

УДК 621.746+621.771

РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ И ТЕРМОУПРУГИХ НАПРЯЖЕНИЙ В БОЙКАХ С БУРТАМИ УСТАНОВКИ СОВМЕЩЕННОГО ПРОЦЕССА НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ И ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ СТАЛЬНЫХ СОРТОВЫХ ЗАГОТОВОК. 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.², к.т.н., управляющий директор (mialex@trubprom.com)

¹ Российский государственный профессионально-педагогический университет
(620012, Россия, Екатеринбург, ул. Машиностроителей, 11)

² ОАО «Уральский трубный завод»
(623107, Россия, Свердловская обл., Первоуральск, ул. Сакко и Ванцетти, 28)

Аннотация. Описаны основные нагрузки, действующие на калиброванные бойки установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации при получении сортовых заготовок. Обоснована актуальность определения температурных полей и термоупругих напряжений в калиброванных бойках с буртами при формировании нескольких сортовых заготовок при обжатии сляба и на холостом ходу при охлаждении бойков водой. Приведены прочностные и теплофизические свойства стали, из которой изготовлены бойки. Показана геометрия бойка с буртами для получения трех сортовых заготовок за один проход. Приведены исходные данные для расчета температурного поля бойка с буртами установки совмещенного процесса при получении сортовых заготовок. Представлены температурные граничные условия для расчета температурных полей бойков с буртами. Описаны граничные условия для определения температуры бойка с буртами и приведены значения теплового потока и эффективного коэффициента теплоотдачи. Результаты расчета температурных полей выполнены в четырех сечениях и приведены для характерных линий и точек, расположенных на контактной поверхности бойка с выступами и в приконтактном слое на глубине 5 мм от рабочей поверхности. Приведены размеры сетки конечных элементов, которая использована при расчете температурного поля бойков с буртами. Температурное поле бойков с буртами определено на основе решения уравнения нестационарной теплопроводности с соответствующими начальными и граничными условиями. Представлены величины и закономерности распределения температуры в основаниях и в вершинах среднего и крайнего буртов калиброванного бойка при обжатии сляба и на холостом ходу при получении за один проход трех сортовых заготовок на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации.

Ключевые слова: установка совмещенного процесса, кристаллизатор, сляб, сортовая заготовка, разделение, температурное поле, конечный элемент.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-11-12-960-964

ВВЕДЕНИЕ

Установка совмещенного процесса непрерывного литья и деформации может быть эффективно использована для получения за один проход трех и более сортовых заготовок [1, 2]. Наиболее нагруженными элементами установки совмещенного процесса при получении сортовых заготовок являются бойки с разделяющими буртами, которые во время рабочего хода одновременно формируют несколько сортовых заготовок и вытягивают стальной сляб из кристаллизатора. При этом в калиброванных бойках возникают суммарные напряжения от усилия обжатия и температурной нагрузки, которые снижают их стойкость.

Для обоснованного выбора конструктивных параметров и материала калиброванных бойков необходимо определить их напряженное состояние при получении нескольких сортовых заготовок на установке непрерывного литья и деформации. Для этого важно определить

температурное поле и термоупругие напряжения в бойках с буртами при формировании сортовых заготовок и на холостом ходу.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ, ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ

Расчет температуры и термоупругих напряжений в бойках с буртами выполняли при получении трех сортовых заготовок размером 70,7×70,7 мм из стали марки Ст3 на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации.

Материал бойка – инструментальная штамповая сталь марки 4Х4ВМФС. Геометрия бойка с буртами и принятыми размерами представлена на рис. 1.

В силу симметрии для расчета напряженного состояния бойка принята его половина (рис. 2) в системе координат XYZ.

