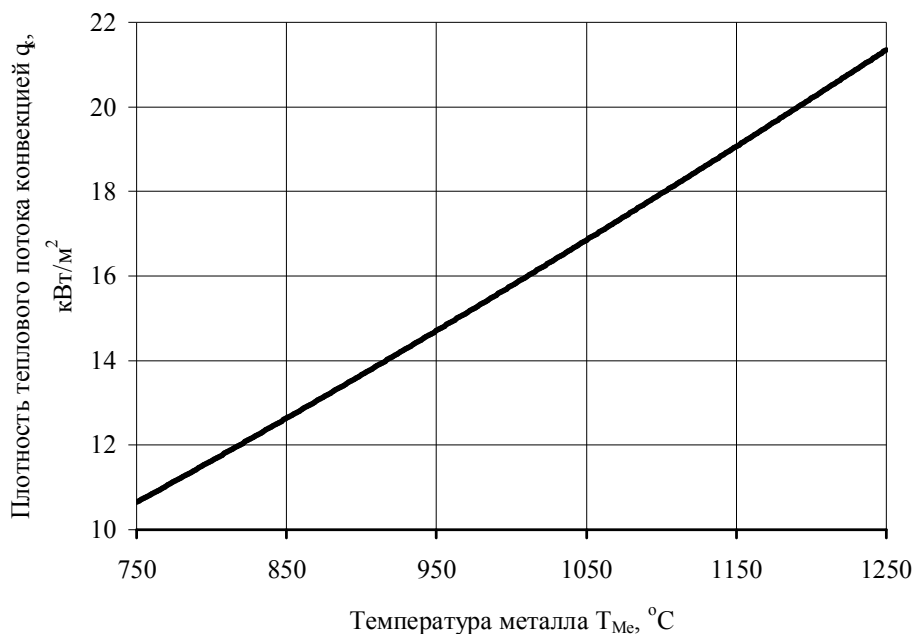


Рис2. – Зависимость удельного теплового потока конвекцией от температуры металла при температуре воздуха $t_g=20$ °С

В зоне действия гидросбива окалины уменьшение теплосодержания металла происходит за счет теплоотдачи, представляющей собой конвективный процесс с фазовым переходом воды в пар. При этом важно отметить, что довольно большой перепад между температурой поверхности раската и охлаждающей воды вместе с относительно малой продолжительностью их контакта обуславливает преобладание пленочного режима кипения [11,12], определяющего в данном случае интенсивность теплообмена и, следовательно, среднemasсовую температуру металла. Для указанных условий охлаждения тепловой поток и его плотность рассчитываются на основе указанного выше общего уравнения теплопередачи Ньютона-Рихмана, а коэффициент теплоотдачи вычисляется через критерий Нуссельта, который рекомендуется определять в зависимости от теплофизических свойств воды и пара на линии насыщения по формуле, предложенной П. Бернсоном [9]:

$$Q_z = q_z \cdot F_z, \tag{10}$$

$$q_z = \alpha_{кин} \cdot (T_{Me} - T_{нас}), \tag{11}$$

$$\alpha_{кин} = \frac{Nu \cdot \lambda_{ж.нас}}{X}, \tag{12}$$

$$Nu = 0,425 \cdot \left[\frac{X^3 \cdot \rho_{пар} \cdot (\rho_{ж.нас} - \rho_{пар}) \cdot g}{\mu_{пар} \cdot \lambda_{пар} \cdot \Delta T} \cdot (r_{fg} + 0,4 \cdot c_{p,пар} \cdot \Delta T) \right]^{\frac{1}{4}}, \tag{13}$$

$$X = \sqrt{\frac{\gamma}{g \cdot (\rho_{ж.нас} - \rho_{пар})}}, \tag{14}$$

- где q_z – плотность теплового потока в зоне действия гидросбива, Вт/м²;
 F_z – площадь действия гидросбива, м²;
 $\alpha_{кин}$ – коэффициент теплоотдачи при кипении воды, Вт/(м²·К);
 $T_{нас}$ – температура насыщения, К;
 $\lambda_{ж.нас}$ – коэффициент теплопроводности воды на линии насыщения, Вт/(м·К);
 X – характеристическая длина, м;
 $\rho_{пар}$ – плотность пара на линии насыщения, кг/м³;
 $\rho_{ж.нас}$ – плотность воды на линии насыщения, кг/м³;
 $\mu_{пар}$ – динамическая вязкость пара на линии насыщения, Н·с/м²;
 $\lambda_{пар}$ – коэффициент теплопроводности пара на линии насыщения, Вт/(м·К);
 ΔT – перепад температуры, К;
 r_{fg} – скрытая теплота парообразования, Дж/кг;
 $c_{p,пар}$ – удельная теплоемкость пара при постоянном давлении, Дж/(кг·К);
 γ – поверхностное натяжение, Н/м.

