



УДК 621.746+621.771

DOI 10.17073/0368-0797-2021-2-143-148



## РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ И ТЕРМОУПРУГИХ НАПРЯЖЕНИЙ В БОЙКАХ С БУРТАМИ УСТАНОВКИ СОВМЕЩЕННОГО ПРОЦЕССА НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ И ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ СТАЛЬНЫХ СОРТОВЫХ ЗАГОТОВОК. СООБЩЕНИЕ 2

О. С. Лехов<sup>1</sup>, А. В. Михалев<sup>2</sup><sup>1</sup> Российский государственный профессионально-педагогический университет (Россия, 620012, Екатеринбург, ул. Машиностроителей, 11)<sup>2</sup> ОАО «Уральский трубный завод» (Россия, 623107, Свердловская обл., Первоуральск, ул. Сакко и Ванцетти, 28)

**Аннотация.** Описаны постановка задачи и граничные условия для расчета осевых термоупругих напряжений в бойках с буртами установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации при получении трех стальных сортовых заготовок. Представлена схема расчетов для определения по известному температурному полю термоупругих напряжений в бойках с буртами с использованием пакета ANSYS. Результаты расчета термоупругих напряжений в калиброванных бойках выполнены в четырех сечениях бойка с буртами. При этом в каждом сечении результаты расчета приведены для четырех характерных линий и семи точек. Осевые термоупругие напряжения для семи характерных точек каждого сечения приведены для контактной поверхности бойка с буртами и приконтактного слоя на глубине 5 мм от контактной поверхности. Определено напряженное состояние калиброванного бойка в середине впадины между средними буртами и установлены закономерности распределения осевых и эквивалентных напряжений по толщине, длине и ширине бойка при обжатии сляба и на холостом ходу. Представлены результаты расчета термоупругих напряжений в вершине среднего бурта калиброванного бойка на контактной поверхности и в приконтактном слое при обжатии сляба и на холостом ходу. Приведены графики распределения термоупругих напряжений вдоль линии, проходящей через вершину бурта. Показаны зоны сжимающих и растягивающих термоупругих напряжений при обжатии сляба и на холостом ходу. Определен характер напряженного состояния в основании крайнего бурта при получении трех стальных сортовых заготовок на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации.

**Ключевые слова:** установка, непрерывное литье, деформация, калиброванный боек, бурт, сортовая заготовка, температура, конечный элемент, термоупругое напряжение

**Для цитирования:** Лехов О.С., Михалев А.В. Расчет температуры и термоупругих напряжений в бойках с буртами установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформирования при получении стальных сортовых заготовок. Сообщение 2 // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 2. С. 143–148. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-2-143-148>

## CALCULATION OF TEMPERATURE AND THERMOELASTIC STRESSES IN BACKUPS WITH COLLARS OF THE UNIT OF COMBINED CONTINUOUS CASTING AND DEFORMATION IN STEEL BILLETS PRODUCTION. REPORT 2

O. S. Lekhov<sup>1</sup>, A. V. Mikhalev<sup>2</sup><sup>1</sup> Russian State Professional Pedagogical University (11 Mashinostroitelei str., Yekaterinburg 620012, Russian Federation)<sup>2</sup> JSC “Ural Pipe Plant” (28 Sakko i Vantsetti str., Pervoural’sk, Sverdlovsk Region 623107, Russian Federation)

