

ИННОВАЦИИ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ  
ПРОМЫШЛЕННОМ И ЛАБОРАТОРНОМ  
ОБОРУДОВАНИИ, ТЕХНОЛОГИЯХ И МАТЕРИАЛАХINNOVATION IN METALLURGICAL  
INDUSTRIAL AND LABORATORY EQUIPMENT,  
TECHNOLOGIES AND MATERIALS

УДК 621.746+621.771

DOI 10.17073/0368-0797-2025-6-621-625

Оригинальная статья  
Original article

## РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ И ТЕРМОУПРУГИХ НАПРЯЖЕНИЙ В БОЙКАХ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ СТАЛЬНЫХ ПОЛЫХ ЗАГОТОВОК НА УСТАНОВКЕ СОВМЕЩЕННОГО ЛИТЬЯ И ДЕФОРМАЦИИ. ЧАСТЬ 2

О. С. Лехов<sup>✉</sup>, Д. Х. Билалов

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

✉ MXlehov@yandex.ru

**Аннотация.** В статье решается задача определения термоупругих напряжений в калиброванных бойках установки совмещенного литья и деформации при получении стальных полых заготовок с использованием разработанной авторами методики расчета. Авторы обосновывают актуальность определения термоупругих напряжений в калиброванных бойках при обжатии стенки полой заготовки и на холостом ходу при охлаждении бойков водой и представляют геометрию бойка для получения полой заготовки за один проход. Представлены исходные данные для расчета термоупругих напряжений в калиброванных бойках установки совмещенного литья и деформации при получении полых заготовок и температурные граничные условия для их расчета. Для определения температуры бойка приводятся граничные условия и значения теплового потока и эффективного коэффициента теплоотдачи. Результатом расчета термоупругих напряжений в четырех сечениях являются характерные линии и точки, расположенные на контактной поверхности бойка и в приконтактном слое на глубине 5 мм от рабочей поверхности. Для расчета термоупругих напряжений в калиброванных бойках с использованием метода конечных элементов с применением пакета ANSYS приводятся размеры сетки конечных элементов. Авторы определили величины и закономерности распределения термоупругих напряжений в калиброванном бойке при обжатии стенки полой заготовки и на холостом ходу при получении за один проход такой заготовки на установке совмещенного литья и деформации. На основании расчетных значений температуры и величины максимальных сжимающих термоупругих напряжений на контактной поверхности в качестве материала для изготовления бойков предложено использовать трубную заготовку.

**Ключевые слова:** установка, калиброванные бойки, литье, деформация, кристаллизатор, полая заготовка, температурное поле, термоупругие напряжения, 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 2. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2025;68(6):621–625.  
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-6-621-625>

## CALCULATION OF TEMPERATURE AND THERMOELASTIC STRESSES IN STRIKERS DURING PRODUCTION OF HOLLOW STEEL BILLETS IN A UNIT OF COMBINED CASTING AND DEFORMATION. PART 2

O. S. Lekhov<sup>✉</sup>, 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 thermoelastic stresses in calibrated strikers in a unit of combined casting and deformation during production of hollow steel billets using the calculation methodology developed by the authors. The authors substantiate the relevance of determining thermoelastic stresses in insulated strikers when compressing the wall of a hollow billet and at idle run when cooling the strikers with water, and describe the striker geometry to produce a hollow billet in one pass. 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 are given to calculate thermoelastic stresses in calibrated strikers using the finite element method with ANSYS package. The authors determined the magnitudes and patterns of distribution of thermoelastic stresses in a calibrated striker when compressing the wall of a hollow billet and at idle run when such a billet is produced in one pass in a unit of combined casting and deformation. Based on the calculated temperature values and the magnitude of the maximum compressive thermoelastic stresses on the contact surface of the strikers, it is proposed to use a pipe billet as a material for making strikers.

**Keywords:** unit, calibrated striker, casting, deformation, mold, hollow billet, temperature field, thermoelastic stresses, finite 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 2. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2025;68(6):621–625.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-6-621-625>

## ВВЕДЕНИЕ

Основными и наиболее нагруженными элементами установки совмещенного литья и деформации являются бойки [1; 2], которые во время рабочего хода одновременно обжимают стенку стальной полый оболочки и перемещают ее по направлению литья. При этом во время рабочего хода в бойках возникают суммарные напряжения от усилия обжатия и температурной нагрузки [3 – 5]. Таким образом, актуальной задачей является обоснование выбора материала бойков, обеспечивающего способность противостоять циклическим нагрузкам при воздействии механических и термоупругих напряжений [6 – 8].