После подстановки в формулы (12)-(14) значений теплофизических свойств насыщенных воды и пара, соответствующих справочной литературе [9,10], и некоторых преобразований получена аналитическая зависимость для определения плотности теплового потока в зоне действия гидросбива окалины:

$$q_z = 6 \cdot 10^3 \cdot (T_{Me} - T_{нас.n}). \tag{15}$$

Так как работа деформации сопровождается выделением тепла, его также необходимо учитывать в балансе температур. Для этой цели использована известная формула Финка, в соответствии с которой уравнение энергии, превращаемой в тепло в процессе работы пластического формоизменения, можно выразить так:

$$Q_\delta = (1 - \delta) \cdot p_{cp} \cdot V \cdot \ln \frac{H}{h}, \tag{16}$$

- где δ – доля латентной, поглощенной металлом, энергии от работы деформации;
 p_{cp} – среднее давление металла на валки, МПа;
 V – объем деформируемого металла, м³;

H и h – соответственно толщина полосы до и после пропуски, м.

В общем случае латентная (поглощенная) энергия существенно зависит от температурно-скоростных условий деформирования металла и наиболее точно может быть определена по методике, изложенной в работе [6]. Анализ диапазонов возможных значений температуры и скорости деформации при горячей прокатке стали на широкополосных и толстолистовых станах, а также результаты исследований, предоставленные авторами источника [6], показывают, что в данном случае с достаточной для инженерных расчетов точностью доля латентной (поглощенной) энергии может быть принята равной 0,2. Таким образом, погрешность количественной оценки приращения теплосодержания раската за счет диссипации энергии при пластической деформации будет в основном зависеть от правильности расчета среднего контактного нормального напряжения. В соответствии с рассматриваемой математической моделью среднее давление металла на валки вычисляется методом итераций, т.е. последовательных приближений, по формуле, предложенной автором работы [13]. Указанная формула получена в результате уточненного решения дифференциального уравнения давления металла на валки, в большей степени отражающего реальные условия горячей прокатки на листовых станах.

Определив все перечисленные статьи теплового баланса, находим суммарный тепловой поток и падение температуры в каждом пропуске соответственно:

$$Q_{\Sigma} = Q_{\lambda} + Q_{\kappa} + Q_{\zeta} - Q_{\theta}, \quad (17)$$

$$\Delta t = \frac{E}{c \cdot m}, \quad (18)$$

где E – суммарная потеря тепла, Дж;
 c – теплоемкость металла, Дж/(кг·К);
 m – масса раската, кг.

Суммарная потеря тепла составляет:

$$E = Q_{\Sigma} \cdot (\tau_m + \tau_n), \quad (19)$$

где τ_m – машинное время, с;
 τ_n – время паузы, с.

Реализация модели выполнена с помощью ЭВМ-программы. Адекватность модели определялась путем сопоставления расчетных данных и практических, полученных на толстолистовом стане 3000 ПАО «ММК им. Ильича» при прокатке листов из углеродистых марок сталей. Расхождение расчетных и практических данных не превысило 10%.

Выводы

1. На базе критериальных уравнений теплофизики предложена математическая модель расчета температуры раската в процессе горячей листовой прокатки, довольно строго учитывающая все основные статьи теплового баланса прокатываемой полосы: потери тепла излучением, конвекцией и в зоне действия гидросбива окалины, а также прирост тепловой энергии вследствие работы деформации.
2. Апробация предложенной математической модели подтверждает достаточное соответствие между расчетными и экспериментальными данными.

Список использованных источников:

1. Теория прокатки : справочник / А.И. Целиков, А.Д. Томленов, В.И. Зюзин [и др.] – М. : Металлургия, 1982. – 335 с.
2. Коновалов Ю.В. Справочник прокатчика. Справочное издание в 2-х книгах. Книга 1. Производство горячекатаных листов и полос / Ю.В. Коновалов. – М. : «Теплотехник», 2008. – 640 с.
3. Технология процессов прокатки и волочения. Листопркатное производство : учебник / М.М. Сафьян, В.Л. Мазур, А.М. Сафьян, А.И. Молчанов. – К. : «Выща школа», 1988. – 352 с.
4. Технология процессов обработки металлов давлением / П.И. Полухин, А. Хензель, В.П.