**Abstract.** The problem statement and boundary conditions for calculation of axial thermoelastic stresses in backups with collars of the unit of combined continuous casting and deformation are provided for production of three steel billets. The scheme of calculations for determination of thermoelastic stresses in backups with collars in known temperature field was stated using ANSYS software. The results of calculation of thermoelastic stresses in shaped dies were performed in four sections of a backup with collars. In each section, calculation results are given for four typical lines and seven points. Values of axial thermoelastic stresses for seven typical points of each section are given for the contact surface of a backup with collars and the contact layer at a depth of 5 mm from the contact surface. The stress state of a shaped backup in the middle of depression between the middle collars was determined and the regularities of distribution of axial and equivalent stresses over the thickness, length and width of a backup were established during slab compression and at idle. The results of calculation of thermoelastic stresses in the top of the middle collar of a shaped backup on the contact surface and in the contact

layer during slab compression and at idle are presented. Graphs of thermoelastic stresses distribution along the line passing through the top of a collar are given, which show the zones of compressive and tensile thermoelastic stresses during slab compression and at idle. The character of the stress state in the base of extreme collar was determined for production of three steel billets in the unit of combined process of continuous casting and deformation.

**Keywords:** unit, continuous casting, deformation, shaped die, collar, billet, temperature, finite element, thermoelastic stress

**For citation:** Lekhov O.S., Mikhalev A.V. Calculation of temperature and thermoelastic stresses in backups with collars of the unit of combined continuous casting and deformation in steel billets production. Report 2. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 2, pp. 143–148. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-2-143-148>

## ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] представлены результаты расчета температуры бойков с буртами установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации при получении трех стальных сортовых заготовок.

Для рассчитанных полей температур необходимо определить осевые термоупругие ( $SX$ ,  $SY$ ,  $SZ$ ) и эквивалентные ( $SEQV$ ) напряжения, возникающие в калиброванных бойках при обжатии сляба и охлаждении их водой во время холостого хода.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ

Материал бойка – сталь марки 4Х4ВМФС. В силу симметрии для расчета термоупругих напряжений принята половина бойка [1]. Кроме температурной нагрузки на боек приложены также кинематические граничные условия:

- на поверхности  $XU$  задано отсутствие перемещения в направлении оси  $Z$ , что обусловлено симметрией расчетной модели [1];

- на задней поверхности бойка, контактирующей с суппортом, задано отсутствие перемещений по всем направлениям.

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Поскольку температурное поле бойка известно, то разрешающие уравнения [2 – 9] позволяют найти температурные перемещения во всех узлах конечно-элементного разбиения, а затем определить температурные деформации и термоупругие напряжения. Представленная схема выполнения расчетов

методом конечных элементов реализована в пакете ANSYS [10 – 20].

Результаты расчета термоупругих напряжений в бойках приведены в четырех сечениях [1]. При этом в каждом сечении результаты расчета приведены для четырех характерных линий и точек (рис. 1).

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Результаты расчета осевых и эквивалентных термоупругих напряжений от воздействия на боек теплового потока и охлаждения водой в характерных точках линии P4 приведены в табл. 1.

Конкретные значения напряжений для семи точек сечения 4 (точки 0 – 6) на контактной поверхности бойка представлены в табл. 1. В табл. 2 приведены значения напряжений в середине впадины между средними буртами (точки 0 и 0\_5), в вершине среднего бурта (точки 2 и 2\_5).

Представленные результаты характеризуют распределение осевых и эквивалентных термоупругих напряжений

Т а б л и ц а 1

Осевые и эквивалентные напряжения в точках линии P4 от воздействия на боек теплового потока (ТР) и охлаждения водой (ОХЛ)

Table 1. Axial and equivalent stresses at the points of the P4 line from the impact of the heat flow (HF) and water cooling (WC) on a backup

Точка	Напряжение, МПа, в конце паузы (ОХЛ)/в конце контакта (ТР)			
	SX	SY	SZ	SEQV
0	-18/-37	-128/-593	-488/-968	427/813
1	-69/-150	-115/-576	-413/-849	408/808
2	-3/13	128/-243	69/-242	118/262
3	-46/-128	-75/-536	-267/-706	282/688
4	-10/-29	-73/-538	-266/-744	247/643
5	-29/-108	-56/-513	-183/-610	195/604
6	1/-7	91/-257	0/-4	93/257
Максимум	-23/-46	-130/-594	-493/-976	432/820