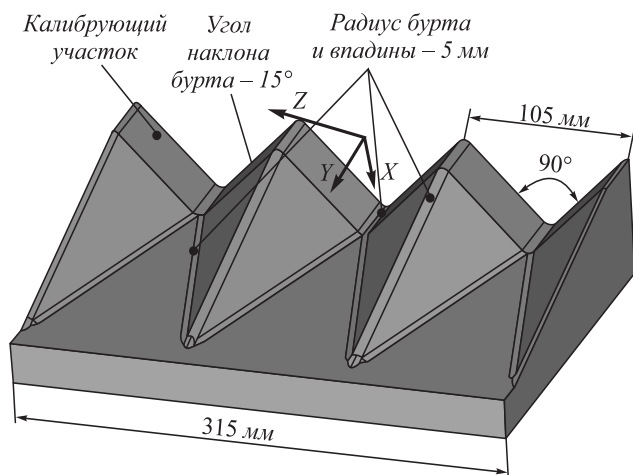


Рис. 1. Геометрия бойка с размерами

Fig. 1. Geometry of the backup with dimensions

Результаты расчета температур приведены для двух линий четырех сечений (1–4). Положение характерных линий и точек для каждого сечения показано на рис. 3 (обозначения 0–6 – точки на рабочей поверхности бойка; 0_5, 1_5, 2_5, 3_5, 4_5, 5_5 и 6_5 – точки на глубине 5 мм от рабочей поверхности бойка).

Кроме того, дополнительно результаты расчета приведены еще по трем линиям по высоте бойка, положение которых приведено на рис. 2.

Угловая скорость эксцентриковых валов принята 40 об./мин. При такой скорости эксцентрикового вала время контакта бойка при рабочем ходе составляет 0,375 с, а время паузы – 1,125 с.

Температура сляба до бойков принята 1200 °С, а после бойков – 1000 °С.

Расчет температурного поля бойка выполнен для следующего варианта:

– воздействие теплового потока плотностью 4 МВт/м² на рабочую поверхность бойка во время рабочего хода

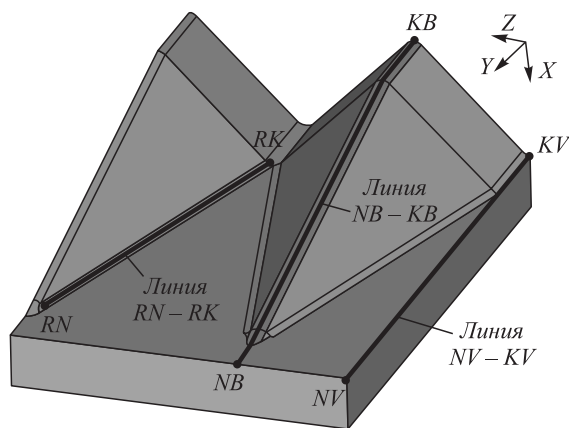


Рис. 2. Положение линий по высоте бойка во впадине, на бурте и в зоне радиуса

Fig. 2. Position of lines along the backup height in cavity, on the collar and in the radius zone

в течение 0,375 с; во время паузы эффективный коэффициент теплоотдачи 2000 Вт/(м²·К);

– сверху и снизу бойка, а также боковые поверхности бойка охлаждаются водой с коэффициентом теплоотдачи 500 Вт/(м²·К);

– со стороны суппорта охлаждение воздухом с коэффициентом теплоотдачи 20 Вт/(м²·К) и температурой окружающей среды 60 °С [2–8].

МЕТОДИКА РАСЧЕТА

При расчете температурного поля бойка использован восьмиузловой тепловой твердотельный конечный элемент SOLID 70, а для расчета напряженного состояния – восьмиузловой структурный твердотельный конечный элемент SOLID 185. Размер сетки конечных элементов принят переменным – 0,25 ÷ 2,50 мм. Минимальный размер принят на рабочей поверхности при контактного слоя до глубины 5 мм очага деформации. В результате при моделировании число элементов и узлов 2 887 542 и 2 827 400.

Температурное поле бойков с буртами определено на основе решения уравнения нестационарной теплопроводности с соответствующими начальными и граничными условиями [9–20].

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Результаты расчета температур бурта на рабочей поверхности бойка, на глубине 5 мм от рабочей поверхности и со стороны суппорта в четырех сечениях приведены в табл. 1, 2.

Бурт в точке 2 в конце обжатия сляба нагревается до температуры 539–543 °С, а на холостом ходу при охлаждении калиброванного бойка водой его температура снижается до 351–364 °С (табл. 1). На глубине 5 мм от контактной поверхности температура бурта в конце обжатия и холостого хода отличаются незначительно (400–406 и 408–416 °С).