- Полухин [и др.] – М. : Metallurgy, 1988. – 408 с.
5. Грудев А.П. Технология прокатного производства : учебник для вузов / А.П. Грудев, Л.Ф. Машкин, М.И. Ханин. – М. : Metallurgy, 1994. – 656 с.
6. Процесс прокатки / М.А. Зайков, В.П. Полухин, А.М. Зайков, Л.Н. Смирнов. – М. : МИСИС, 2004. – 640 с.
7. Коновалов Ю.В. Расчет параметров листовой прокатки : справочник / Ю.В. Коновалов, А.Л. Остапенко, В.И. Пономарев. – М. : Metallurgy, 1986. – 430 с.
8. Кулинченко В.Р. Справочник по теплообменным расчетам / В.Р. Кулинченко. – К. : Техника, 1990. – 165 с.
9. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров : справочник / Х. Уонг. – М. : Атомиздат, 1979. – 216 с.
10. Казанцев Е.И. Промышленные печи : справочное руководство для расчетов и проектирования / Е.И. Казанцев. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Metallurgy, 1975. – 368 с.
11. Кривандин В.А. Metallurgical stoves : учеб. пособие / В.А. Кривандин, Б.Л. Марков. – М. : Metallurgy, 1977. – 450 с.
12. Михеев М.А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева. – Изд. 2-е, стереотип. – М. : «Энергия», 1977. – 344 с.
13. Старченко Д.И. Динамика продольной прокатки : учеб. пособие / Д.И. Старченко. – К. : ИСИО, 1994. – 400 с.

Bibliography:

1. Theory of rolling : reference book / A.I. Zelikov, A.D. Tomlenov, V.I. Zyuzin [and other] - M. : Metallurgy, 1982. – 335 p. (Rus.)
2. Konovalov Yu.V. Reference book of roll. Certificate edition is in 2th books. Book 1. Production of hot rolled folias and bars / Yu.V. Konovalov. - M. : "Heating engineer", 2008. - 640 p. (Rus.)
3. Technology of processes of rolling and dragging. Production of sheets : textbook / M.M. Safian, V.L. Mazur, A.M. Safian, A.I. Molchanov. – K. : « Higher school », 1988. – 352 p. (Rus.)
4. Technology of processes of treatment of metals pressure / P.I. Polukhin, A. Khenzel, V.P. Polukhin [and other] - M. : Metallurgy, 1988. – 408 p. (Rus.)
5. Grudev A.P. Technology of rental production : textbook for the institutes of higher / A.P. Grudev, L.F. Mashkin, M.I. Khanin. - M. : Metallurgy, 1994. – 656 p. (Rus.)
6. Process of rolling / M.A. Zaykov, V.P. Polukhin, A.M. Zaykov, L.N. Smirnov. - M. : MISIS, 2004. – 640 p. (Rus.)
7. Konovalov Yu.V. Calculation of parameters of the sheet rolling : reference book / Yu.V. Konovalov, A.L. Ostapenko, V.I. Ponomarev. - M. : Metallurgy, 1986. – 430 p. (Rus.)
8. Kulichenko V.R. Reference book on heat-exchange calculations / V.R. Kulichenko. – K. : Tekhnika, 1990. – 165 p. (Rus.)
9. Uong Kh. Basic formulas and information on a heat exchange for engineers : reference book / Kh. Uong. - M. : Atomizdat, 1979. – 216 p. (Rus.)
10. Kazancev E.I. Industrial stoves : reference guide for calculations and planning / E.I. Kazancev. – Publ. 2th, processed and complemented. - M. : Metallurgy, 1975. – 368 p. (Rus.)
11. Krivandin V.A. Metallurgical stoves : studies. manual / V.A. Krivandin, B.L. Markov. - M. : Metallurgy, 1977. – 450 p. (Rus.)
12. Mikheev M.A. Bases of heat-transfer / M.A. Mikheev, I.M. Mikheeva. – Publ. 2th, stereotype. - M. : «Energy», 1977. – 344 p. (Rus.)
13. Starchenko D.I. Dynamics of the longitudinal rolling : studies. manual / D.I. Starchenko. – K. : ISIO, 1994. – 400 p. (Rus.)

Рецензент: В.А. Маслов
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ЛГТУ»

Статья поступила 26.05.2011