

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

UDC 621.746+621.771

DOI 10.17073/0368-0797-2024-4-457-462



Original article

Оригинальная статья

STRESS STATE OF BILLET – MANDREL SYSTEM DURING PRODUCTION OF HOLLOW STEEL BILLET IN A UNIT OF CONTINUOUS CASTING AND DEFORMATION. PART 2

O. S. Lekhov¹, A. V. Mikhalev², S. O. Nepryakhin³¹ Russian State Vocational Pedagogical University (11 Mashinostroitelei Str., Yekaterinburg 620012, Russian Federation)² JSC “Ural Pipe Plant” (28 Sakko i Vantsetti Str., Pervouralsk, Sverdlovsk Region 623107, Russian Federation)³ Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin (28 Mira Str., Yekaterinburg 620002, Russian Federation)

✉ MXLehov@yandex.ru

Abstract. The paper presents the results of theoretical research of stress-strain state of a billet – mandrel system when producing steel hollow billets in a unit of combined continuous casting and deformation, in which the working surface of the calibrated anvils are made with a variable radius. The necessity of making the working surface of the calibrated anvils with a variable radius is substantiated and initial data for the calculations is given. The calculation results are considered along the lines of the volumetric model passing through the characteristic points of deformation centers. The authors determined the forces when the anvils compress the wall of a hollow billet and the force of pulling the hollow billet from the mold. The laws of metal axial displacements and stresses in the deformation centers during compressing the wall of a hollow billet was established at the combined process of continuous casting and deformation in the unit. Nature of the stressed state of the metal wall of a hollow billet is considered from the perspective of improving its quality. The technique studied allows to determine the stress-strain state of a mandrel when producing a hollow steel billet using such a unit. The authors provided the recommendations for reliable gripping and compression with calibrated anvils of a hollow steel billet coming from a water-cooled copper mold of the unit of combined continuous casting and deformation.

Keywords: unit, continuous casting, anvil, deformation, hollow billet, stress, finite element

For citation: Lekhov O.S., Mikhalev A.V., Nepryakhin S.O. Stress state of billet – mandrel system during production of hollow steel billet in a unit of continuous casting and deformation. Part 2. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2024;67(4):457–462.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-4-457-462>

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ СИСТЕМЫ ЗАГОТОВКА – ОПРАВКА ПРИ ПОЛУЧЕНИИ СТАЛЬНОЙ ПОЛОЙ ЗАГОТОВКИ НА УСТАНОВКЕ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ И ДЕФОРМАЦИИ. ЧАСТЬ 2

О. С. Лехов¹, А. В. Михалев², С. О. Непряхин³¹ Российский государственный профессионально-педагогический университет (Россия, 620012, Екатеринбург, ул. Машиностроителей, 11)² ОАО «Уральский трубный завод» (Россия, 623107, Свердловская обл., Первоуральск, ул. Сакко и Ванцетти, 28)³ Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (Россия, 620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19)

✉ MXLehov@yandex.ru

Аннотация. В статье представлены результаты теоретического исследования напряженно-деформированного состояния системы заготовка – оправка при производстве стальных полых заготовок на установке совмещенного непрерывного литья и деформации, в которой рабочие поверхности калиброванных бойков выполнены с переменным радиусом. Обоснована необходимость выполнения рабочей поверхности калиброванных бойков с переменным радиусом и приведены исходные данные для расчетов. Результаты рассматриваются по линиям объемной модели, проходящим через характерные точки очагов деформации. Авторы определили усилия при обжатии бойками

стенки полой заготовки и силу вытягивания полой заготовки из кристаллизатора установки. Исследованы закономерности осевых перемещений металла и напряжений в очагах деформации при сжатии стенки полой заготовки при совмещенном процессе непрерывного литья и деформирования. Характер напряженного состояния металлической стенки полой заготовки рассматривается с точки зрения повышения ее качества. Изученная методика позволяет определить напряженно-деформированное состояние оправки при изготовлении полой стальной заготовки с использованием установки непрерывного литья и деформации. Авторами представлены рекомендации для осуществления надежного захвата и обжатия калиброванными бойками полой стальной заготовки, поступающей из водоохлаждаемого медного кристаллизатора установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации.