Из приведенных результатов следует, что температурное поле бойка во время обжатия сляба и холосто-

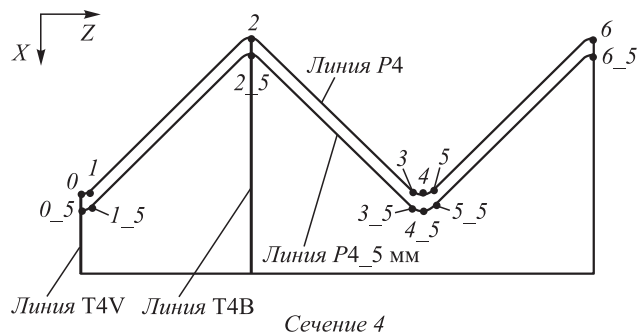


Рис. 3. Положение линий в сечении 4

Fig. 3. Position of lines in section 4

Т а б л и ц а 1

Значения температур в точках бурта по линиям T1B – T4B

Table 1. Temperature values at the points of collar along the T1B – T4B lines

Положение точки и момент контакта или паузы	Значение температуры, °С, в точках по линиям			
	T1B	T2B	T3B	T4B
Р. п. контакт (точка 2, рис. 3)	539	543	539	542
Р. п. пауза (точка 2, рис. 3)	359	364	359	351
На глубине 5 мм контакт (точка 2_5, рис. 3)	403	410	406	400
На глубине 5 мм пауза (точка 2_5, рис. 3)	411	416	413	408
Суппорт-контакт	395	401	378	355
Суппорт-пауза				

Пр и м е ч а н и е. Р. п. контакт и Р. п. пауза – температуры на рабочей поверхности в конце контакта и в конце паузы по линиям T1B – T4B; суппорт-контакт и суппорт-пауза – температура на задней поверхности в конце контакта и в конце паузы по линиям T1B – T4B.

го хода изменяется на глубине 3 мм для впадин между средними буртами и 3,5 мм для вершин средних буртов.

От воздействия теплового потока во время обжатия заготовки контактная поверхность бойка нагревается (результаты представлены только для части бойка между сечениями 1 – 4):

- в основании среднего бурта до температуры 489 – 525 °С (точки 1 и 3, табл. 2);
- в вершине среднего бурта до температуры 539 – 543 °С (точка 2, табл. 1, 2);
- в основании крайнего бурта до температуры 463 – 487 °С (точка 5, табл. 2);
- в вершине крайнего бурта до температуры 455 – 463 °С (точка 6, табл. 2).

Затем на холостом ходу при охлаждении бойка водой температура контактной поверхности бойка снижается:

- в основании среднего бурта до температуры 331 – 371 °С (точки 1 и 3, табл. 2);
- в вершине среднего бурта до температуры 351 – 364 °С (точка 2, табл. 1, 2);
- в основании крайнего бурта до температуры 309 – 332 °С (точка 5, табл. 2);
- в вершине крайнего бурта до температуры 272 – 277 °С (точка 6, табл. 2).

Отсюда видно, что вершина крайнего бурта имеет более низкую температуру по сравнению с температурой среднего бурта. Отличие не более 92 °С.

На рис. 4 представлены графики распределения температуры в разделяющем бурте по линии T4B при обжатии сляба и на холостом ходу.

Т а б л и ц а 2

Значения температур в конце контакта/паузы в точках сечений 1 – 4

Table 2. Temperature values at the end of contact/cooling at points of sections 1 – 4

Точка	Температура, °С, в точках сечений			
	1	2	3	4
0	527/362	531/367	519/354	499/345
1	520/368	525/371	512/358	502/344
2	539/359	543/364	539/359	542/351
3	519/367	521/368	502/348	489/331
4	518/353	519/354	503/338	483/329
5	463/309	484/330	487/332	483/325
6	456/276	457/277	455/275	463/272

Из рис. 4, который характеризует распределение температуры по толщине бурта и по длине очага деформации, следует, что температура бурта в конце обжатия сляба равна 542 °С, а в конце холостого хода на глубине 3 мм от контактной поверхности она снижается до 400 °С.

На рис. 5 приведены результаты расчета температуры на контактной поверхности калиброванного бойка по линии P4.

