

УДК 621.74.046

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ТРЕХСЛОЙНЫХ СТАЛЬНЫХ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОЛОС НА УСТАНОВКЕ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ И ДЕФОРМАЦИИ. СООБЩЕНИЕ 1

Лехов О.С.¹, д.т.н., профессор кафедры инжиниринга и профессионального обучения в машиностроении и металлургии (MXLehov38@yandex.ru)

Михалев А.В.¹, старший преподаватель кафедры инжиниринга и профессионального обучения в машиностроении и металлургии (mialex@trubprom.com)

Шевелев М.М.², начальник лаборатории неразрушающего контроля (MMShevelev@mail.ru)

¹ Российский государственный профессионально-педагогический университет

(620012, Россия, Екатеринбург, ул. Машиностроителей, 11)

² ЗАО «Центр тепловизионной диагностики»

(620057, Россия, Екатеринбург, ул. Таганская, 56)

Аннотация. Показана высокая техническая и экономическая эффективность применения биметаллов в химическом, нефтяном, транспортном и энергетическом машиностроении и других отраслях промышленности. Обоснована актуальность создания высокопроизводительных непрерывных процессов производства биметаллических полос. Изложены основные технологические задачи для развития процессов получения биметаллов широкого класса. Описана ресурсосберегающая технология производства трехслойных биметаллов легированная сталь – конструкционная сталь – легированная сталь на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации. Показаны возможности предлагаемой технологии с позиции улучшения качества биметаллических полос. Приведены исходные данные для определения изменения температуры во времени основной стальной полосы при ее прохождении через расплав металла легированной стали. Даны уравнения нестационарной теплопроводности, начальные и граничные условия для определения температурных полей основной полосы и плакирующего слоя при получении трехслойной биметаллической полосы на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации. Приведены значения плотности, теплопроводности и теплоемкости для стали Ст3 в заданном интервале температур. Описана процедура расчета температур в пакете ANSYS путем решения нестационарной задачи теплопроводности в плоской постановке методом конечных элементов. Приведены описание геометрической модели для расчета температур полосы и расплава металла плакирующего слоя, принятые для расчета значения коэффициента теплопередачи между основной полосой и расплавом металла плакирующих слоев биметаллической полосы. Указаны характерные точки в модели для расчета температур основной полосы и расплава плакирующего слоя, приведены зависимости изменения по времени температур основной полосы и расплава плакирующего слоя при получении трехслойной биметаллической полосы на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации. Приведены расчетные данные изменения во времени температуры основной полосы и расплава металла плакирующего слоя в характерных точках при различных значениях коэффициента контактной теплопередачи при получении трехслойного биметалла.

Ключевые слова: установка, совмещенный процесс, непрерывное литье, боек, полоса, расплав металла, трехслойный биметалл, температурное поле, напряжение, деформация, очаг деформации, плакирующий слой.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-8-594-599

ВВЕДЕНИЕ

Биметаллы широко применяются в различных областях промышленности. Их использование позволяет не только повысить надежность и долговечность большого класса деталей и оборудования, но и существенно сократить расходы на их изготовление в результате экономии дорогостоящих металлов [1, 2]. Однако, несмотря на высокую техническую и экономическую эффективность, применение слоистых материалов и их производство существенно отстают от потребностей химического, нефтяного, транспортного и энергетического машиностроения и других отраслей промышленности. Необходима организация высокопроизводительных непрерывных процессов производства биметалличес-

ких полос [1]. К основным технологическим задачам в развитии этих процессов относятся увеличение ширины биметаллических полос, производимых рулонным методом, а также получение биметалла с повышенной толщиной плакирующих слоев (до 10 – 15 % от толщины основного слоя) [2].

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И РЕСУРСОБЕРЕГАЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ТРЕХСЛОЙНЫХ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОЛОС

Изложенные выше проблемы производства биметаллических полос могут быть успешно решены с использованием установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации [3 – 5]. Разработана ресурсосбере-

гающая технология производства трехслойных биметаллических полос легированная сталь – конструкционная сталь – легированная сталь на компактной установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации (рис. 1).