Ключевые слова: установка, непрерывное литье, боек, деформация, полая заготовка, напряжение, конечный элемент

Для цитирования: Лехов О.С., Михалев А.В., Непряхин С.О. Напряженное состояние системы заготовка – оправка при получении стальной полой заготовки на установке непрерывного литья и деформации. Часть 2. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2024;67(4):457–462. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-4-457-462>

INTRODUCTION

The study [1] presents the results of calculating the stress-strain state of the metal in the deformation centers during the production of steel hollow billets in a unit of continuous casting and deformation, where the working surfaces of the anvils are made with a constant radius. This paper presents the results of calculating the bending zone and the deformation center of the tube during the compression of the billet by 5 mm with simultaneous lowering of the anvil by 5 mm, where the anvil's working surface is made with a variable radius. This configuration allows for reliable gripping and compression of the hollow billet by the anvils as it exits the unit's mold.

CALCULATION RESULTS

The simulation involved compressing billet by 5 mm (anvil movement of –5 mm along the X -axis) with simultaneously lowering the anvil by 5 mm (anvil movement of –5 mm along the Z -axis).

The results are presented through points along lines in the $Y = 0$ plane (Fig. 1).

The nature of the displacements and stresses is illustrated in Figs. 1 and 2.

In the Cartesian coordinate system, the displacement and stress lines align with those in the cylindrical coordinate system [2 – 4].

During compression of the hollow billet wall by the anvils, the force along the X -axis is 694 kN, and along the Y -axis, it is 384 kN. The pulling force of the billet from the crystallizer along the Z -axis is 41 kN.

In addition to the graphs (Fig. 2), Table 1 provides specific values of displacements and stresses at points 1 – 15. Since the maximum and minimum values of the parameters are not always located at these points, the maximum and minimum displacements and stresses along these three lines are also provided.

From the data, it is evident that along the length of the deformation center (line 2 – 3 – 4), at point 3, the billet wall is compressed by 5 mm with simultaneous movement of the billet by 5 mm in the casting direction

(Table 1, Fig. 2, *a*). Notably, when the hollow billet wall is compressed by the calibrated anvils, the metal displacement along the X -axis decreases to 3 mm (point 8), while along the Z -axis, it increases to 6.6 mm (Fig. 2, *b*, point 9).

When compressing the hollow billet with anvils designed with a variable radius working surface, the nature of the metal's stressed state in the deformation center changes [5 – 7]. In this case, the highest compressive stresses arise in the billet wall along the X -axis and line 3 – 8 – 13, with values of –152.0, –187.5, and –190.0 MPa, respectively (Table 1, Figs. 2, *c*, *d*, 3). The maximum compressive stress (–190 MPa) occurs at the contact surface between the hollow billet wall and the mandrel (Table 1, point 13).

