

deteriorated; with the introduction into restorative mixture of brown coal in the amount of 35 % at a flow rate of semi-coke of 27 % and coke of 38 % the electrical performance of the furnace stabilized, gas permeability of the furnace throat recovered. The best performance was achieved with the introduction into restorative mixture of semi-coke of 32,5 %, a further increase of its quantity affects the performance of the furnace.

Keywords: manganese ore, coke, semi-coke, specific energy consumption, reduction mix.

REFERENCES

1. Zhuchkov V.I., Rozenberg V.L., Elkin K.S., Zel'berg B.I. *Elektricheskie parametry i konstruksii rudovosstanovitel'nykh elektropetchei* [Electrical parameters and constructions of ore-reducing electric furnaces]. Chelyabinsk: Metall, 1994. 192 p. (In Russ.).
2. Gasik M.I. *Marganets* [Manganese]. Moscow: Metallurgiya, 1992. 608 p. (In Russ.).
3. Kulinich V.I., Pirogov V.I., Matvienko V.A., Kozhevnikov V.A. New approaches to melting technique management by slag and non-slag oxide reduction processes in conditions of working electric circuit. *Elektrometallurgiya*. 2000, no. 7, pp. 19–22. (In Russ.).
4. Stepanov S.G., Morozov A.B., Islamov S.R. New energy-saving ecologically pure receiving technology of carbonaceous sorbents in Krasnoyarsk. *Krasnoyarskenergonadzor*. 2003, Issue 1. (In Russ.).
5. Romanenko Yu.E., Rozhikhina I.D. Investigation of the electrical resistance of manganese ores. In: *Trudy 16-i Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Prirodnye i intellektual'nye resursy Sibiri"* [Proceedings of 16th International Academic and Research Conference "Natural and intellectual resources of Siberia"], Tomsk: SAN VSh; V-Spektr, 2010, pp. 33–37. (In Russ.).
6. Romanenko Yu.E., Rozhikhina I.D., Nokhrina O.I. Investigation of the softening temperature and the electrical resistivity of manganese ores. In: *Sovremennye problemy elektrometallurgii stali: materialy XIV Mezhdunarodnoi konferentsii* [Modern issues of electrometallurgy of steel: proceedings of XIVth International Conference]. Roshchin V.E. ed. Chelyabinsk: Izdatel'skii tsentr YuUrGU, 2010. Part 1, pp. 111–115. (In Russ.).
7. Strakhov V.M. The study of physical and chemical properties of mixtures of reducing agents for the smelting of ferroalloys. In: *Sovershenstvovanie proizvodstva ferrosilitsiya na Kuznetskom zavode ferrosplavov* [Improvement of ferrosilicon production at Kuznetsk ferroalloy plant]. Novokuznetsk: izd. KZF, 1969, pp. 74–81. (In Russ.).
8. Eremin I.V., Boronets T.M. *Marochnyi sostav uglei i ikh ratsional'noe ispol'zovanie: spravochnik* [Grade coal compositions and their rational usage: reference-book]. Moscow: Nedra, 1994. 254 p. (In Russ.).

Acknowledgements. The work was performed within the frames of the project part of the state task of Russian Ministry of Education and Science in the sphere of research in 2014 / 2016.

Received May 14, 2014

УДК 621.771:621.74

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ ВАЛКИ – ПОЛОСА ПРИ ПРОКАТКЕ ШИРОКОПОЛОЧНОЙ БАЛКИ В КЛЕТЯХ УНИВЕРСАЛЬНО-БАЛОЧНОГО СТАНА. СООБЩЕНИЕ 2

Лехов О.С., д.т.н., профессор (MXLehov38@yandex.ru)

Российский государственный профессионально-педагогический университет
(620012, Россия, г. Екатеринбург, ул. Машиностроителей, 11)

Аннотация. Изложена методика и результаты решения задачи определения поля температур и термоупругих напряжений в горизонтальных валках при прокатке широкополочной балки в клетях универсально-балочного стана. Поставлена и решена задача определения поля температур бандажированных валков. Представлен алгоритм определения термоупругих напряжений в горизонтальных валках известному полю температур. Приведены эпюры тангенциальных термоупругих напряжений по сечению горизонтального валка при прокатке балок в универсальной клетке. Показано влияние коэффициента теплоотдачи при охлаждении валков водой на уровень тангенциальных напряжений. Теоретическими исследованиями установлена величина растягивающих тангенциальных напряжений, снижающих стойкость горизонтальных валков универсальных клетей. Определено суммарное поле напряжений в горизонтальном бандажированном валке от усилия прокатки и циклического температурного воздействия с учетом остаточных напряжений. Приведены рекомендации для повышения стойкости бандажированных валков универсально-балочного стана.