П р и м е ч а н и е. На рисунках и в таблицах напряжения, возникающие в конце паузы (на холостом ходу), обозначены «ОХЛ», а в конце контакта (обжатия) – «ТР»

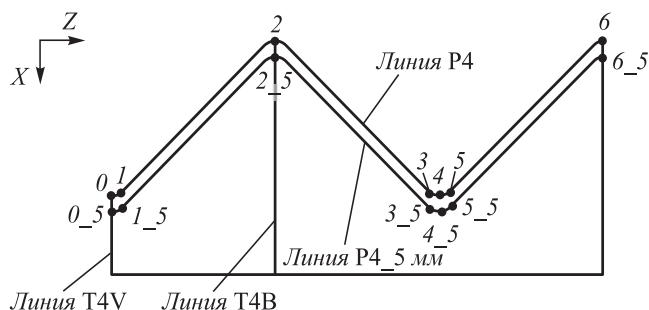


Рис. 1. Положение линий в сечении 4

Fig. 1. Position of lines in section 4

Т а б л и ц а 2

**Осевые и эквивалентные напряжения в точках линий T1V – T4V и T1B – T4B от воздействия на боек теплового потока (ТР) и охлаждения водой (ОХЛ)**

*Table 2. Axial and equivalent stresses at the points of the T1V – T4V and T1B – T4B lines from the impact of heat flow (HF) and water cooling (WC) on a backup*

Точка	Напряжение, МПа, в конце паузы (ОХЛ)/ в конце контакта (ТР)			
	<i>SX</i>	<i>SY</i>	<i>SZ</i>	<i>SEQV</i>
	на линии T1V			
0	0/0	-106/-582	-154/-629	137/607
0_5	1/1	-205/-186	-247/-230	230/213
на линии T2V				
0	0/0	-144/-619	-173/-640	160/630
0_5	-3/-2	-241/-225	-272/-252	255/238
на линии T3V				
0	0/0	-95/-565	-224/-665	195/621
0_5	-39/-43	-189/-172	-279/-258	210/188
на линии T4V				
0	-18/-37	-128/-593	-488/-968	427/813
0_5	-106/-147	-148/-139	-233/-210	121/84
на линии T1B				
2	-12/-31	-102/-530	85/-260	168/507
2_5	-44/46	-245/-184	-79/-53	214/235
на линии T2B				
2	-9/-28	-75/-503	85/-261	143/482
2_5	-50/39	-228/-168	-23/1	209/215
на линии T3B				
2	5/-14	103/-322	83/-260	104/326
2_5	-35/54	-83/-12	-17/4	59/60
на линии T4B				
2	-3/13	128/-243	69/-242	118/262
2_5	-46/62	-30/53	-20/13	26/47

жений как по толщине, так и по высоте и ширине бойка при обжатии сляба и на холостом ходу.

Рассмотрим сначала напряженное состояние в середине впадины между средними буртами по толщине и высоте бойка (табл. 2). Середина впадины между средними буртами находится в плоскости *XU* при *Z* = 0 (рис. 1, плоскость симметрии).

Представленные результаты свидетельствуют о том, что в середине впадины между буртами в зоне контакта бойка с заготовкой от воздействия температурной нагрузки в приконтактном слое бойка возникают сжимающие напряжения, имеющие максимальные значения на поверхности контакта (табл. 2). Максимальные тер-

моупругие напряжения возникают вдоль оси *Z* и достигают величины –968 МПа в сечении 4 по линии T4V (табл. 2). Затем сжимающие напряжения по толщине бойка уменьшаются и достигают минимальных значений на глубине 5 мм приконтактного слоя (табл. 2). Максимальные напряжения в направлении оси *Z* на глубине 5 мм не превышают величины –258 МПа. Эквивалентные напряжения на контактной поверхности бойка изменяются в середине впадины между буртами в диапазоне 607 – 813 МПа, а на глубине 5 мм – в диапазоне 84 – 238 МПа.