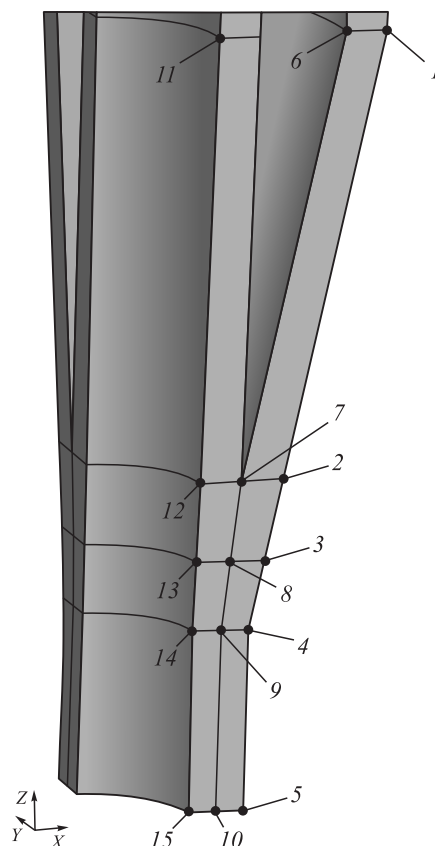


Fig. 1. Location of points for representing the calculation results

Рис. 1. Положение точек для представления результатов расчета

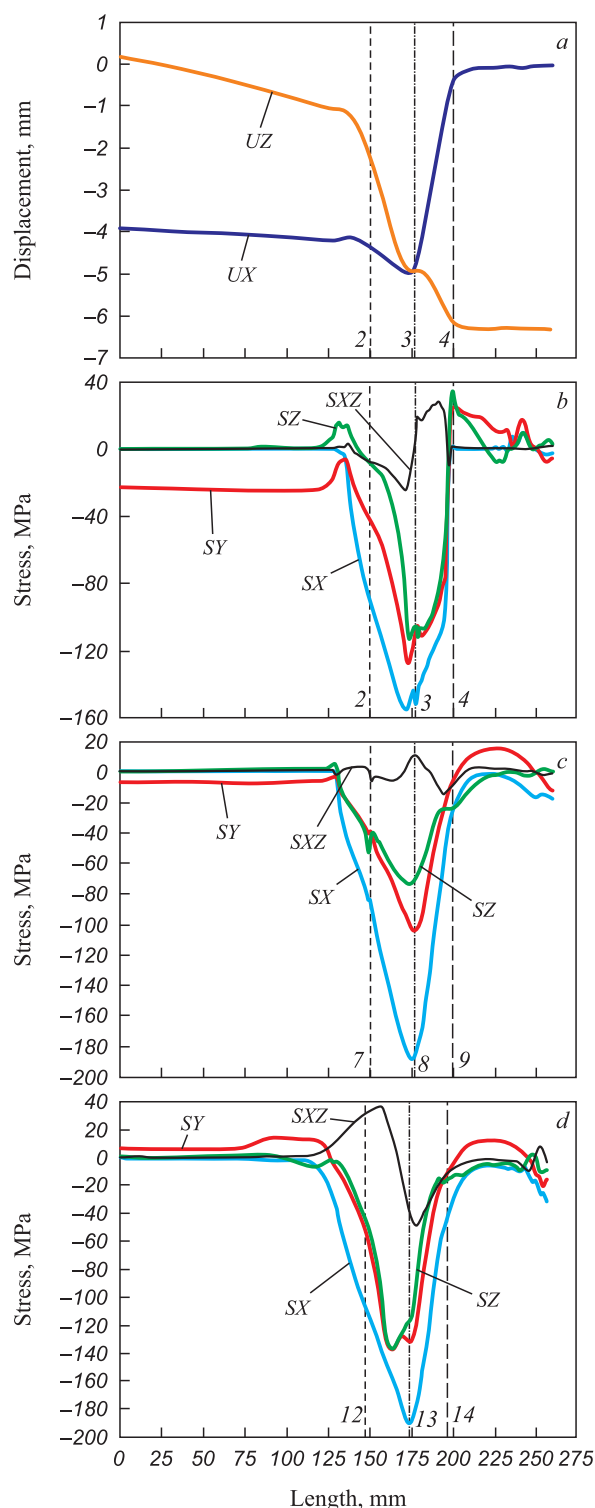


Fig. 2. Patterns of displacements (a) and stresses (b, c, d) along the lines passing through points 1 – 2 – 3 – 4 – 5 (a, b), 6 – 7 – 8 – 9 – 10 (c) and 11 – 12 – 13 – 14 – 15 (d) (billet compression with the anvil by 5 mm while simultaneous lowering by 5 mm, working surface of the anvil is made with a variable radius)

Рис. 2. Характер перемещений (a) и напряжений (b, c, d) по линиям, проведенным через точки 1 – 2 – 3 – 4 – 5 (a, b), 6 – 7 – 8 – 9 – 10 (c) и 11 – 12 – 13 – 14 – 15 (d) (обжатие заготовки бойком на 5 мм с одновременным опусканием последнего на 5 мм, рабочая поверхность бойка выполнена по переменному радиусу)

CALCULATION OF THE STRESS-STRAIN STATE

OF THE MANDREL

The stress-strain state of a mandrel with a diameter of 60 mm and a channel diameter of 10 mm was calculated. This was done by solving an elastoplastic problem using the finite element method within the ANSYS software package [8 – 10].