Для расчета напряженного состояния бойка установки сначала определено его температурное поле на основе решения уравнения нестационарной теплопроводности с соответствующими начальными и граничными условиями [9 – 11].

Наружный и внутренний диаметры полый заготовки из стали 09Г2С составляют 100 и 60 мм. Угловая скорость эксцентриковых валов принята равной 40 мин<sup>-1</sup>. При такой скорости время контакта бойка со стенкой полый заготовки при рабочем ходе составляет 0,375 с, а время паузы – 1,125 с. Температура полый заготовки в зоне входа в бойки равна 1200 °С [12 – 14].

Геометрия бойка с размерами приведена в работе [9]. Итерационными расчетами установлено, что для обеспечения температуры на контактной поверхности бойка на уровне 350 °С при значении коэффициента теплоотдачи 2000 Вт/(м<sup>2</sup>·К) величина плотности теплового потока составляет 4,6 МВт/м<sup>2</sup> [15].

Установлено, что при воздействии теплового потока во время обжатия бойками стенки полый заготовки температура на контактной поверхности бойка находится в диапазоне 370 – 451 °С. Затем на холостом ходу при охлаждении бойков водой температура контактной поверхности бойка снижается и находится в диапазоне 289 – 370 °С.

По полученным температурным полям методом конечных элементов в пакете ANSYS [16] определены термоупругие напряжения в бойках установки (использованы элементы методик расчетов, изложенные в работах [16 – 18]). Размеры конечного элемента в

зонах очага деформации и калибрующих участков бойков приняты равными 1 мм. В силу симметрии расчет выполнялся для половины бойка, показанного на рис. 1 в работе [9]. Результаты расчета радиальных ( $SR$ ), тангенциальных ( $S\theta$ ), осевых ( $SZ$ ) и эквивалентных ( $SEQV$ ) термоупругих напряжений приведены только для характерных линий  $XZ\_L2\_S2$ ,  $XYZ\_L2\_S2$  и  $R\_L2\_S2$  и точек сечения 2, связанных с контактной поверхностью бойка (рис. 1).

В таблице приведены значения термоупругих напряжений в точках характерных линий сечения 2 от воздействия на боек теплового потока (ТР) и охлаждения водой (ОХЛ).

На рис. 2 показаны закономерности распределения термоупругих напряжений в бойках по характерной линии  $R\_L2\_S2$ .

Рассмотрим распределение термоупругих напряжений в бойках по характерным линиям сечения 2 (рис. 1), где возникают наибольшие сжимающие напряжения при обжатии стенки стальной полый заготовки. Так, в точке 1\_С2 линии  $XZ\_L2\_S2$ , которая проходит по оси симметрии калибра бойков, на

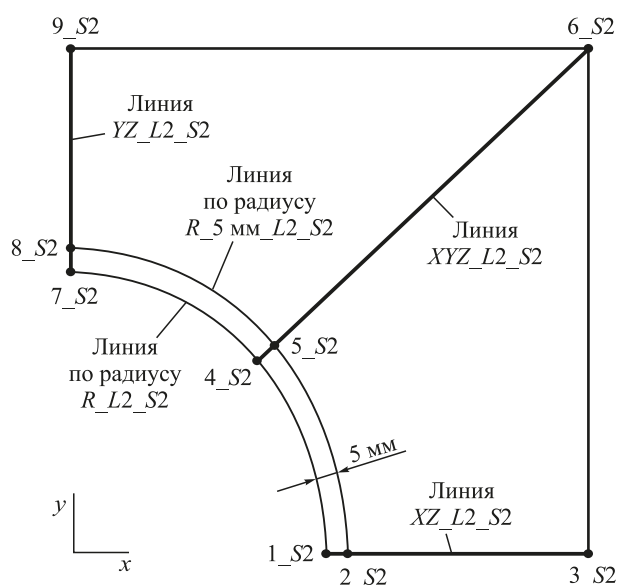


Рис. 1. Положение точек и линий в сечении 2

Fig. 1. Position of points and lines in section 2

### Значения радиальных, тангенциальных, осевых и эквивалентных напряжений в точках линий сечения 2 от воздействия на боек теплового потока (ТР) и охлаждения водой (ОХЛ)

Values of radial, tangential, axial and equivalent stresses at points of section 2 lines due to the effect of heat flow (TP) and cooling with water (OXL) on the striker

