

ИННОВАЦИИ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ
ПРОМЫШЛЕННОМ И ЛАБОРАТОРНОМ
ОБОРУДОВАНИИ, ТЕХНОЛОГИЯХ И МАТЕРИАЛАХ

INNOVATION IN METALLURGICAL
INDUSTRIAL AND LABORATORY EQUIPMENT,
TECHNOLOGIES AND MATERIALS



УДК 621.746+621.771

DOI 10.17073/0368-0797-2025-4-366-371



Оригинальная статья
Original article

РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ И ТЕРМОУПРУГИХ НАПРЯЖЕНИЙ В БОЙКАХ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ СТАЛЬНЫХ ПОЛЫХ ЗАГОТОВОК НА УСТАНОВКЕ СОВМЕЩЕННОГО ЛИТЯ И ДЕФОРМАЦИИ. ЧАСТЬ 1

О. С. Лехов[✉], Д. Х. Билалов

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

✉ MXlehov@yandex.ru

Аннотация. В статье решается задача определения температуры калиброванных бойков установки совмещенного литья и деформации при получении стальных полых заготовок. Авторы обосновывают актуальность определения температурных полей и термоупругих напряжений в калиброванных бойках при обжатии стенки поллой заготовки и на холостом ходу при охлаждении бойков водой, приводят прочностные и теплофизические свойства стали, из которой изготовлены бойки. Показана геометрия бойка для получения поллой заготовки за один проход. Приводятся исходные данные для расчета температурного поля бойка установки совмещенного литья и деформации при получении полых заготовок, а также представлены температурные граничные условия для расчета температурных полей бойков. Статья описывает граничные условия для определения температуры бойка и значения теплового потока и эффективного коэффициента теплоотдачи. Результаты расчета температурных полей были выполнены в четырех сечениях для характерных линий и точек, расположенных на контактной поверхности бойка и в приконтактном слое на глубине 5 мм от рабочей поверхности. Размеры сетки конечных элементов приведены для использования при расчете температурного поля бойков. Температурное поле бойков с буртами определялось на основе решения уравнения нестационарной теплопроводности с соответствующими начальными и граничными условиями. Представлены величины и закономерности распределения температуры в калиброванном бойке при обжатии стенки поллой заготовки и на холостом ходу при получении за один проход поллой заготовки на установке совмещенного литья и деформации.

Ключевые слова: установка, калиброванные бойки, литье, деформация, кристаллизатор, поллая заготовка, температурное поле, конечный элемент

Для цитирования: Лехов О.С., Билалов Д.Х. Расчет температуры и термоупругих напряжений в бойках при получении стальных полых заготовок на установке совмещенного литья и деформации. Часть 1. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2025;68(4):366–371.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-4-366-371>

CALCULATION OF TEMPERATURE AND THERMOELASTIC STRESSES IN STRIKERS DURING PRODUCTION OF HOLLOW STEEL BILLETS IN A UNIT OF COMBINED CASTING AND DEFORMATION. PART 1

O. S. Lekhov[✉], D. Kh. Bilalov

Russian State Vocational Pedagogical University (11 Mashinostroitelei Str., Yekaterinburg 620012, Russian Federation)

✉ MXlehov@yandex.ru

Abstract. The article solves the problem of determining the temperature of calibrated strikers in a unit of combined casting and deformation during production of hollow steel billets. The authors substantiate the relevance of determining temperature fields and thermoelastic stresses in calibrated strikers when compressing the wall of a hollow billet and at full speed when cooling the strikers with water, and describe the strength and thermo-physical properties of the steel from which the strikers are made. Geometry of the striker for producing a hollow billet in one pass is shown. The paper considers the initial data and temperature boundary conditions for calculating the temperature field of the striker during production of hollow billets in a unit of combined casting and deformation. The boundary conditions are given to determine the striker temperature as well as the values of heat flow and effective heat transfer coefficient. The results of calculating the temperature fields are performed in four sections and are presented for

characteristic lines and points located on the striker contact surface and in the contact layer at a depth of 5 mm from the working surface. Dimensions of the finite element grid were used in calculating the temperature field of the strikers. The temperature field of the strikers with collars was determined based on solution of the unsteady thermal conductivity equation with the corresponding initial and boundary conditions. The values and patterns of temperature distribution in a calibrated striker are presented when the wall of a hollow billet is compressed and when a hollow billet is produced in one pass in a unit of combined casting and deformation.