Предлагаемая технология непрерывного литья и деформации биметаллической полосы включает подачу в медный водоохлаждаемый кристаллизатор металла плакирующего слоя (легированной стали) в жидком состоянии. Технологией предусмотрено соединение полосы основного металла (конструкционная сталь) в твердом состоянии с выходящей из кристаллизатора оболочкой плакирующего слоя путем обжатия бойками биметаллического слитка с последующей калибровкой биметаллической полосы (рис. 1). Технология позволяет повысить качество биметалла за счет обжатия бойками биметаллического слитка с высокой степенью деформации в узком температурном интервале. Это обеспечивает надежное сцепление слоев, получение мелкозернистой и однородной структуры

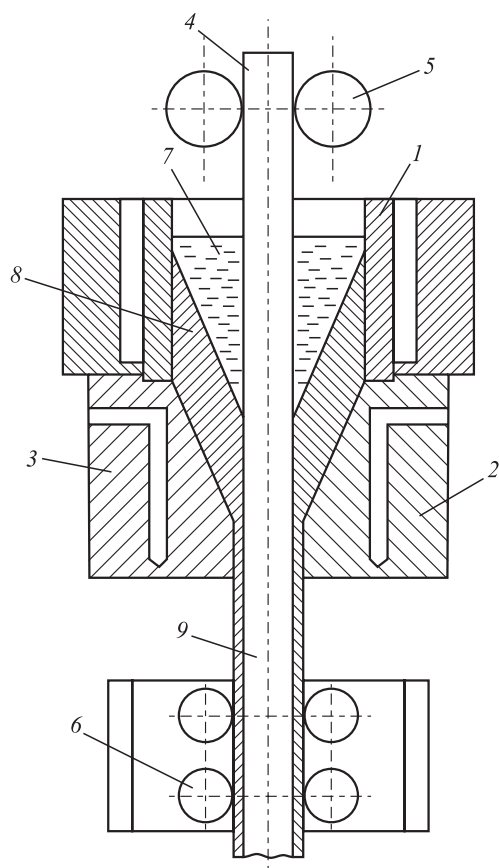


Рис. 1. Способ получения биметаллической полосы:
1 – неразъемный кристаллизатор; 2, 3 – бойки; 4 – лист основного металла; 5 – направляющие ролики; 6 – тянущие ролики;
7 – расплав металла плакирующего слоя; 8 – оболочка плакирующего металла; 9 – биметаллический лист

Fig. 1. The method of bimetall strip production:
1 – one-piece mold; 2, 3 – strikers; 4 – sheet of the base metal;
5 – directing rolls; 6 – pinch rolls; 7 – molten metal of the cladding layer; 8 – shell of the cladding metal; 9 – bimetall sheet

металла плакирующего слоя, хорошее качество поверхности полосы и заданную точность толщины плакирующих слоев.

РАСЧЕТЫ

Для оценки новой технологии получения трехслойного биметалла легированная сталь – конструкционная сталь – легированная сталь необходимо на первом этапе расчета определить изменение температуры основной полосы при ее прохождении через расплав легированной стали во времени до момента обжатия бойками трехслойного слитка. На втором этапе расчета необходимо определить напряженно-деформированное состояние (НДС) в зоне очага деформации плакирующих слоев.

Для расчета была принята основная полоса из стали марки Ст3 толщиной и шириной соответственно 10 и 30 мм. Толщина полости кристаллизатора 60 мм, высота кристаллизатора 625 мм. Скорость вытягивания оболочки плакирующего слоя из кристаллизатора 5 м/мин. Толщину оболочки плакирующего слоя на выходе из кристаллизатора принимали равной 10 мм, температуру полосы из стали Ст3 на входе в расплав 20 °С. Между внутренними стенками кристаллизатора и основной полосой подается расплав легированной стали.