Точка	Напряжение, МПа							
	SR	S $\theta$	SZ	SEQV	SR	S $\theta$	SZ	SEQV
	В конце паузы (ОХЛ)				В конце контакта (ТР)			
1_S2	–9	–58	–191	178	–39	–589	–703	671
2_S2	–27	–243	–361	317	–33	–218	–348	297
3_S2	–56	–114	–62	56	–38	–113	–42	61
4_S2	–4	148	–142	258	–34	–381	–652	592
5_S2	–13	–91	–312	289	–18	–58	–295	278
6_S2	–542	–454	141	459	–561	–470	130	459
7_S2	21	25	341	342	–19	–59	–63	71
8_S2	53	–1	355	340	–32	–1	340	372
9_S2	0	1	857	856	0	1	859	858

контактной поверхности имеют место максимальные сжимающие осевые напряжения SZ величиной –703 МПа (рис. 2, таблица).

На холостом ходу при охлаждении бойков водой на контактной поверхности бойков в точке 1\_S2 сжимающие термоупругие напряжения S $\theta$  и SR имеют значительно меньшие величины и соответственно равны –58 и –191 МПа (рис. 2, таблица).

Следует отметить, что по линии XYZ\_L2\_S2 сжимающие термоупругие напряжения S $\theta$  и SZ на контактной поверхности бойков при обжати стенок полый заготовки достаточно высоки и в точке 4\_S2 они соответственно равны –381 и –652 МПа (рис. 2, таблица).

На холостом ходу на контактной поверхности бойка в точке 4\_S2 тангенциальные напряжения S $\theta$  (растягивающие) с максимальной величиной 148 МПа, а осевые напряжения SZ (сжимающие) величиной –142 МПа.

Однако по толщине бойка осевые напряжения сначала возрастают до значения –312 МПа, затем уменьшаются, меняют знак и становятся растягивающими с наибольшей величиной 141 МПа (см. таблицу).

Рассмотрим распределение термоупругих напряжений по радиусу контактной поверхности бойков (линия R\_L2\_S2, рис. 1).

При обжати стенок полый заготовки в точке 1\_S2 контактной поверхности бойка термоупругие напряжения S $\theta$  и SZ сжимающие величиной –589 и –703 МПа соответственно, затем по радиусу они уменьшаются и в точке 4\_S2 становятся равными –381 и –652 МПа, а в точке 7\_S2 соответственно –59 и –63 МПа (рис. 2, таблица).

На холостом ходу в точке 1\_S2 контактной поверхности бойка возникают сжимающие термоупругие напряжения S $\theta$  и SZ соответственно величиной –58 и –191 МПа,

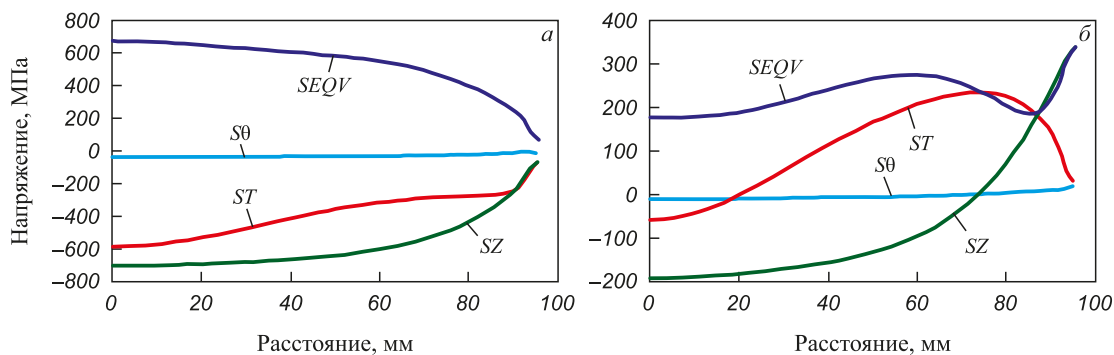


Рис. 2. Характер термоупругих напряжений вдоль линии R\_L2\_S2:

a – от воздействия на боек теплового потока (ТР) (в конце контакта);

б – от охлаждения водой (ОХЛ) (в конце паузы)

Fig. 2. Nature of thermoelastic stresses along the R\_L2\_S2 line:

a – due the effect of heat flow (TP) on the striker (at the end of the contact);

б – due to the effect of cooling with water (OXL) (at the end of the pause)

затем они по радиусу контактной поверхности бойка в точке 7\_S2 становятся растягивающими соответственно величиной 25 и 341 МПа (рис. 1, таблица).