Table 1. Results of calculation of displacements and stresses at the points 1 – 5, 6 – 10 and 11 – 15 (billet compression with the anvil by 5 mm with simultaneous lowering of it by 5 mm; working surface of the anvil is made with a variable radius)

Таблица 1. Результаты расчета перемещений и напряжений в точках 1 – 5, 6 – 10 и 11 – 15 (обжатие заготовки бойком на 5 мм с одновременным опусканием последнего на 5 мм; рабочая поверхность бойка выполнена по переменному радиусу)

Point	Displacement, mm		Stress, MPa			
	UX	UZ	SX	SY	SZ	SXZ
Results along the line passing through points 1 – 5						
1	–3.9	0.2	0	–22.7	0.5	0
2	–4.4	–2.3	–91.0	–43.4	–8.7	–7.7
3	–5.0	–5.0	–152.0	–106.7	–105.7	5.2
4	–0.4	–6.2	0.2	24.4	29.4	1.5
5	–0.1	–6.3	–2.1	–5.2	0.9	1.2
Min along line 1 – 5	0	0.2	9.3	24.4	33.9	28.0
Max along line 1 – 5	–5.0	–6.3	–155.0	–127.0	–112.8	–24.3
Results along the line passing through points 6 – 10						
6	–4.1	0.2	0	–7.1	0.5	0
7	–2.3	–1.6	–84.7	–39.4	–44.7	–5.9
8	–3.0	–5.2	–186.5	–104.1	–71.0	10.8
9	–0.3	–6.6	–24.9	–5.4	–23.5	–9.1
10	0	–6.3	–17.6	–12.3	–0.2	–1.2
Min along line 6 – 10	0	0.2	0	15.1	5.2	10.8
Max along line 6 – 10	–4.4	–6.7	–188.4	–104.1	–73.7	–14.5
Results along the line passing through points 11 – 15						
11	0	–1.6	–0.2	6.0	1.6	–0.6
12	–0.1	–2.5	–106.4	–52.4	–43.0	31.3
13	–0.1	–3.7	–190.0	–131.2	–117.6	–39.1
14	0	–6.4	–42.0	–11.3	–15.5	–12.3
15	0	–6.3	–30.9	–16.1	–9.1	–2.5
Min along line 11 – 15	0	–1.4	–0.2	13.8	2.1	36.4
Max along line 11 – 15	–0.1	–6.5	–190.0	–137.0	–137.2	–48.6

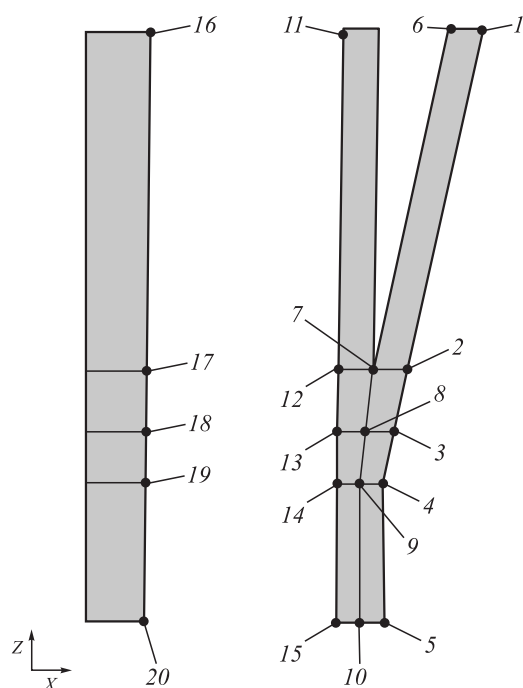


Fig. 3. Location of points for representing the calculation results of the mandrel