Keywords: installation, calibrated striker, casting, deformation, mold, hollow billet, temperature field, final element

For citation: Lekhov O.S., Bilalov D.Kh. Calculation of temperature and thermoelastic stresses in strikers during production of hollow steel billets in a unit of combined casting and deformation. Part 1. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2025;68(4):366–371.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-4-366-371>

ВВЕДЕНИЕ

Технология получения стальных полых заготовок на трубных заводах отличается высокими капитальными, энергетическими и эксплуатационными затратами, поскольку включает литье сплошных круглых заготовок на горизонтальных машинах непрерывной разливки стали, их нагрев в печах и прошивку на прессах или валковых прошивочных станах. Следует отметить, что это оборудование в основном зарубежного исполнения и в условиях антиросийских санкций его поставки могут быть прекращены. В связи с этим разработана отечественная установка совмещенного процесса непрерывного литья и деформации, которая успешно заменяет зарубежное оборудование, ее можно использовать для получения стальных полых заготовок за один проход [1–3]. Наиболее нагруженными элементами установки при получении полых заготовок являются калиброванные бойки, которые во время рабочего хода одновременно обжимают стенку полой заготовки и вытягивают ее из кристаллизатора. При этом в калиброванных бойках возникают суммарные напряжения от усилия обжатия и температурной нагрузки, которые снижают стойкость бойков. Для обоснованного выбора конструктивных параметров и материала калиброванных бойков необходимо определить их напряженное состояние при получении полых

заготовок на установке совмещенного литья и деформации. Для этого необходимо определить температурное поле и термоупругие напряжения в бойках при обжатии стенки полой заготовки [4–6].

В настоящей работе приведена методика расчета температурных полей и термоупругих напряжений в бойках установки совмещенного литья и деформации. Материал трубной заготовки – сталь марки 09Г2С; внутренний и наружный диаметры трубной заготовки 60 и 100 мм соответственно. Угловая скорость эксцентриковых валов 40 об/мин. При такой скорости время контакта бойка при рабочем ходе составляет 0,375 с, время паузы – $0,375 \cdot 3 = 1,125$ с. Температура трубной заготовки в зоне входа в боек 1200 °С, а после выхода из бойков 1000 °С.

Материал бойка – сталь инструментальная штампованная 4Х4ВМФС. Для расчета для этой стали в интервале температур от 20 до 700 °С принимали модуль упругости E , плотность ρ , теплопроводность λ , теплоемкость c , коэффициент линейного расширения α и предел текучести σ_T [2].

Геометрия бойка с размерами представлена на рис. 1.

В силу симметрии расчет выполняли для половины бойка (рис. 2). Приведена часть видимых линий, для которых будут ниже приведены результаты расчета.

Результаты расчета температур и напряжений приведены для трех сечений (1, 2 и 3), в каждом сечении