Линия P4 – это линии по развертке. Начало каждой линии P1 – P4 находится в точке 0, а конец линии – в точке 6 (рис. 3). Вертикальные линии 1 – 5 на графиках соответствуют положению характерных точек на контактной поверхности калиброванного бойка. Эти графики наглядно показывают распределение температуры по ширине и длине очага деформации от воздействия на боек теплового потока и охлаждения водой

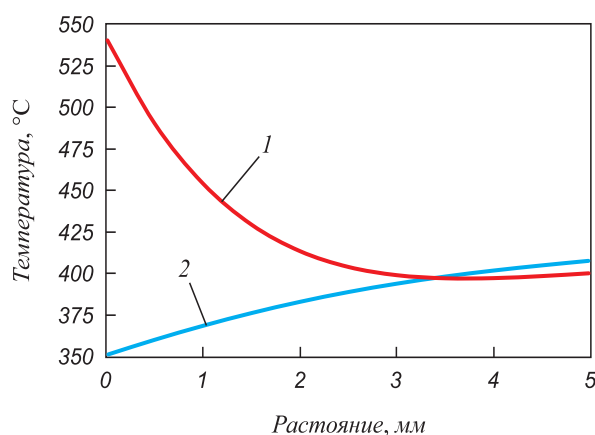


Рис. 4. Характер температур вдоль линии T4B от воздействия на боек теплового потока (1) и охлаждения водой (2) (от поверхности контакта вглубь на 5 мм)

Fig. 4. Nature of temperatures along the T4B line due to the heat flow (1) and water cooling (2) impact on the backup (5 mm deep from the contact surface)

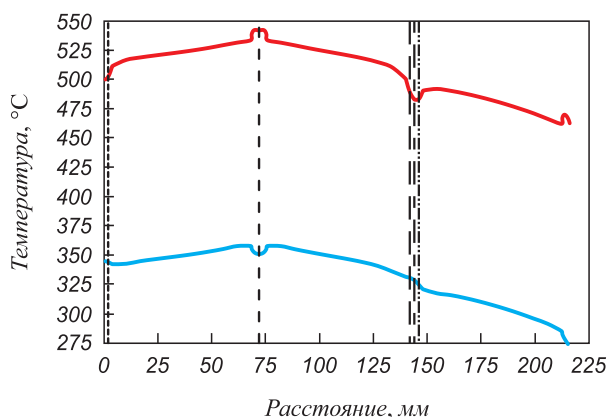


Рис. 5. Характер температур вдоль линии P4 от воздействия на боек теплового потока (ТР) и охлаждения водой (ОХЛ) (вертикальные линии 1 – 5 соответствуют положению точек сечения 4 на рис. 3): - - - - 1; - - - - 2; - - - - 3; - - - - 4; - - - - 5; — — — — ТР; — — — — ОХЛ

Fig. 5. Nature of temperatures along the P4 line from heat flow (HF) and water cooling (WC) impact on the backup (vertical lines 1 – 5 correspond to the position of the points of section 4 in Fig. 3):

- - - - 1; - - - - 2; - - - - 3; - - - - 4; - - - - 5; — — — — HF; — — — — WC

при формировании из сляба трех сортовых заготовок на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации.

Выводы

Поставлена и решена задача определения температурных полей в калиброванных бойках совмещенного процесса непрерывного литья и деформации при получении трех стальных сортовых заготовок. Определены величины и установлены закономерности распределения температуры в бойках с буртами по ширине и длине очага деформации от воздействия на калиброванный боек теплового потока при обжатии сляба и на холостом ходу при формировании из сляба трех стальных сортовых заготовок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лехов О.С., Михалев А.В. Установка совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для производства листов из стали для сварных труб. Теория и расчет. – Екатеринбург: изд. УМЦ УПИ, 2017. – 151 с.
2. Лехов О.С., Михалев А.В., Шевелев М.М. Напряжения в системе бойки – полоса при получении листов из стали на установке непрерывного литья и деформации. – Екатеринбург: изд. УМЦ УПИ, 2018. – 125 с.
3. Лехов О.С., Билалов Д.Х. Технологические возможности установок совмещенных процессов непрерывного литья и дефор-

мации для производства металлопродукции // Производство проката. 2016. № 7. С. 24 – 26.