Ключевые слова: широкополочная балка, прокатка, напряженно-деформированное состояние, вертикальные и горизонтальные валки, метод конечных элементов, модуль упругости, сопротивление пластической деформации, тангенциальные и радиальные напряжения.

В работе [1] были представлены результаты определения напряженно-деформированного состояния металла в очаге деформации, а также напряжения в валках от усилия прокатки.

Основными нагрузками, действующими на двухслойные горизонтальные валки, являются нагрузки, возникающие при посадке двухслойного бандажа на ось, циклическая нагрузка от усилия прокатки и циклическая температурная нагрузка, возникающая в процессе работы валка. Кроме указанных, в этих валках действуют еще остаточные напряжения, возникшие в области двухслойного бандажа при его изготовлении.

Используя аппарат линейной термической упругости, компоненты тензора напряжений, возникающие в горизонтальном бандажированном двухслойном валке, можно записать в виде суммы $\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^{\delta} + \sigma_{ij}^{\Lambda} + \sigma_{ij}^P + \sigma_{ij}^T$,

где σ_{ij}^δ , σ_{ij}^Δ и σ_{ij}^P – напряжения, возникающие при изготовлении двухслойного банджа, при посадке банджа на ось с заданным натягом и вызванные нагрузкой от усилия прокатки; σ_{ij}^T – температурные напряжения, возникающие при прокатке.

Для определения величины σ_{ij}^T следует сначала найти температурное поле, возникающее в валках при прокатке, затем по найденному полю температур определить термоупругие напряжения.

В соответствии с принятой конструкцией системы охлаждения валков при прокатке действуют следующие температурные граничные условия: контакт с горячим металлом в очаге деформации, нагрев излучением от горячего металла, а также водяное и воздушное охлаждения. Водяное охлаждение и излучение действует в зоне катающих поверхностей валков, а воздушное – на их боковых поверхностях.

Вследствие необходимости учета отвода тепла в осевом направлении валков из-за малой ширины их бочек, определение температурных полей необходимо выполнять в объемной постановке.

Температурное поле валков определяется на основе решения уравнения нестационарной теплопроводности с соответствующими начальными и граничными условиями [2]:

$$c\rho \frac{dT}{dt} = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} \right), \quad (1)$$

где c – теплоемкость; ρ – плотность; λ – коэффициент теплопроводности.

Все коэффициенты принимаем в зависимости от температуры валков. Начальное условие для функции $T(\vec{X}, t)$ имеет вид

$$T(\vec{X}, t) = T_0(\vec{X}). \quad (2)$$

Для катающих поверхностей валков принимаются граничные условия третьего рода, представляющими собой заданный тепловой обмен по закону Ньютона:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = -a_1(T - T_b) + q \text{ на } S_1; \quad (3)$$

для боковых поверхностей валков

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = -a_2(T - T_b) \text{ на } S_2; \quad (4)$$

для зон контакта валков с металлом

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = -a_3(T_m - T) \text{ на } S_3; \quad (5)$$

здесь a_1 , a_2 и a_3 – соответственно коэффициенты теплоотдачи при охлаждении водой, воздухом и коэффициент контактной теплопередачи от излучаемого металла; $T_b = 30^\circ\text{C}$ – температура окружающего воздуха;

T_m – температура металла балки; q – тепловой поток от излучаемого металла; S_1 – катающие поверхности валков, охлаждаемые водой; S_2 – боковые поверхности валков, охлаждаемые воздухом; S_3 – зона контакта валков с балкой (очаг деформации).

Величину теплового потока q от излучаемого металла записываем в соответствие с законов Стефана-Больцмана [2, 3]:

$$q = \varepsilon_\sigma \varepsilon_b c_0 z (T_{п.в}^4 - T_{п.б}^4), \quad (6)$$

где ε_σ и ε_b – степень черноты материала балки и валка; c_0 – постоянная Стефана-Больцмана; $z = 1 \div 0$ – коэффициент взаимооблучения; $T_{п.в}$ и $T_{п.б}$ – температура поверхности валка и балки.

Уравнения (2) – (6) образуют начальную краевую задачу определения нестационарного поля температур для несвязанной задачи теплопроводности.