Рассмотрим напряженное состояние в вершине среднего бурта (табл. 2, рис. 1). Представленные результаты свидетельствуют о том, что в вершине среднего бурта в зоне контакта бойка со слябом от воздействия температурной нагрузки на поверхности контакта и в приконтактном слое бойка возникают сжимающие напряжения (табл. 2, рис. 1). Максимальные термоупругие напряжения возникают вдоль оси *Y* и достигают величины –530 МПа в сечении 1 по линии T1B (табл. 2). Затем сжимающие напряжения по толщине снижаются (как и для зоны впадины между буртами). При этом напряжения по оси *X* на глубине 5 мм от контактного слоя из сжимающих напряжений переходят в растягивающие (для линий T1B, T2B и T3B). Для линии T4B напряжения по оси *X* являются растягивающими как на поверхности контакта, так и на глубине 5 мм. Однако уровень этих растягивающих напряжений невелик и не превышает 62 МПа. Напряжения по оси *Y*, как и напряжения по оси *X*, из сжимающих напряжений переходят в растягивающие, но только для линии T4B. Представленные результаты свидетельствуют о том, что низ бойка в вершине среднего бурта на глубине 5 мм от воздействия температуры при рабочем ходе находится в условиях всестороннего растяжения, однако уровень этих напряжений в направлении оси *X* не превышает 62 МПа (табл. 2, линия T4B). Контактная же поверхность среднего бурта находится в условиях всестороннего сжатия, за исключением зоны перехода бойка в калибрующий участок. Эквивалентные напряжения на контактной поверхности бойка изменяются в вершине бурта в диапазоне 262 – 507 МПа, а на глубине 5 мм – в диапазоне 47 – 235 МПа.

Рассмотрим распределение осевых напряжений в приконтактном слое в вершине среднего бурта при охлаждении бойка водой на холостом ходу (табл. 2, рис. 2).

Напряженное состояние приконтактного слоя в вершине среднего бурта характеризуется наличием как сжимающих, так и растягивающих напряжений. Максимальными являются напряжения по осям *Y* и *Z*. При этом на контактной поверхности уровень сжимающих напряжений находится в диапазоне –75 ÷ 102 МПа, а растягивающих напряжений –69 ÷ 128 МПа. Особенностью напряженного состояния является то, что контактная поверхность с сечения 3 и до калибрующего участка находится в условиях всестороннего растяже-