4. Хлопонин В.Н., Косырева М.В., Косяк А.С. Влияние системы охлаждения на тепловые условия работы поверхностного слоя валка. – В кн.: Труды МИСиС. Вып. 100. – М.: изд. МИСиС, 1977. С. 90 – 93.
5. Боли Б., Уэйнер Дж. Теория температурных напряжений. – М.: Мир, 1964. – 517 с.
6. Лехов О.С. Исследование напряженно-деформированного состояния системы валки – полоса при прокатке широкополочной балки в клетях универсально-балочного стана. Сообщение 2 // Изв. вуз. Черная металлургия. 2014. Т. 57. № 12. С. 15 – 19.
7. Технологические процессы в машиностроении Ч. II. Обработка металлов давлением и сварочное производство / В.С. Кушнер, А.С. Верещака, А.Г. Схиртладзе, Д.А. Негров. – Омск: изд. ОмГТУ, 2005. – 200 с.
8. Буланов Л.В., Карлинский С.Е., Волегова В.Е. Долговечность роликов МНЛЗ при наружном и внутреннем охлаждении. – В кн.: Надежность крупных машин. Сб. науч. тр. НИИтяжмаш. – Свердловск: изд. НИИтяжмаш, 1990. С. 126 – 132.
9. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.
10. ANSYS. Structural Analysis Guide. Rel. 15.0.
11. 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 Technology Conference, Pittsburgh, Pa, 28-31 March 1982. – New York, 1982. P. 264 – 270.
12. Takashima Y., Yanagimoto I. Finite element analysis of flange spread behavior in H-beam universal rolling // Wiley in Steel Research Int. 2011. Vol. 82. No. 10. P. 1240 – 1247.
13. Kobayashi S., Oh S-I., Altan T. Metal Forming and Finite-Element Method. – New York: Oxford University Press, 1989. – 377 p.
14. Karrech A., Seibi A. Analytical model of the expansion in of tubes under tension // Journal of Materials Processing Technology. 2010. Vol. 210. No. 2. P. 336 – 362.
15. Kazakov A.L., Spevak L.F. Numeral 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.
16. Jansson N. Optimized sparse matrix assembly in finite element solvers with one-sided communication // High Performance Computing for Computational Science – VECPAR 2012. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2013. P. 128 – 139.
17. Park C.Y., Yang D.Y. A study of void crushing in large forgings II. Estimation of bonding efficiency by finite-element analysis // Journal of Materials Processing Technology. 2004. Vol. 157-158. P. 496 – 501.
18. 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.
19. Marciniak Z., Duncan J.L., Hu S.J. Mechanics of Sheet Metal Forming. – Oxford: Butterworth-Heinemann Elsevier Ltd, 2002. – 228 p.
20. Fujii H., Ohashi T., Hiromoto T. On the formation of the internal cracks in continuously cast slabs // Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan. 1978. Vol. 18. No. 8. P. 510 – 518.

Поступила в редакцию 16 декабря 2019 г.

После доработки 14 февраля 2020 г.

Принята к публикации 25 февраля 2020 г.

CALCULATION OF TEMPERATURE AND THERMOELASTIC STRESSES IN BACKUPS WITH COLLARS OF THE UNIT OF COMBINED CONTINUOUS CASTING AND DEFORMATION IN STEEL BILLETS PRODUCTION. REPORT 1

O.S. Lekhov¹, A.V. Mikhalev²

¹Russian State Professional Pedagogical University, Ekaterinburg, Russia

²JSC "Ural Pipe Plant", Pervoural'sk, Sverdlovsk Region, Russia

Abstract. The article describes the main loads affecting shaped backups of the unit of combined process of continuous casting and deformation in billets production. Importance of determining the temperature fields and thermoelastic stresses in shaped backups with collars is provided at formation of several billets, at slab compression and at idle during water cooling of backups. The authors describe strength and thermophysical properties of steel from which the backups are made. Geometry of backups with collars used for obtaining billets of three different shapes in one pass is shown. Initial data of the temperature field calculation are given for backups with collars of the combined unit. Temperature boundary conditions are considered for calculation of temperature fields of backups with collars. Boundary conditions determining temperature of such backups are described and values of the heat flow and effective heat transfer coefficient are given. The results of calculation of temperature fields are performed in four sections and are given for typical lines and points located on contact surface of backups with collars and in contact layer at depth of 5 mm from the working surface. The sizes of finite elements grid which is used at calculation of temperature field of backups with collars are provided. Temperature field of backups with collars is determined on the basis of solution of unsteady thermal conductivity equation corresponding initial and boundary conditions. Values and regularities of temperature distribution in bases and in tops of the middle and extreme edges of the shaped backups are presented during slab compression and at idle when obtaining billets of three shapes in one pass at the unit of combined continuous casting and deformation.