По найденному полю температур в последующем в каждый момент времени можно определить поля деформаций и температурных напряжений в соответствии с ниже представленным алгоритмом.

Для того, чтобы учесть температурные эффекты, обычно исходят из предположения, что упругая и температурная деформации аддитивны. Тогда можно записать основное определяющее соотношение для напряжений в следующем виде:

$$\sigma_{ij} = \sum_{k,l=1}^3 C_{ijkl} (\varepsilon_{kl} - \alpha_{kl} \Delta T); \quad (7)$$

здесь σ_{ij} , ε_{kl} и C_{ijkl} – компоненты тензора напряжений, деформаций и упругих постоянных; α_{kl} – тензор коэффициентов термического расширения; $\Delta T = T - T_0$ – изменение температуры, отсчитанное от естественного (ненапряженного и недеформированного) состояния.

Соотношение (7), называемое соотношением Дюамеля-Неймона, лежит в основе линейной термической упругости [4].

Для тел, механические и теплофизические свойства которых изотропны, выражение (7) принимает следующий вид:

$$\sigma_{ij} = 2G \left(\varepsilon_{ij} + \frac{\mu}{1-2\mu} e \delta_{ij} - \frac{1+\mu}{1-2\mu} \alpha_{kl} \Delta T \delta_{ij} \right), \quad (8)$$

где G – модуль сдвига; μ – коэффициент Пуассона; δ_{ij} – символ Кронекера; $e = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z$ – объемное расширение.

Последнее слагаемое в правой части формулы (8) отражает влияние на напряжения температурной деформации.

Если ввести обозначение

$$\sigma_{ij}^0 = -2G \frac{1+\mu}{1-2\mu} \alpha_{kl} \Delta T \delta_{ij}, \quad (9)$$

то определяющее уравнение (8) примет вид уравнения, где начальные напряжения заменены соответствующими напряжениями от температурной деформации:

$$\sigma_{ij} = \sum_{k,l=1}^3 C_{ijkl} \varepsilon_{kl} + \sigma_{ij}^0, (i, j = \overline{1,3}). \quad (10)$$

Таким образом, если температурное поле в области известно, то соотношения (7) – (9) применимы к задачам термической упругости, где все параметры являются функциями температуры.

Таким образом, для определения термоупругих напряжений в валке необходимо следующее:

- в каждый момент времени определить температурное поле во всех узлах конечно-элементной сетки в соответствии с выше поставленной задачей расчета температур;

- затем для данного момента времени решить объемную задачу теории упругости, используя выражение (8) или (9), при этом в качестве граничных условий необходимо задать на всей поверхности валка только отсутствие внешних сил; тогда разрешающие уравнения (7) – (9) позволят найти температурные перемещения во всех узлах конечно-элементного разбиения, а затем определяются температурные деформации и напряжения.

Представленная схема выполнения расчетов повторяется и реализована в одном из модулей пакета ANSYS [5].

Принимаем, что вертикальные валки изготовлены из стали марки 60ХН, горизонтальные – являются бандажированными. Бандаж состоит из двух слоев: материал наружного – сталь марки 150ХНМ, внутреннего – сталь марки 100ХНМ. Двухслойный бандаж насажен на ось, изготовленную из стали марки 60ХН [6, 7].

Для решения задачи нестационарной теплопроводности (1) с краевыми условиями (2) – (5) и зависимостью (6) необходимо задать ряд параметров, конкретизирующих тепловой режим работы валков.

Степень черноты поверхности валка ε_b примем равной 0,54, исходя из данных для роликов МНЛЗ, полученных экспериментально. Принятые для расчета значения модуля упругости E , плотности ρ , теплопроводности λ , теплоемкости C , коэффициента линейного расширения α и предела текучести σ_T для стали 150ХНМ в интервале температур от 20 до 700 °С приведены ниже:

Параметр	Значение параметра при температуре, °С							
	20	100	200	300	400	500	600	700
$E \cdot 10^{-5}$, МПа	2,09	2,05	2,00	1,93	1,85	1,78	1,66	1,40
$\rho \cdot 10^6$, кг/мм ³	7,83	7,81	7,78	7,75	7,71	7,67	7,63	7,52
$\lambda \cdot 10^3$, Вт/(мм·°С)	40	45	43	40	37	35	32	28
C , Дж/(кг·°С)	469	503	519	536	553	720	611	712
$\alpha \cdot 10^6$, °С ⁻¹	10,5	11,8	12,6	13,4	14,1	14,8	13,3	15,0
σ_T , МПа	690	690	660	640	620	460	330	105

Для расчетов приняли, что величина a_1 при максимальном расходе воды 100 м³/ч для вертикальных валков диам. 1000 и горизонтальных – 1500 мм составляет 1400 Вт/(м²·°С).