Температурное поле полосы определяется на основе решения уравнения нестационарной теплопроводности с соответствующими начальными и граничными условиями [5 – 10]:

$$c\rho \frac{dT}{dt} = \sum_{i=1}^2 \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} \right), \quad (1)$$

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

Все коэффициенты для полосы из стали Ст3, расплава и затвердевшей оболочки из стали марки 09Г2С принимаем в зависимости от температуры T .

Начальное условие для функции $T(\vec{X}, t)$ имеет вид

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

В начальный момент времени принимаем, что температура полосы равна 20 °С, температура расплава 1450 °С, температура наружной грани оболочки 1200 °С (рис. 2).

Для расчета температурного поля во времени собственно полосы, расплава и затвердевшей оболочки между полосой и расплавом создана контактная пара с коэффициентом контактной теплопередачи. Для расчета температурного поля во времени для данной контактной пары приняты граничные условия четвертого рода с коэффициентом теплопередачи α_1 в зоне контакта основной полосы с расплавом металла плакирующего

Контактная пара между полосой и расплавом (для создания контакта находятся две линии)

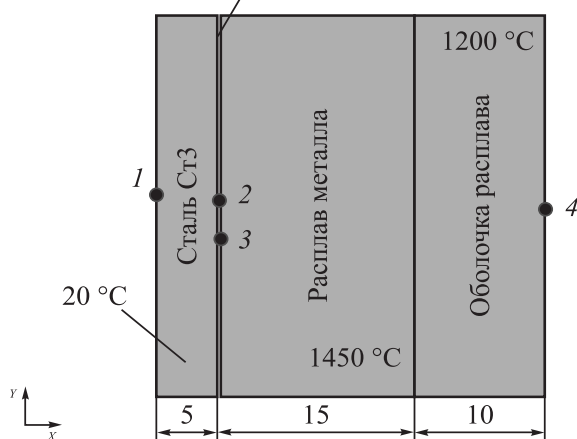


Рис. 2. Модель для расчета и положение точек, в которых дано изменение температуры во времени

Fig. 2. Model for calculation and the position of points in which the temperature change in time

слоя. Математически такие условия характеризуются равенством тепловых потоков, проходящих через линию контакта полосы и расплава, и могут быть представлены уравнением

$$\lambda_1 \left| \frac{\partial T}{\partial n} \right|_1 = \lambda_2 \left| \frac{\partial T}{\partial n} \right|_2,$$

где n – нормаль к линии раздела стали Ст3 и расплава; λ_1 и λ_2 – коэффициент теплопроводности полосы из стали Ст3 и расплава.

Кроме граничных условий для линии контакта на линии между расплавом и корочкой задано граничное условие первого рода: $T(\tau) = 1450$ °С. Температура на этой линии на протяжении всего времени неизменна и равна 1450 °С. Такое допущение вполне оправдано из-за малого нахождения полосы в расплаве.

И, наконец, для линии симметрии и линии оболочки, где была задана начальная температура 1200 °С, принимаем граничные условия третьего рода (равенство нулю теплового потока на этих линиях $\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = 0$).

Уравнения $T(\tau) = 1450$ °С и $\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = 0$ образуют начальную краевую задачу определения нестационарного поля температур для несвязанной задачи теплопроводности для полосы из стали Ст3, расплава и затвердевшей оболочки металла.

Принятые для расчета значения плотности ρ , теплопроводности λ и теплоемкости c для стали Ст3 приведены в табл. 1.

Расчет температур выполнен в программном пакете ANSYS 15.0 путем решения нестационарной задачи теплопроводности в плоской постановке методом конечных элементов [11 – 16]. При принятом тепловом элементе SOLID 70, заданных граничных условиях теплообмена и принятых теплофизических параметрах материала полосы (плотности, теплопроводности и теплоемкости) определяется температурное поле полосы в конце ее прохождения через расплав плакирующего слоя металла.

Рассечем по низу кристаллизатора полосу, расплав металла и затвердевшую оболочку металла плакирующего слоя горизонтальной плоскостью. Данное сечение будет являться геометрической моделью для расчета. В силу симметрии в модель включаем только половину сечения (рис. 2).