В результате исследования установлено, что температура контактной поверхности бойков при обжатии стенки стальной полый заготовки может достигать 451 °С. При этой температуре величина сжимающих термоупругих напряжений на контактной поверхности бойков достигает 703 МПа.

Расчетные значения термоупругих напряжений хорошо коррелируют с результатами, полученными при выполнении аналогичных исследований с использованием программной системы анализа QForm [19].

С учетом вышеизложенного бойки установки совмещенного литья и деформации для получения стальных полых заготовок целесообразно изготавливать из стали 4Х4ВМФС. Это штамповая сталь с повышенными стойкостью к образованию трещин разгара и износостойкостью. Условный предел текучести стали при температуре 500 °С составляет 1309 МПа, что значительно превышает величину максимальных термоупругих напряжений от температурной нагрузки [20]. Сталь применяется, в том числе, для изготовления инструмента высокоскоростной машинной штамповки и высадки на горизонтально-ковочных машинах.

## Выводы

Разработана методика расчета термоупругих напряжений в калиброванных бойках установки совмещенного литья и деформации при получении стальных полых трубных заготовок. Определены величины и закономерности распределения термоупругих напряжений в трех сечениях калиброванного бойка при получении стальных полых заготовок на установке совмещенного литья и деформации. Установлено, что максимальная величина сжимающих термоупругих напряжений на контактной поверхности бойков достигает 703 МПа. Предложено бойки установки совмещенного литья и деформации для получения стальных полых заготовок изготавливать из стали 4Х4ВМФС, предел текучести которой при температуре 500 °С составляет 1309 МПа.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Лыков А.В. Теория теплопроводности. Москва: Высшая школа; 1967:600.
2. Matteo D. Wicon EVO – a preview of Danieli's easy-to-use rolling process simulation software for wire rod and bar mills. In: *Proceedings of the Rolling12, Trieste, Italy, 25–28 October 2022*. Trieste, Italy; 2022.
3. 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.
4. Кушнер В.С., Верещака А.С., Схиртладзе А.Г., Негров Д.А. Технологические процессы в машиностроении

- Ч. П. Обработка металлов давлением и сварочное производство. Омск: изд. ОмГТУ; 2005:200.
5. 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.).
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. Боли Б., Уэйнер Дж. Теория температурных напряжений. Москва: Мир; 1976:349.
8. 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>
9. 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>
- 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>
10. 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. Tech. Conf., Pittsburgh, Pa, 28-31 March 1982*. New York; 1982:264–270.
11. Karrech A., Seibi A. Analytical model of the expansion in of tubes under tension. *Journal of Materials Processing Technology*. 2010;210:336–362.
12. Stebunov S., Biba N., Vlasov A., Maximov A. Thermally and Mechanically Coupled Simulation of Metal Forming Processes. In: *Proceedings of the 10<sup>th</sup> Int. Conf. on Technology of Plasticity, Aachen, Germany, 25–30 September 2011*. Aachen, Germany; 2011.
13. Marciniak Z., Duncan J.L., Hu S.J. Mechanics of Sheet Metal Forming. Butterworth-Heinemann Elsevier Ltd.: Oxford; 2002:228.
14. 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.
15. 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.
16. ANSYS. Structural Analysis Guide. Rel. 15.0.
  17. 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>
  18. Jansson N. Optimized sparse matrix assembly in finite element solvers with one-sided communication. In: *High Performance Computing for Computational Science – VECPAR 2012*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2013:128–139.
  19. Стебунов С.А., Мальцев П.А., Гладков Ю.А., Белигин В.С., Алимов И.С. Моделирование и проектирование сортовой прокатки в условиях промышленного производства с применением QForm и Калибер. В сб.: *Труды XIV конгресса прокатчиков. Череповец, 16–18 апреля 2024*. Череповец; 2024:112–114.
  20. 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.
- Bulanov L.V., Karlinskii S.E., Volegova V.E. Durability of casters for external and internal cooling. In: *Reliability of Large Machines. Collection of Sci. Papers of NIItiazhmash*. Sverdlovsk: NIItiazhmash; 1990:126–132. (In Russ.).

## 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 15.08.2025  
 После доработки 25.09.2025  
 Принята к публикации 10.10.2025

Received 15.08.2025  
 Revised 25.09.2025  
 Accepted 10.10.2025