Keywords: unit of combined process, crystallizer, slab, shaped billet, separation, temperature field, finite element.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-11-12-960-964

REFERENCES

1. Lekhov O.S., Mikhalev A.V. *Ustanovka sovmeshchennogo protsesa nepriyvnogo lit'ya i deformatsii dlya proizvodstva listov iz stali dlya svarynykh trub. Teoriya i raschet* [Unit of Combined Continuous Casting and Deformation for Production of Steel Sheets for Welded Pipes. Theory and Calculation]. Ekaterinburg: Izd-vo UMTs UPI, 2017, 151 p. (In Russ.).
2. Lekhov O.S., Mikhalev A.V., Shevelev M.M. *Napryazheniya v sisteme boiki – polosa pri poluchenii listov iz stali na ustanovke nepriyvnogo lit'ya i deformatsii* [Stresses in the Backup – Strip System when Making Steel Sheets at Unit of Continuous Casting and Deformation]. Ekaterinburg: izd. UMTs UPI, 2018, 125 p. (In Russ.).
3. Lekhov O.S., Bilalov D.Kh. Technological capabilities of units for combined processes of continuous casting and deformation for production of metal products. *Proizvodstvo prokata*. 2016, no. 7, pp. 24–26. (In Russ.).
4. Khloponin V.N., Kosyreva M.V., Kosyak A.S. Influence of cooling system on thermal conditions of roller surface work. In: *Trudy MISiS. Vyp. 100* [MISiS proceedings. Issue 100]. Moscow: izd. MISiS, 1977, pp. 90–93. (In Russ.).
5. Boley Bruno A., Weiner Jerome H. *Theory of Thermal Stresses*. New York: John Wiley & Sons, 1960. (Russ. ed.: Boley B., Weiner J. *Teoriya temperaturnykh napryazhenii*. Moscow: Mir, 1964, 517 p.).
6. 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, vol. 57, no. 12, pp. 15–19. (In Russ.).
7. Kushner V.S., Vereshchaka A.S., Skhirtladze A.G., Negrov D.A. *Tekhnologicheskie protsessy v mashinostroenii. Ch. II. Obrabotka metallov davleniem i svarochnoe proizvodstvo* [Technological Processes in Mechanical Engineering. Part II. Metal Forming and Welding]. Omsk: Izd-vo OmGTU, 2005, 200 p. (In Russ.).
8. Bulanov L.V., Karlinskii S.E., Volegova V.E. Durability of CCM rolls at external and internal cooling. In: *Nadezhnost' krupnykh mashin. Sb. nauch. tr. NIItzyzhmash* [Reliability of Large Machines. Coll. of papers of NIItzyzhmash]. Sverdlovsk: izd. NIItzyzhmash, 1990, pp. 126–132. (In Russ.).
9. Lykov A.V. *Teoriya teploprovodnosti* [Theory of Heat Conduction]. Moscow: Vysshaya shkola, 1967, 600 p. (In Russ.).
10. *ANSYS. Structural Analysis Guide*. Rel. 15.0.
11. 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 Technology Conference, Pittsburgh, Pa, 28-31 March 1982*. New York, 1982, pp. 264–270.
12. Takashima Y., Yanagimoto I. Finite element analysis of flange spread behavior in H-beam universal rolling. *Wiley in Steel Research Int*. 2011, vol. 82, no. 10, pp. 1240–1247.
13. Kobayashi S., Oh S-I., Altan T. *Metal Forming and Finite-Element Method*. New York: Oxford University Press, 1989, 377 p.
14. Karrech A., Seibi A. Analytical model of the expansion in tubes under tension. *Journal of Materials Processing Technology*. 2010, vol. 210, no. 2, pp. 336–362.
15. 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.
16. Jansson N. Optimized sparse matrix assembly in finite element solvers with one-sided communication. *High Performance Computing for Computational Science – VECPAR 2012*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013, pp. 128–139.
17. Park C.Y., Yang D.Y. A study of void crushing in large forgings II. Estimation of bonding efficiency by finite-element analysis. *Journal of Materials Processing Technology*. 2004, vol. 157-158, pp. 496–501.
18. 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.
19. Marciniak Z., Duncan J.L., Hu S.J. *Mechanics of Sheet Metal Forming*. Oxford: Butterworth-Heinemann Elsevier Ltd, 2002, 228 p.
20. Fujii H., Ohashi T., Hiromoto T. On the formation of the internal cracks in continuously cast slabs. *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*. 1978, vol. 18, no. 8, pp. 510–518.

Information about the authors:

O.S. Lekhov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Engineering and Vocational Training in Machinery and Metallurgy (mxlehov38@yandex.ru)

A.V. Mikhalev, Cand. Sci. (Eng.), Managing Director (mialex@trubprom.com)

Received December 16, 2019

Revised February 14, 2020

Accepted February 25, 2020