В начальный момент времени принимаем, что температура полосы равна 20 °С, температура расплава 1450 °С, температура наружной поверхности оболочки 1200 °С (рис. 2).

Между полосой и расплавом металла рассматривается контактная пара с коэффициентом контактной теплопередачи α_1 (рис. 2). Значение коэффициента α_1 между полосой и расплавом металла можно определить приближенно по литературным данным [17 – 20]. В связи с этим выполнен расчет для трех его значений: 5 000, 10 000, 100 000 Вт/(м²·К). Результаты расчета температур основной полосы и расплава плакирующего слоя приведены для четырех точек (рис. 2): двух точек полосы (1 и 2) и двух точек расплава (3 и 4).

Графики изменения этих температур при эффективном коэффициенте теплопередачи $\alpha_1 = 100\,000$ Вт/(м²·К) даны на рис. 3. Для точек 1 и 2 значения температур приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 1

Значения плотности, теплопроводности, теплоемкости для стали Ст3 в интервале температур от 20 до 1450 °С

Table 1. Values of density, thermal conductivity and heat capacity for steel St3 in the temperature range from 20 to 1450 °С

Параметр	Значение параметра для температуры, °С								
	20	100	200	300	400	500	600	700	1450
$\rho \cdot 10^6$, кг/мм ³	7,870	7,850	7,810	7,780	7,750	7,716	7,670	7,630	7,600
$\lambda \cdot 10^3$, Вт/(мм·°С)	55	55	54	50	45	39	34	30	26
c , Дж/(кг·°С)	482	482	498	514	533	555	584	626	554

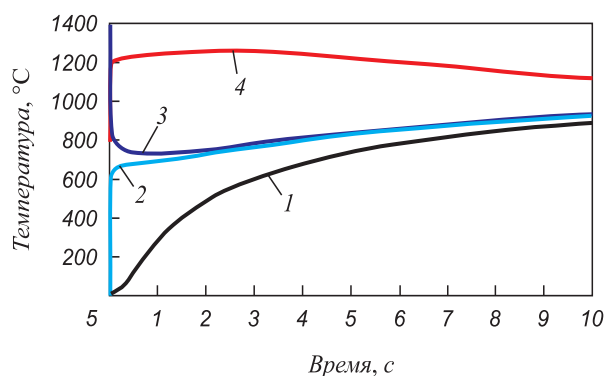


Рис. 3. Изменение температуры в точках 1 – 4 (положение точек смотри на рис. 2) при коэффициенте контактной теплопередачи 100 000 Вт/(м²·К)

Fig. 3. Temperature change in points 1 – 4 (see the position of the points in fig. 2) with a contact heat transfer coefficient of 100 000 W/(m²·K)

Если принять скорость вытягивания оболочки с жидкой фазой из кристаллизатора 5 м/мин, высоту кристаллизатора 625 мм, то время выхода полосы из кристаллизатора составит 7,5 с. К этому моменту температура полосы и расплава в зоне контакта составит 880 °С (табл. 2).

На рис. 3 показан характер изменения температуры полосы и расплава металла через 10 с прохождения полосы через расплав. Температура полосы в зоне контакта не превышает 1000 °С, т.е. при этом полоса не будет плавиться, а будет происходить только налипание на нее металла плакирующего слоя.

Выводы

Поставлена и решена задача определения температурного поля основной полосы и расплава плакирующего слоя при получении стальной трехслойной