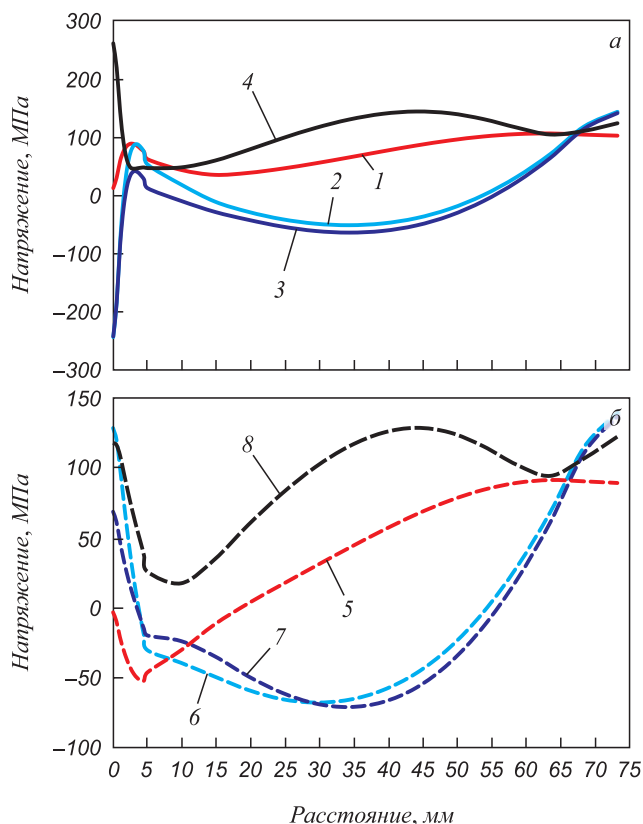


Рис. 2. Характер температурных напряжений вдоль линии T4B от воздействия на боек теплового потока (TP) (а) и охлаждения водой (ОХЛ) (б):  
 1 –  $SX_{TP\_T4B}$ ; 2 –  $SY_{TP\_T4B}$ ; 3 –  $SZ_{TP\_T4B}$ ;  
 4 –  $SEQV_{TP\_T4B}$ ;  
 5 –  $SX_{OXL\_T4B}$ ; 6 –  $SY_{OXL\_T4B}$ ; 7 –  $SZ_{OXL\_T4B}$ ;  
 8 –  $SEQV_{OXL\_T4B}$

Fig. 2. Nature of temperature stresses along the T4B line from the heat flow (HF) (a) and water cooling (WC) (б) impact on a backup :  
 1 –  $SX_{HF\_T4B}$ ; 2 –  $SY_{HF\_T4B}$ ; 3 –  $SZ_{HF\_T4B}$ ;  
 4 –  $SEQV_{HF\_T4B}$ ;  
 5 –  $SX_{WC\_T4B}$ ; 6 –  $SY_{WC\_T4B}$ ; 7 –  $SZ_{WC\_T4B}$ ;  
 8 –  $SEQV_{WC\_T4B}$

ния, а от сечения 3 до зоны начала очага деформации имеет растягивающие напряжения по оси Z. На глубине 5 мм все осевые напряжения являются сжимающими и не превышают 245 МПа.

На рис. 3 представлен график распределения термоупругих напряжений вдоль линии NB – KB, которая проходит по вершине разделяющего бурта при обжатии сляба.

Термоупругие напряжения при обжатии сляба в направлении осей Y и Z сжимающие, достигают наибольших величин –530 и –261 МПа (рис. 3).

На рис. 4 показаны закономерности распределения осевых термоупругих напряжений по линии RN – RK, которая расположена в основании крайнего бурта при обжатии сляба и на холостом ходу. При обжатии сляба все осевые термоупругие напряжения сжимающие и достигают в направлении оси Z наибольшей величины 610 МПа в сечении 4.

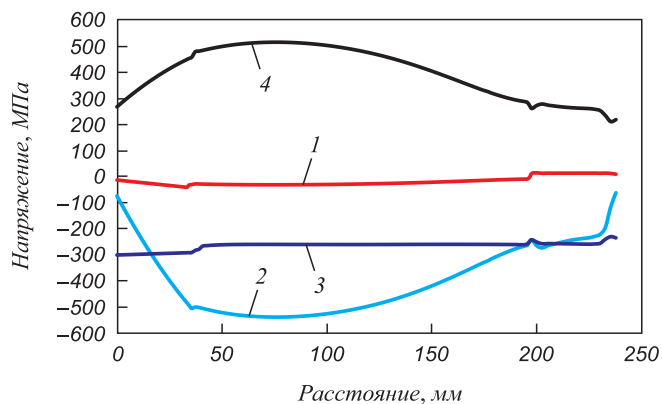


Рис. 3. Характер термоупругих напряжений вдоль линии NB – KB от воздействия на боек теплового потока (TP):  
 1 –  $SX_{TP\_NB-KB}$ ; 2 –  $SY_{TP\_NB-KB}$ ;  
 3 –  $SZ_{TP\_NB-KB}$ ; 4 –  $SEQV_{TP\_NB-KB}$

Fig. 3. Nature of thermoelastic stresses along the NB – KB line from the impact of heat flow (HF) on a backup :  
 1 –  $SX_{HF\_NB-KB}$ ; 2 –  $SY_{HF\_NB-KB}$ ;  
 3 –  $SZ_{HF\_NB-KB}$ ; 4 –  $SEQV_{HF\_NB-KB}$