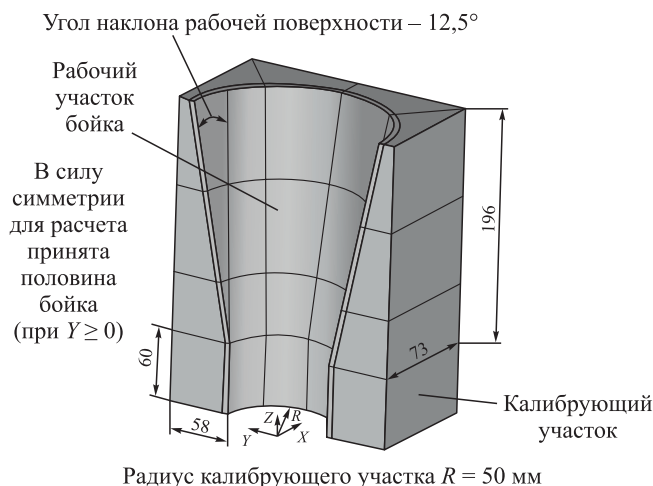


Рис. 1. Геометрия бойка с размерами

Fig. 1. Geometry of the striker with dimensions

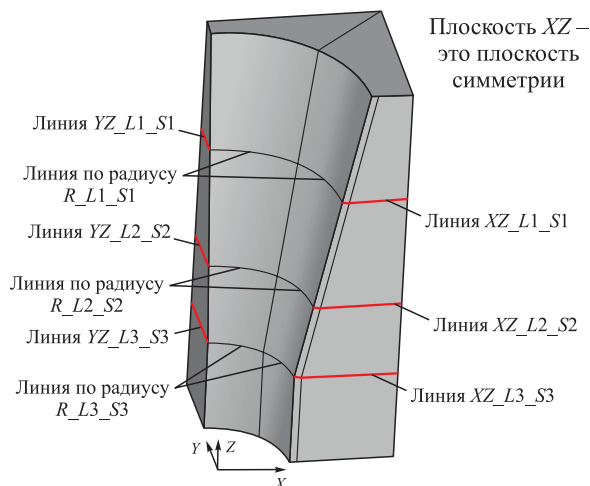


Рис. 2. Геометрия половины бойка (часть видимых линий)

Fig. 2. Geometry of one half of the striker (part of the visible lines)

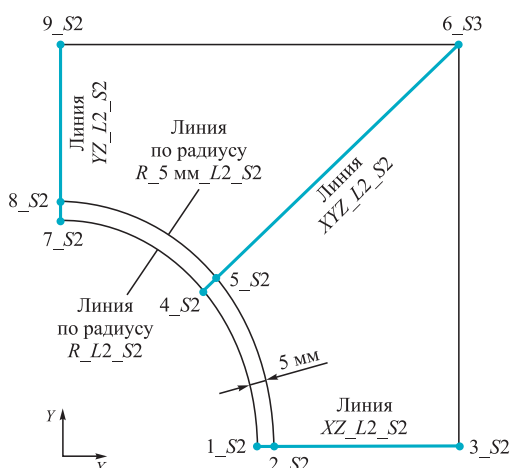


Рис. 3. Положение точек и линий в сечении 2 (сечения указаны на рис. 2)

Fig. 3. Position of points and lines in section 2 (sections are shown in Fig. 2)

результаты представлены для пяти линий. Положение сечений, линий для каждого сечения, а также точек, через которые проходят линии по этим сечениям, представлены на рис. 3. В табл. 1 приведены наименования всех линий, а также указаны точки, через которые проходят эти линии.

Расчеты теплового и напряженного состояний бойков для каждой тепловой нагрузки (граничных условий теплообмена), заданных теплофизических и механических свойств материала бойков, а также геометрии бойков выполняли в следующей последовательности:

1. При принятом тепловом элементе SOLID 70, заданных граничных условиях теплообмена и теплофизических параметрах (плотности, теплопроводности, теплоемкости) материала бойка определяли квазиустановившееся температурное поле бойка в конце обжатия и в конце паузы [7 – 9].

2. При принятом структурном элементе SOLID 185, модуле упругости и коэффициенте Пуассона, а также температурном поле в конце рабочего хода (из решения задачи на первом этапе) определяли термонапряженное состояние бойка в конце рабочего хода в направлении длины бойка [10 – 12].

Температурное поле бойков определяется на основе решения уравнения нестационарной теплопроводности с соответствующими начальными и граничными условиями с использованием пакета ANSYS [10]:

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

Все коэффициенты принимаем в зависимости от температуры бойков.

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

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

Начальная температура бойков 20 °С.

Для рабочей поверхности бойка граничные условия второго рода

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_s (t) = q, \quad (3)$$

где q – плотность теплового потока от металла очага деформации.

В период паузы для рабочей поверхности бойка граничные условия третьего рода имеют вид

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = -\alpha_1 (T - T_k), \quad (4)$$

где α_1 – эффективный коэффициент теплоотдачи на рабочую поверхность во время паузы; $T_k = 60$ °С – температура воды, подающейся на рабочую поверхность бойков во время паузы.