биметаллической полосы на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации. Полученное температурное поле трехслойного биметаллического слитка легированная сталь – конструкционная сталь – легированная сталь будет использоваться на втором этапе расчета при определении напряженно-деформированного состояния биметаллического слитка.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кузнецов Е.В., Кобелев А.Г. Биметаллы: современные технологии и применение. – В кн.: Пластическая деформация сталей и сплавов. Сб. научн. тр. – М.: Изд-во МИСИС, 1996. С. 296 – 302.
2. Кузнецов Е.В. Основные направления развития технологии производства биметаллов. – В кн.: Теория и технология процессов пластической деформации. Сб. трудов научно-технич. конф. – М.: Изд-во МИСИС, 1997. С. 111 – 119.
3. Пат. № 2064364 РФ, В22D11/00. Способ получения биметаллической полосы / О.С. Лехов; заявл. 15.02.1994; опубл. 27.07.1996. Бюл. № 87.
4. Лехов О.С., Лисин И.В. Установка совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для производства биметаллических полос // Изв. вуз. Цветная металлургия. 2015. № 6. С. 30 – 35
5. Лехов О.С., Турлаев В.В., Лисин И.В. Установка совмещенного процесса непрерывного литья и деформации. Теория и расчет. – Екатеринбург: изд. УрФУ, 2014. – 112 с.
6. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.
7. Гарбер Э.А., Гончарский А.А., Шаравин М.П., Надутов В.Г. Новый метод расчета конвективного теплообмена валков листовых станов // Производство толстолистовой стали. 1981. № 5. С. 54 – 57.
8. Астахов А.А., Мазур И.П. Разработка модели для исследования теплового состояния рабочих валков станов горячей прокатки // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7. № 112. С. 83 – 86.
9. Fujii H., Ohashi T., Hiromoto T. On the formation of the internal cracks in continuously cast slabs // Transact. Iron and Steel Inst. Japan. 1978. Vol. 18. No. 8. P. 510 – 518.
10. Лехов О.С. Исследование напряженно-деформированного состояния системы валки – полоса при прокатке широкополочной

Т а б л и ц а 2

Изменение температуры при различных значениях коэффициента контактной теплопередачи

Table 2. Temperature change at different values of the contact heat transfer coefficient

Точка	Значение температуры, °С, в моменты времени, с								
	2	3	4	5	6	7	8	9	10
При $\alpha_1 = 5000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$									
1	491	561	618	666	707	742	772	798	821
2	946	918	908	906	909	914	921	928	935
При $\alpha_1 = 10\ 000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$									
1	602	664	714	754	788	815	840	861	879
2	849	844	851	864	878	891	903	915	926
При $\alpha_1 = 100\ 000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$									
1	730	769	803	832	857	878	896	911	925
2	753	785	815	842	864	884	901	916	928

- балки в клетях универсально-балочного стана. Сообщение 2 // Изв. вуз. Черная металлургия. 2014. № 12. С. 15 – 19.
11. ANSYS. Structural Analysis Guide. Rel. 15.0. <http://www.cadferm.ru>.
 12. Takashima Y., Yanagimoto I. Finite element analysis of flange spread behavior in H-beam universal rolling // Wiley in Steel research international. 2011. Vol. 82. P. 1240 – 1247.
 13. Jansson N. Optimized sparse matrix assembly in finite element solvers with one-sided communication // High Performance Computing for Computational Science – VECPAR 2012. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013. P. 128 – 139.
 14. Kazakov A.L., Spevak L.F. Numerical and analytical studies of nonlinear parabolic equation with boundary conditions of a special form // Applied Mathematical Modelling. 2013. Vol. 37. No. 10-13. P. 6918 – 6928.
 15. Kobayashi S., Oh S.-I., Altan T. Metal forming and finite-element method. – New York: Oxford University Press, 1989. – 377 p.
 16. Matsumia T., Nakamura Y. Mathematical model of slab bulging during continuous casting. – In: Applied Mathematical, and Physical Models in Iron and Steel Industry Proceedings of the 3rd Process

- Technological. Conference, Pittsburgh, Pa, 28-31 March 1982. – New York, 1982. P. 264 – 270.
17. Sorimachi K., Emi T. Elastoplastic stress analysis of bulging as a major cause of internal cracks in continuously cast slabs // Tetsu to Hagane. 1977. Vol. 63. No. 8. P. 1297 – 1304.
 18. Karfoul M.K., Gordon J.T., Murray R.T. The behavior of iron and aluminum during the diffusion welding of carbon steel to aluminum // Journal of Materials Science. 2007. Vol. 42. No. 14. P. 5692 – 5699.
 19. Rattana B., Mitsomwang P., Rattanachan S., Mutoh Y. Feasibility of using tig welding in dissimilar metals between steel / aluminum alloy // Energy Research Journal. 2010. Vol. 1. No. 2. P. 82 – 86.
 20. Marciniak Z., Duncan J.L., Hu S.J. Mechanics of sheet metal forming. – Butterworth-Heinemann Elsevier Ltd, Oxford, 2002. P. 228.