Рис. 3. Положение точек для представления результатов расчета оправки

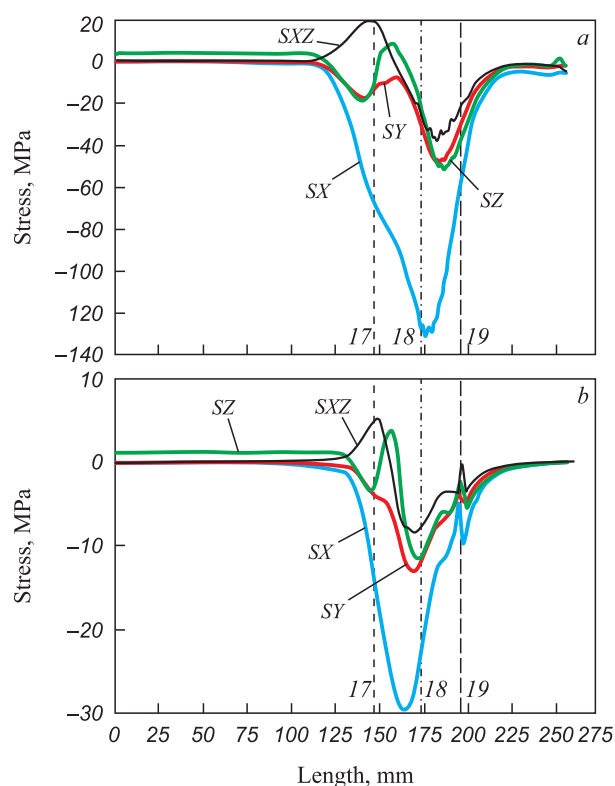


Fig. 4. Stress patterns along the lines passing through the points 16 – 17 – 18 – 19 – 20: a and b – compression by 5 and 11 mm

Рис. 4. Характер напряжений по линиям, проведенным через точки 16 – 17 – 18 – 19 – 20: а и б – обжатие 5 и 11 мм

Table 2. Results of calculation at the lines' points, maximum and minimum values of the studied parameters along the line passing through the points 16 – 20 (working surface of the anvil is made with a variable radius)

Таблица 2. Результаты расчета в точках линий, а также максимальные и минимальные значения исследуемых параметров по линии, проходящей через точки 16 – 20 (рабочая поверхность бойка по переменному радиусу)

Point	Displacement, mm		Stress, MPa			
	UX	UZ	SX	SY	SZ	SXZ
16	–0.01	–0.08	0	0	3.90	0
17	–0.07	–0.15	–66.90	–13.20	–10.00	19.60
18	–0.12	–0.27	–127.20	–29.20	–20.20	–25.60
19	–0.06	–0.27	–56.80	–30.10	–37.00	–22.10
20	0	–0.25	–5.30	–2.10	–4.00	–3.80
Min along line 16 – 20	0	–0.08	0	0	8.60	19.60
Max along line 16 – 20	–0.12	–0.29	–130.80	–47.50	–51.20	–37.40

The simulation involved compressing the billet by 5 mm (anvil movement of –5 mm along the X-axis) while simultaneously lowering the anvil by 5 mm (anvil movement of –5 mm along the Z-axis).

The calculation results are provided along the line passing through points 16 – 20 (Fig. 3). The stress distribution is shown in Fig. 4. In addition to the graphs, Table 2 provides specific values of displacements and stresses at points 16 – 20. Since the maximum and minimum values of the parameters are not always located at these points, the maximum and minimum displacements and stresses along this line are also provided [14 – 16].

The data indicate that at the contact surface between the mandrel and the billet wall in the deformation center (along line 17 – 18 – 19), the mandrel experiences maximum compressive stresses (–130.8 MPa) in the direction of the X-axis. This should be considered when selecting the structural parameters and material for the mandrel [17 – 20].

CONCLUSION

The regularities of metal displacement and axial stress distribution in the deformation centers during the compression of the hollow billet wall by anvils with a variable radius working surface have been determined. The stressed state of the mandrel during the production of steel hollow billets in a unit of combined continuous casting and deformation processes has also been established.