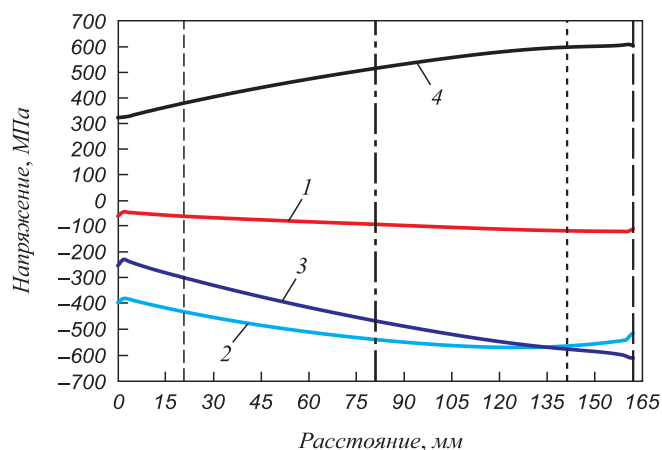


Рис. 4. Характер термоупругих напряжений вдоль линии RN – RK от воздействия на боек теплового потока (TP):  
 1 –  $SX_{TP\_RN-RK}$ ; 2 –  $SY_{TP\_RN-RK}$ ;  
 3 –  $SZ_{TP\_RN-RK}$ ; 4 –  $SEQV_{TP\_RN-RK}$   
 ---- сечение 1; ---- сечение 2; ---- сечение 3; ---- сечение 4

Fig. 4. Nature of thermoelastic stresses along the RN – RK line from the impact of heat flow (HF) on a backup:  
 1 –  $SX_{HF\_RN-RK}$ ; 2 –  $SY_{HF\_RN-RK}$ ;  
 3 –  $SZ_{HF\_RN-RK}$ ; 4 –  $SEQV_{HF\_RN-RK}$   
 ---- section 1; ---- section 2; ---- section 3; ---- section 4

## Выводы

Поставлена и решена в объемной постановке задача определения термоупругих напряжений в бойках с буртами установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации при получении трех стальных заготовок. Установлены закономерности распределения осевых и эквивалентных термоупругих напряжений на контактной поверхности и в приконтактном слое калиброванного бойка установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