Величину коэффициента a_2 теплоотдачи охлаждения боковых поверхностей воздухом рассчитаем по следующей формуле [8]:

$$a_2 = \begin{cases} 120 \cdot (0,35 \cdot 10^{-3} T + 0,12), \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С}), & \text{при } T \leq 400 \text{ °С}, \\ 120 \cdot (1,46 \cdot 10^{-3} T - 0,314), \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С}), & \text{при } T \geq 400 \text{ °С}. \end{cases}$$

При температуре окружающего воздуха 30 °С $a_2 = 14,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С})$.

Принимаем для расчета значение коэффициента контактной теплопередачи на уровне 5000 Вт/(м²·°С) независимо от времени контакта валка с металлом и его температуры.

На рис. 1 представлены изолинии температур для момента прокатки балки. Для рассчитанных полей температур были определены величины тангенциальных напряжений σ_t . Результаты приведены для срединного слоя валков только на поверхности. Напряжения даны для случаев, когда прокатано только три балки для установившегося режима работы. Типовой характер эпюр тангенциальных напряжений по сечению валка представлен на рис. 2, а, результаты также даны на развертке валков по углу (рис. 2, б).

Результаты свидетельствуют, что в зоне контакта валка с металлом имеют место сжимающие напряжения. Причем они действуют практически только в зоне валка, контактирующего с металлом. В зонах, где валок не контактирует с металлом, напряжения имеют растягивающий характер. Их уровень значительно ниже, чем в зоне контакта валка с металлом.

Если проанализировать влияние параметра a_1 на характер напряженного состояния, то видно, что при

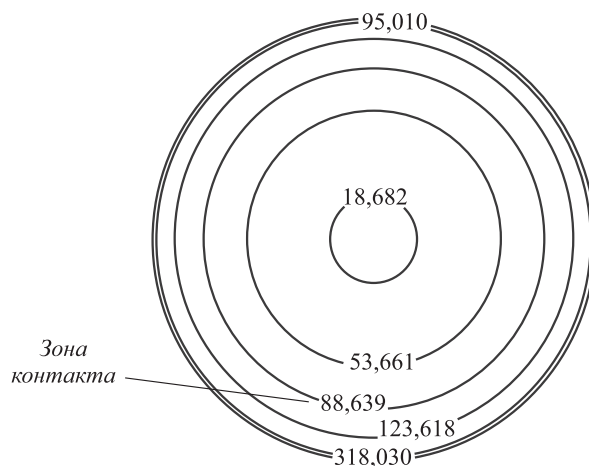


Рис. 1. Изолинии температур в горизонтальном валке (срединное сечение) при установившемся режиме работы (при прокатке балок 30Ш в клети ГУК 1 (проход 3); $a_1 = 1400 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С})$; при температуре прокатки 1040 °С; изолинии приведены для момента прокатки балки)

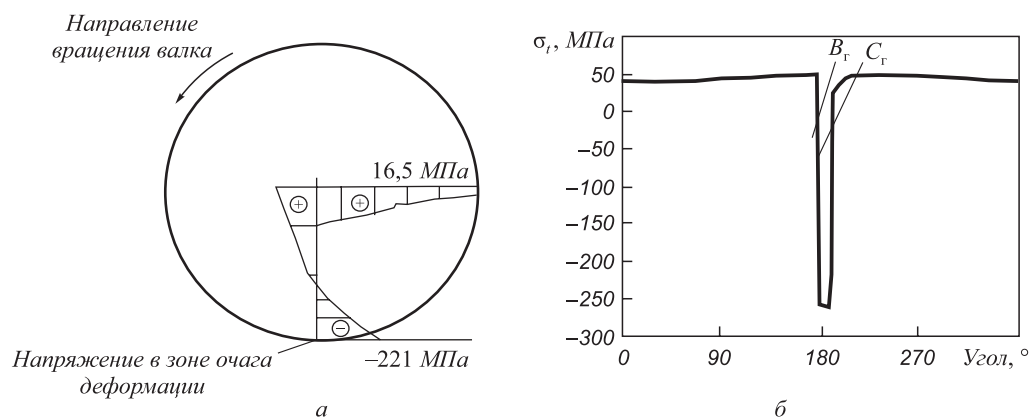


Рис. 2. Эпюры тангенциальных температурных напряжений σ_t по сечению горизонтального валка (срединное сечение) после прокатки балок 30Ш в клети ГУК 1 (проход 3):