На торце бойка, задней стенке, сверху и снизу бойка граничные условия третьего рода имеют вид

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = -\alpha_2 (T - T_b), \quad (5)$$

где α_2 – коэффициент теплоотдачи при охлаждении задней стенки, верха и низа бойка водой или воздухом в зависимости от варианта расчета; $T_b = 60$ °С – температура окружающей среды со стороны торца бойка, задней стенки, верха и низа бойка.

Таблица 1. Наименования линий для трех сечений, точки, через которые проходят эти линии

Table 1. Names of the lines for three sections, the points through which these lines pass

Линия	Точки	Линия	Точки	Линия	Точки
Сечение 1		Сечение 2		Сечение 3	
XZ_L1_S1	1_S1, 2_S1, 3_S1	XZ_L2_S2	1_S2, 2_S2, 3_S2	XZ_L3_S3	1_S3, 2_S3, 3_S3
XYZ_L1_S1	4_S1, 5_S1, 6_S1	XYZ_L2_S2	4_S2, 5_S2, 6_S2	XYZ_L3_S3	4_S3, 5_S3, 6_S3
YZ_L1_S1	7_S1, 8_S1, 9_S1	YZ_L2_S2	7_S2, 8_S2, 9_S2	YZ_L3_S3	7_S3, 8_S3, 9_S3
R_L1_S1	1_S1, 4_S1, 7_S1	R_L2_S2	1_S2, 4_S2, 7_S2	R_L3_S3	3_S3, 4_S3, 7_S3
R_5mm_L1_S1	2_S1, 5_S1, 8_S1	R_5mm_L2_S2	2_S2, 5_S2, 8_S2	R_5mm_L3_S3	2_S3, 5_S3, 8_S3

В такой постановке одним из допущений является то, что при расчете температурных полей бойков пренебрегаем тепловым потоком от излучаемого металла [13 – 15].

Уравнения (1) – (5) образуют начальную краевую задачу определения нестационарного поля температур для бойков установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации [16 – 18].

Такая схема определения температуры и термоупругих напряжений в бойках установки методом конечных элементов реализована в одном из модулей пакета ANSYS [19; 20].

Значения температур во всех точках линий приведены в табл. 2.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА

От воздействия теплового потока во время обжатия заготовки температура контактной поверхности бойка составляет 370 – 451 °С (результаты представлены только для части бойка между сечениями 1 – 3, табл. 1, точки 7_S3 и 1_S1). Максимум температуры находится в сечении 1 на плоскости симметрии бойка. Далее на холостом ходу при охлаждении бойка водой температура контактной поверхности бойка снижается и находится в диапазоне 289 – 370 °С (точки 7_S3 и 1_S1). Максимум температуры находится в сечении 1 на плоскости симметрии бойка.

На глубине 5 мм температуры в конце контакта и в конце паузы при квазиустановившемся режиме одинаковые и зависят только от места положения, диапазон температур 295 – 392 °С (точки 8_S3 и 2_S1). Максимум температуры находится в сечении 1 на плоскости симметрии бойка.

Характер изменения температур как по толщине бойка, так и по радиусу подобен. Максимум температур

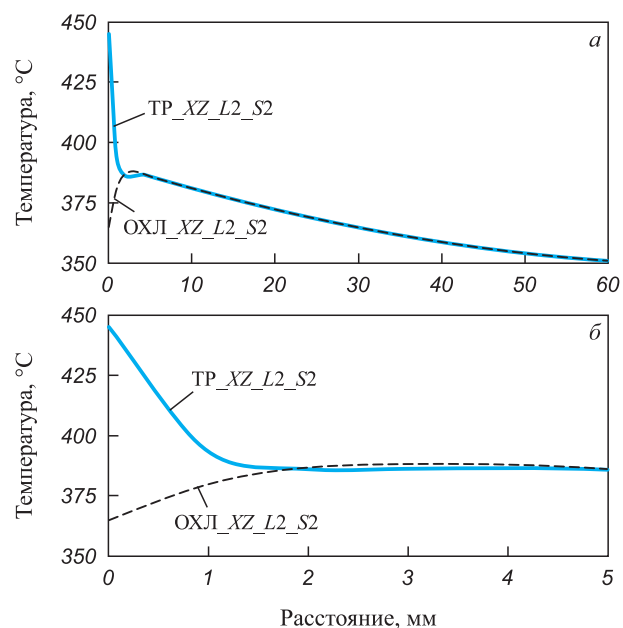


Рис. 4. Характер температур вдоль линии XZ_L2_S2 в зависимости от воздействия на боек теплового потока (TP) и охлаждения водой (OXЛ) по толщине бойка (а) и от поверхности контакта на глубине 5 мм (б)