Поступила в редакцию 1 октября 2018 г.

После доработки 15 ноября 2018 г.

Принята к публикации 20 ноября 2018 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2019. VOL. 62. NO. 8, PP. 594–599.

PRODUCTION OF THREE-LAYER STEEL BIMETALLIC STRIPS IN THE UNIT OF CONTINUOUS CASTING AND DEFORMATION. REPORT 1

O.S. Lekhov¹, A.V. Mikhalev¹, M.M. Shevelev²

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-8-594-599

¹Russian State Vocational Pedagogical University, Ekaterinburg, Russia

²ZAO Center of Thermal Imaging Diagnostics, Ekaterinburg, Russia

REFERENCES

Abstract. High technical and economic efficiency of the use of bimetals in chemical, oil, transport and energy engineering and other industries is described. The urgency of creating high-performance continuous processes for the production of bimetallic strips is substantiated. The authors have established the main technological tasks for development of the processes of obtaining bimetal of wide class. The paper describes resource-saving production technology of three-layer bimetals alloyed steel – constructional steel – alloyed steel at the unit of combined process of continuous casting and deformation. Possibilities of the proposed technology are outlined from the standpoint of improving the quality of bimetallic strips. The initial data are given to determine the temperature change over time of the main steel strip as it passes through the molten metal of the alloyed steel. The equations are given for non-stationary heat conduction, initial and boundary conditions for determining the temperature fields of main strip and cladding layer when obtaining a three-layer bimetallic strip on the unit of a combined process of continuous casting and deformation. The values of density, thermal conductivity and heat capacity for steel St3 were determined in a given temperature range. A procedure is described for calculating temperatures in the ANSYS package by solving a non-stationary heat conduction problem in a flat formulation by the finite element method. The authors have described the geometric model for calculating the temperature of strip and molten metal of the cladding layer. Values of the coefficient of heat transfer between the main strip and molten metal of the cladding layers of bimetallic strip are given adopted for calculation. Characteristic points are indicated in the model for calculating the temperatures of main strip and molten metal of the cladding layer. The graphs show temporal changes in these temperatures at production of a three-layer bimetallic strip on the unit of combined process of continuous casting and deformation. Calculated data on the time variation of temperature of main strip and molten metal of the cladding layer at characteristic points are given for different values of the contact heat transfer coefficient.

Keywords: red mud, sintering, residues, sinter pot, sinter burden, micro-structural examination, low-alkali red mud, impact resistance, abrasion strength, ferrite bond, silicate bond.