## REFERENCES

1. Лехов О.С., Михалев А.В. Расчет температуры и термоупругих напряжений в бойках с буртами установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформирования при получении стальных сортовых заготовок. Сообщение 1 // Известия вузов. Черная металлургия. 2020. № 11-12. С. 960–964. <http://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-11-12-960-964>
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. Хлопонин В.Н., Косырева М.В., Косяк А.С. Влияние системы охлаждения на тепловые условия работы поверхностного слоя вальки. В кн.: Труды МИСиС. Вып. 100. М.: изд. МИСиС, 1977. С. 90–93.
4. Боли Б., Уэйнер Дж. Теория температурных напряжений. М.: Мир, 1976. 349 с.
5. 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. № 12. С. 15–19.
6. 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.
7. 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.
8. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 600 с.
9. Singh V., Das S.K. Thermo-fluid mathematical modeling of steel slab casters: Progress in 21st century // ISIJ International. 2016. Vol. 56. No. 9. P. 1509–1518. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2015-620>
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 3<sup>rd</sup> 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 // Steel Research International. 2011. Vol. 82. No. 10. P. 1240–1247. <http://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 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. P. 336–362. <http://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.09.024>
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. <http://doi.org/10.1016/j.apm.2013.02.026>
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. 1997. Vol. 72. No. 1. P. 32–41. [http://doi.org/10.1016/S0924-0136\(97\)00126-X](http://doi.org/10.1016/S0924-0136(97)00126-X)
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. [http://doi.org/10.2355/tetsutohagane1955.63.8\\_1297](http://doi.org/10.2355/tetsutohagane1955.63.8_1297)
1. Lekhov O.S., Mikhalev A.V. 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. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2020, no. 11-12, pp. 960–964. (In Russ.). <http://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-11-12-960-964>
2. Lekhov O.S., Mikhalev A.V., Shevelev M.M. *Stresses in the Striker – Strip System when Making Steel Sheets at Continuous Casting and Deformation Plant*. Yekaterinburg: izd. UMTs UPI, 2018, 125 p. (In Russ.).
3. Khloponin V.N., Kosyryeva M.V., Kosyak A.S. Influence of cooling system on thermal conditions of roller surface work. In: *MISiS proceedings. Issue 100*. Moscow: NUST “MISIS”, 1977, pp. 90–93. (In Russ.).
4. 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.).
5. 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.).
6. Kushner V.S., Vereshchaka A.S., Skhirtladze A.G., Negrov D.A. *Technological Processes in Mechanical Engineering. Part II. Metal Forming and Welding*. Omsk: Izd-vo OmSTU, 2005, 200 p. (In Russ.).
7. Bulanov L.V., Karlinskii S.E., Volegova V.E. Durability of CCM rolls with external and internal cooling. In: *Reliability of Large Machines. Collection of Papers of NIITyazhmash*. Sverdlovsk: izd. NIITyazhmash, 1990, pp. 126–132. (In Russ.).
8. Lykov A.V. *Theory of Heat Conduction*. Moscow: Vysshaya shkola, 1967, 600 p. (In Russ.).
9. Singh V., Das S.K. Thermo-fluid mathematical modeling of steel slab casters: Progress in 21<sup>st</sup> century. *ISIJ International*. 2016, vol. 56, no. 9, pp. 1509–1518. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2015-620>
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 3<sup>rd</sup> 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. *Steel Research International*. 2011, vol. 82, no. 10, pp. 1240–1247. <http://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 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. <http://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.09.024>
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, pp. 6918–6928. <http://doi.org/10.1016/j.apm.2013.02.026>
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*. 1997, vol. 72, no. 1 pp. 32–41. [http://doi.org/10.1016/S0924-0136\(97\)00126-X](http://doi.org/10.1016/S0924-0136(97)00126-X)
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. [http://doi.org/10.2355/tetsutohagane1955.63.8\\_1297](http://doi.org/10.2355/tetsutohagane1955.63.8_1297)

- |  |   |
|--|---|
| <p>19. Marciniak Z., Duncan J.L., Hu S.J. <i>Mechanics of Sheet Metal Forming</i>. Oxford: Butterworth-Heinemann Elsevier Ltd., 2002. 228 p.</p> <p>20. Fujii H., Ohashi T., Hiromoto T. On the formation of the internal cracks in continuously cast slabs // <i>Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan</i>. 1978. Vol. 18. No. 8. P. 510–518. <a href="http://doi.org/10.2355/isijinternational1966.18.510">http://doi.org/10.2355/isijinternational1966.18.510</a></p> | <p>19. Marciniak Z., Duncan J.L., Hu S.J. <i>Mechanics of Sheet Metal Forming</i>. Oxford: Butterworth-Heinemann Elsevier Ltd., 2002, 228 p.</p> <p>20. Fujii H., Ohashi T., Hiromoto T. On the formation of the internal cracks in continuously cast slabs. <i>Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan</i>. 1978, vol. 18, no. 8, pp. 510–518. <a href="http://doi.org/10.2355/isijinternational1966.18.510">http://doi.org/10.2355/isijinternational1966.18.510</a></p> |
|--|---|

**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

**Александр Викторович Михалев**, к.т.н., управляющий директор, ОАО «Уральский трубный завод»

**E-mail:** mialex@trubprom.com

**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

**Aleksandr V. Mikhalev**, Cand. Sci. (Eng.), Managing Director, JSC “Ural Pipe Plant”

**E-mail:** mialex@trubprom.com

Поступила в редакцию 16.12.2019

После доработки 14.02.2020

Принята к публикации 25.02.2020

Received 16.12.2019

Revised 14.02.2020

Accepted 25.02.2020