Fig. 4. Nature of temperatures along the XZ_L2_S2 line due to the effect of heat flow (TP) and cooling with water (OXЛ) on the striker along its thickness (a) and from the contact surface to a depth of 5 mm (b)

в контакте и в паузе на рабочей поверхности бойка и на глубине 5 мм находится в части бойка, расположенной ближе к кристаллизатору; к калибрующему участку температура снижается. Изменение температуры по радиусу: максимум на плоскости симметрии; снижение к боковой поверхности бойка.

Температура бойка по толщине уменьшается, на поверхности со стороны суппорта составляет

Таблица 2. Значения температур во всех точках линий

Table 2. Temperature values at all points of the lines

Сечение 1			Сечение 2			Сечение 3		
Точка	Температура, °С		Точка	Температура, °С		Точка	Температура, °С	
	OXЛ	TP		OXЛ	TP		OXЛ	TP
1_S1	370	451	1_S2	365	445	1_S3	354	435
2_S1	392	392	2_S2	386	386	2_S3	373	373
3_S1	370	370	3_S2	350	350	3_S3	310	310
4_S1	368	448	4_S2	360	441	4_S3	348	429
5_S1	389	389	5_S2	381	381	5_S3	366	366
6_S1	344	344	6_S2	330	330	6_S3	285	285
7_S1	304	385	7_S2	294	375	7_S3	289	370
8_S1	314	314	8_S2	302	302	8_S3	295	295
9_S1	286	286	9_S2	252	252	9_S3	221	221

Примечание. OXЛ и TP – температура в конце паузы и в конце рабочего хода.

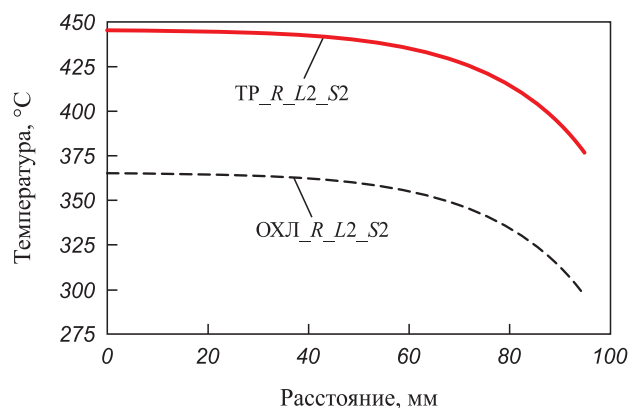


Рис. 5. Характер температур вдоль линии R_L2_S2 в зависимости от воздействия на боек теплового потока (ТР) и охлаждения водой (ОХЛ)

Fig. 5. Nature of temperatures along the R_L2_S2 line due to the effect of heat flow (TP) and cooling with water (ОХЛ) on the striker

285 – 370 °С (точки 6_С3 и 3_С1). Со стороны боковой поверхности бойка температура составляет 221 – 286 °С (точки 9_С3 и 9_С1).

Выравнивание температур наступает на глубине 2 мм от контактной поверхности бойка, что имеет место как по толщине бойка, так и по его радиусу.

На рис. 4 и 5 показано распределение температуры по характерным линиям калиброванного бойка в сечении 2 при обжатии заготовки и на холостом ходу при охлаждении бойка водой. Следует отметить, что температуры в характерных точках сечений 1 и 2 бойка отличаются незначительно (табл. 2).

Выводы

Разработана методика расчета температурных полей и термоупругих напряжений в калиброванных бойках установки совмещенного литья и деформации при получении стальных трубных заготовок. Определено распределение температур по характерным линиям калиброванного бойка при обжатии заготовки и на холостом ходу при охлаждении бойка водой. Установлено, что от воздействия теплового потока во время обжатия заготовки температура контактной поверхности бойка составляет 370 – 451 °С.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

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.
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.
3. Лехов О.С., Билалов Д.Х. Технологические возможности установок совмещенных процессов непрерывного литья

и деформации для производства металлопродукции. *Производство проката*. 2016;(7):24–26.