1. Kuznetsov E.V., Kobelev A.G. Bimetals: modern technologies and applications. In: *Plasticheskaya deformatsiya staley i splavov. Sb. nauchnykh trudov* [Plastic deformation of steels and alloys. Coll. of sci. papers]. Moscow: Izd-vo MISIS, 1996, pp. 296–302. (In Russ.).
2. Kuznetsov E.V. Main directions in development of bimetals production. In: *Teoriya i tekhnologiya protsessov plasticheskoi deformatsii. Sb. trudov nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Theory and technology of plastic deformation. References of Sci.-Pract. Conf.]. Moscow: MISIS, 1997, pp. 111–119. (In Russ.).
3. Lekhov O.S. *Sposob polucheniya bimetallicheskoj polosy* [The method of bimetallic strip production]. Patent RF no. 2064364, V22D11/00. *Byulleten' izobretenii*. 1996, no. 87. (In Russ.).
4. Lekhov O.S., Lisin I.V. Unit of combined process of continuous casting and deformation for the production of bimetallic strips. *Izv. vuz. Tsvetnaya metallurgiya*. 2015, no. 6, pp. 30–35. (In Russ.).
5. Lekhov O.S., Turlaev V.V., Lisin I.V. *Ustanovka sovmeshchennogo protsessa nepreryvnogo lit'ya i deformatsii. Teoriya i raschet* [Unit of combined process of continuous casting and deformation. Theory and design]. Ekaterinburg: UrFU, 2014, 112 p. (In Russ.)
6. Lykov A.V. *Teoriya teploprovodnosti* [Theory of heat conductivity]. Moscow: Vysshaya shkola, 1967, 600 p. (In Russ.).
7. Garber E.A., Goncharskii A.A., Sharavin M.P., Nadutov V.G. A new method for calculating convective heat transfer of rolls of sheet mills. *Proizvodstvo tolstolistovoi stali*. 1981, no. 5, pp. 54–57. (In Russ.).
8. Astakhov A.A., Mazur I.P. Development of a model for studying the thermal state of working rolls of hot rolling mills. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2011, vol. 7, no. 112, pp. 83–86. (In Russ.).
9. Fujii H., Ohashi T., Hiromoto T. On the formation of the internal cracks in continuously cast slabs. *Transact. Iron and Steel Inst. Japan*. 1978, vol. 18, no. 8, pp. 510–518.
10. Lekhov O.S. Study of stress-strain state of rolls-band system at rolling of broad-flanged beam in stands of universal beam mill. Report 2. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2014, no. 12, pp. 15–19. (In Russ.).

11. ANSYS. *Structural Analysis Guide. Rel. 15.0.* <http://www.cadfer.ru>.
12. Takashima Y., Yanagimoto I. Finite element analysis of flange spread behavior in H-beam universal rolling. *Wiley in Steel research international*. 2011, vol. 82, pp. 1240–1247.
13. Jansson N. Optimized sparse matrix assembly in finite element solvers with one-sided communication. *High Performance Computing for Computational Science – VECPAR 2012*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013, pp. 128–139.
14. Kazakov A.L., Spevak L.F. Numeral and analytical studies of non-linear parabolic equation with boundary conditions of a special form. *Applied Mathematical Modelling*. 2013, vol. 37, no. 10-13, pp. 6918–6928.
15. Kobayashi S., Oh S.-I., Altan T. *Metal forming and finite-element method*. New York: Oxford University Press, 1989, 377 p.
16. Matsumia T., Nakamura Y. Mathematical model of slab bulging during continuous casting. In: *Applied Mathematical, and Physical Models in Iron and Steel Industry Proceedings of the 3rd Process Technological Conf., Pittsburgh, Pa, 28-31 March 1982*. New York, 1982, pp. 264–270.
17. Sorimachi K., Emi T. Elastoplastic stress analysis of bulging as a major cause of internal cracks in continuously cast slabs. *Tetsu to Hagane*. 1977, vol. 63, no. 8, pp. 1297–1304.
18. Karfoul M.K., Gordon J.T., Murray R.T. The behavior of iron and aluminum during the diffusion welding of carbon steel to aluminum. *Journal of Materials Science*. 2007, vol. 42, no. 14, pp. 5692–5699.
19. Rattana B., Mitsomwang P., Rattanachan S., Mutoh Y. Feasibility of using tig welding in dissimilar metals between steel/aluminum alloy. *Energy Research Journal*. 2010, vol. 1, no. 2, pp. 82–86.
20. Marciniak Z., Duncan J.L., Hu S.J. *Mechanics of sheet metal forming*. Butterworth-Heinemann Elsevier Ltd, Oxford, 2002, p. 228.

Information about the authors:

O.S. Likhov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Engineering and Vocational Training in Machinery and Metallurgy

(mxlehov38@yandex.ru)

A.V. Mikhalev, Senior Lecturer of the Chair of Engineering and Vocational Training in Machinery and Metallurgy

(mialex@trubprom.com)

M.M. Shevelev, Head of Nondestructive Testing Laboratory

(MMShevelev@mail.ru)

Received October 1, 2018

Revised November 15, 2018

Accepted November 20, 2018