$a - a_1 = 1400$ Вт/(м²·°С), квазистационарный температурный режим; температура прокатки 1040 °С; $b - a_1 = 2000$ Вт/(м²·°С), температура прокатки 1040 °С, точки B_r и C_r соответствуют положению очага деформации

повышении этого коэффициента, что означает увеличение подачи воды на катающую поверхность, растут как сжимающие напряжения в очаге контакта валка с металлом, так и растягивающие напряжения вне этого очага. Этот эффект закономерен, так как при большой подаче воды на валок увеличивается скорость его охлаждения, что приводит к росту градиента температуры, а следовательно, и к увеличению напряжений.

При снижении подачи воды уменьшаются сжимающие напряжения в зоне контакта валка с металлом. При этом вне очага деформации напряжения в валке переходят из растягивающих в сжимающие, что более благоприятно.

Интегральные результаты расчета для горизонтальных валков при прокатке заготовки представлены в таблице.

Представленные результаты свидетельствуют о необходимости выбора рациональной системы охлаждения валков, обеспечивающей благоприятный характер напряженного состояния валков.

Таким образом, теоретическими исследованиями установлено, что циклическое изменение (разогрев до 300 и охлаждение до 90 °С) температуры валков происходит в поверхностном его слое на небольшой

(3 – 5 мм) глубине, что приводит к возникновению растягивающих тангенциальных напряжений, достигающих 103 МПа и существенно снижающих стойкость валка. Это подтверждается экспериментальными исследованиями стойкости горизонтальных валков клетей универсально-балочного стана Нижнетагильского металлургического комбината, где установлено, что поперечные и продольные трещины (сетка разгара) образуются в поверхностном слое валка глубиной 3 – 6 мм.

Определим суммарное поле напряжений в горизонтальном валке от усилия прокатки и циклического температурного воздействия с учетом остаточных напряжений. Последние, возникающие в горизонтальном валке, складываются из напряжений от усилия прокатки, температурных напряжений и напряжений, возникших при его изготовлении. Примем, что при изготовлении валка на его поверхности возникают сжимающие тангенциальные напряжения, равные 187 МПа [9].

Результаты расчета суммарного поля напряжений свидетельствуют, что наличие в горизонтальном валке сжимающих остаточных напряжений приводит к тому, что тангенциальные напряжения на поверхности валка

Результаты расчета для горизонтальных валков

Клеть	Проход	Значение величины σ_r , МПа		a_1 , Вт/(м ² ·°С)	T_m , °С
		после прокатки трех балок в очаге/вне очага	при установившемся режиме работы в очаге/вне очага		
ГУК 1	3	-259/52,9	-268/47,1	2000	1040
		-221/16,5	-221/19,6	1400	
		-202/-11,8	-203/-41,6	500	
	5	-181/23,1	-184/31,4		980
ГУК 2	7	-169/17,6	-167/22,4	1400	900
		-138/25,4	-138/32,2		800
		-127/29,0	-128/37,1		700

за оборот всегда отрицательны. При отсутствии поля сжимающих остаточных напряжений каждая точка валка за один оборот имеет как сжимающие, так и растягивающие напряжения, что с точки зрения усталостной прочности и чувствительности к возникновению трещин на поверхности валка более неблагоприятно. Таким образом, для повышения стойкости бандажированных валков необходимо при их изготовлении создавать в поверхностном слое остаточные сжимающие напряжения величиной не менее 120 МПа.