Lekhov O.S., Bilalov D.Kh. Technological capabilities of installations for combined continuous casting and deformation processes for the production of metal products. *Proizvodstvo prokata*. 2016;(7):24–26. (In Russ.).

4. Хлопонин В.Н., Косырева М.В., Косяк А.С. Влияние системы охлаждения на тепловые условия работы поверхностного слоя вала. В кн.: *Труды МИСиС. Вып. 100*. Москва: изд. МИСиС; 1977:90–93.
5. Боли Б., Уэйнер Дж. Теория температурных напряжений. Москва: Мир; 1976:349.
6. Лехов О.С. Исследование напряженно-деформированного состояния системы вальки – полоса при прокатке широкополочной балки в клетях универсально-балочного стана. Сообщение 2. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2014;57(12):15–19.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2014-12-15-19>
- 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;57(12):15–19. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2014-12-15-19>
7. Кушнер В.С., Верещака А.С., Схиртладзе А.Г., Негров Д.А. Технологические процессы в машиностроении Ч. II. Обработка металлов давлением и сварочное производство. Омск: изд. ОмГТУ; 2005:200.
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; 1990:126–132.
9. Лыков А.В. Теория теплопроводности. Москва: Высшая школа; 1967:600.
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. Tech. Conf., Pittsburgh, Pa, 28-31 March 1982*. New York; 1982:264–270.
12. Takashima Y., Yanagimoto I. Finite element analysis of flange spread behavior in H-beam universal rolling. *Steel Research International*. 2011;82(10):1240–1247.
<https://doi.org/10.1002/srin.201100078>
13. Kobayashi S., Oh S.-I., Altan T. Metal Forming and Finite-Element Method. New York: Oxford University Press; 1989:377.
14. Karrech A., Seibi A. Analytical model of the expansion in of tubes under tension. *Journal of Materials Processing Technology*. 2010;210:336–362.
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; 37(10-13):6918–6928.
<https://doi.org/10.1016/j.apm.2013.02.026>
16. Jansson N. Optimized sparse matrix assembly in finite element solvers with one-sided communication. In: *High Performance Computing for Computational Science – VECAPAR 2012*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2013:128–139.
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*. 1997;72(1):32–41.
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;63(8):1297–1304.
https://doi.org/10.2355/tetsutohagane1955.63.8_1297
 19. Marciniak Z., Duncan J.L., Hu S.J. *Mechanics of Sheet Metal Forming*. Oxford: Butterworth-Heinemann Elsevier Ltd.; 2002:228.
 20. Fujii H., Ohashi T., Hiromoto T. On the formation of the internal cracks in continuously cast slabs. *Tetsu-to-Hagane*. 1978;18(8): 510–518. https://doi.org/10.2355/tetsutohagane1955.62.14_1813

Сведения об авторах

Information about the Authors

Олег Степанович Лехов, д.т.н., профессор кафедры инжиниринга и профессионального обучения в машиностроении и металлургии, Российский государственный профессионально-педагогический университет

E-mail: MXLehov38@yandex.ru

Дамир Харасович Билалов, доцент кафедры инжиниринга и профессионального обучения в машиностроении и металлургии, Российский государственный профессионально-педагогический университет

ORCID: 0000-0002-4336-5339

E-mail: master_ddd@mail.ru

Oleg S. Lekhov, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair of Engineering and Vocational Training in Machinery and Metallurgy, Russian State Professional Pedagogical University

E-mail: MXLehov38@yandex.ru

Damir Kh. Bilalov, Assist. Prof. of the Chair of Engineering and Vocational Training in Machinery and Metallurgy, Russian State Professional Pedagogical University

ORCID: 0000-0002-4336-5339

E-mail: master_ddd@mail.ru

Поступила в редакцию 16.09.2024

После доработки 27.09.2024

Принята к публикации 25.12.2024

Received 16.09.2024

Revised 27.09.2024

Accepted 25.12.2024