Выводы. В результате теоретического исследования определено поле температур и величины термоупругих тангенциальных напряжений в поверхностных слоях горизонтальных валков универсальной клети. Даны рекомендации для повышения стойкости бандажированных горизонтальных валков клеток универсально-балочного стана.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лехов О.С. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2014. № 10. С. 37 – 41.
2. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.
3. Шорин С.Н. Теплопередача. – М.: Высшая школа, 1964. – 490 с.
4. Мэнсон С. Температурные напряжения и малоцикловая усталость. – М.: Мир, 1986. – 318 с.
5. ANSYS. Structural Analysis Guide. Rel.6.0. <http://www.cadferm.ru>. (Accessed: 20.02.2014).
6. Марочник сталей и сплавов / В.Г. Сорокин, А.В. Волосникова, С.А. Вяткин и др. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.
7. Нейман Б.Е. Физические свойства сталей и сплавов, применяемых в энергетике. Справочник. – М.: Энергия, 1967. – 240 с.
8. Комратов Ю.С., Лехов О.С. Совершенствование производства проката в условиях НТМК. – Екатеринбург: Изд-во «Банк культурной информации», 2002. – 384 с.
9. Комратов Ю.С., Лехов О.С. // Сталь. 2007. № 11. С. 106 – 108.

© 2014 г. Лехов О.С.

Поступила 26 февраля 2014 г.

IZVESTIYA VUZov. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA – FERROUS METALLURGY. 2014. Vol. 57. No. 12, pp. 15–19.

STUDY OF STRESS-STRAIN STATE OF ROLLS-BAND SYSTEM AT ROLLING OF BROAD-FLANGED BEAM IN STANDS OF UNIVERSAL BEAM MILL. REPORT 2

Lekhov O.S., Dr. Sci. (Eng.), Professor
(MXLehov38@yandex.ru)

Russian State Professional Pedagogical University (11, Mashinostroitelei str., Ekaterinburg, 620012, Russia)

Abstract. The article outlines the methodology and results of solving the task of measuring the temperature field and the thermoelastic stress in the horizontal rolls in the process of rolling of a broad-flanged beam in the universal beam mill stand. The author sets and solves the problem of measuring the temperature field of the composite rolls. The author discloses the algorithm of measuring the thermoelastic stress in the horizontal rolls with the known temperature field. The article contains distribution diagrams of the tangential thermoelastic stress in the cross section of a horizontal roll in the process of rolling beams in the universal mill stand. The author shows the effect of the heat emission factor on the level of the tangential stress in cooling the rolls with water. The theoretical research determines the value of the tensile tangential stress which lowers the endurance of the horizontal rolls of the universal mill stand. The article determines the resultant stress field in the horizontal composite rolls caused by the rolling pressure and the cyclic thermal effect with the residual stress taken into account. The author provides recommendations how to increase the endurance of the composite rolls of the universal beam mill.

Keywords: broad-flanged beam, rolling, deformation mode, vertical and horizontal rolls, finite element method, modulus of elasticity, plastic resistance, tangential and radial stress.

REFERENCES

1. Lekhov O.S. Research of a deflected mode of roll-band system when rolling broad-flanged beam in stands of universal beam mill. Report 1. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya – Ferrous Metallurgy*. 2014, no. 10. pp. 37–41. (In Russ.).
2. Lykov A.V. *Teoriya teploprovodnosti* [Theory of thermal conduction]. Moscow: Vysshaya shkola, 1967. 600 p. (In Russ.).
3. Shorin S.N. *Teploperedacha* [Heat transmission]. Moscow: Vysshaya shkola, 1964. 490 p. (In Russ.).
4. Manson S.S. Thermal Stress and Low Cycle Fatigue. New York, McGraw-Hill, 1966. (Russ.ed.: Manson S. *Temperaturnye napryazheniya i malotsiklovaya ustalost'*. Moscow: Mir, 1986. 318 p.)
5. ANSYS. Structural Analysis Guide. Rel.6.0. Available at: <http://www.cadferm.ru> (Accessed: 20.02.2014).
6. Sorokin V.G., Volosnikova A.V., Vyatkin S.A. etc. *Marochnik staley i splavov* [Steel and alloy grade guide]. Moscow: Mashinostroenie, 1989. 640 p. (In Russ.).
7. Neiman B.E. *Fizicheskie svoistva staley i splavov, primenyaemykh v energetike. Spravochnik* [Physical properties of steels and alloys applied in power engineering. Reference book]. Moscow: Energiya, 1967. 240 p. (In Russ.).
8. Komratov Yu.S., Lekhov O.S. *Sovershenstvovanie proizvodstva prokata v usloviyakh NTMK* [Improvement of rolling production in the conditions of NTMK]. Ekaterinburg: Izd-vo “Bank kul'turnoi revolyutsii”, 2002. 384 p. (In Russ.).
9. Komratov Yu.S., Lekhov O.S. Resistance increase of banded rolls of universal beam mill. *Stal'*. 2007, no. 11, pp. 106–108. (In Russ.).

Received February 26, 2014