REFERENCES / СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Lekhov O.S., Mikhalev A.V., Nepryakhin S.O. Stressed state of the billet – mandrel system during production of hollow steel billet in a unit of continuous casting and deformation. Part 1. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2023;66(4):485–491. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-4-485-491>
Лехов О.С., Михалев А.В., Непряхин С.О. Напряженное состояние системы заготовка – оправка при получении стальной полой заготовки на установке непрерывного литья и деформации. Часть 1. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2023;66(4):485–491. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-4-485-491>
- Vyunnenberg K. Production of continuously cast billets with the highest quality. In: *Proceedings of the 6th Int. Congress of Iron and Steel*, vol. 3. Moscow: Mashinostroenie; 1990: 364–376.
Вюнненберг К. Производство непрерывнолитых заготовок, отвечающих высшим требованиям качества. В кн.: *Труды шестого международного конгресса железа и стали*. Т. 3. Москва: Машиностроение; 1990:364–376.
- 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
- 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
- Lekhov O.S., Mikhalev A.V. Continuous Casting and Deformation Unit for the Manufacture of Steel Sheets and Billets. Ekaterinburg: UPI; 2020:307. (In Russ.).
Лехов О.С., Михалев А.В. Установка непрерывного литья и деформации для производства стальных листов и сортовых заготовок. Екатеринбург: Изд-во УМЦ УПИ; 2020:307.
- Lekhov O.S., Guzanov B.N., Lisin I.V., Bilalov D.Kh. Study of combined continuous casting and cyclic deformation process for production of steel sheets. *Stal'*. 2016;(1):59–62. (In Russ.).
Лехов О.С., Гузанов Б.Н., Лисин И.В., Билалов Д.Х. Исследование совмещенного процесса непрерывной разливки и циклической деформации для получения листов из стали. *Сталь*. 2016;(1):59–62.
- Lekhov O.S., Mikhalev A.V., Shevelev M.M. Load and strain status of CCM backups and stripe deformation at production of steel sheets for welded pipes. Report 1. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2018;61(4):268–273. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-4-268-273>
Лехов О.С., Михалев А.В., Шевелев М.М. Нагруженность и напряженное состояние бойков установки непрерывного литья и деформации полосы при получении листов из стали для сварных труб. Сообщение 1. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2018;61(4):268–273. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-4-268-273>
- ANSYS. Structural Analysis Guide. Rel. 15.0.
- Bogatov A.A., Nukhov D.Sh., P'yankov K.P. Finite element modeling of plate rolling. *Metallurg*. 2015;(2):19–23. (In Russ.).
Богатов А.А., Нухов Д.Ш., Пьянков К.П. Конечно-элементное моделирование процесса толстолистовой прокатки. *Металлург*. 2015;(2):19–23.
- 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>
- Karrech A., Seibi A. Analytical model of the expansion in of tubes under tension. *Journal of Materials Processing Technology*. 2010;210:336–362.
- 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>
- Kobayashi S., Oh S.-I., Altan T. Metal Forming and Finite-Element Method. New York: Oxford University Press; 1989:377.
- Jansson N. Optimized sparse matrix assembly in finite element solvers with one-sided communication. In: *High Performance Computing for Computational Science – VECPAR 2012*. Springer: Berlin, Heidelberg; 2013:128–139.
- 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.
- 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.
- Efimenko L.A., Prygaev A.K. Determination of the Actual Mechanical Properties of Pipeline Metal Based on Hardness Measurement. Moscow: RTU nefti i gaza; 2007:18. (In Russ.).
Ефименко Л.А., Прыгаев А.К. Определение фактических механических свойств металла трубопроводов на основе измерения твердости. Москва: изд. РТУ нефти и газа; 2007:18.
- Kudrya A.V. Critical factors of metallurgical quality of high-strength steels. In: *Perspective Materials. Vol. V*. Tolyatti: TSU; 2013: 332–362. (In Russ.).
Кудря А.В. Критические факторы металлургического качества сталей повышенной прочности. В кн.: *Перспективные материалы. Т. V*. Тольятти: изд. ТГУ; 2013: 332–362.
- Kazakov A.A., Kiselev D.V. Modern methods for assessing the quality of the structure of materials based on panoramic studies based on the TXIXOMET image analyzer. In: *Perspective Materials. Vol. V*. Tolyatti: TSU; 2013:270–329. (In Russ.).
Казаков А.А., Киселев Д.В. Современные методы оценки качества структуры материалов на основе панорамных исследований на основе анализатора изображений TXIXOMET. В кн.: *Перспективные материалы. Т. V*. Тольятти: изд. ТГУ; 2013:270–329.
- Kyung-Moon L., Hu-Chul L. Grain refinement and mechanical properties of asymmetrically rolled low carbon steel. *Journal of Materials Processing Technology*. 2010;210(12):1574–1579. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.05.004>

Information about the Authors

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.), General Director, JSC “Ural Pipe Plant”

E-mail: mialex@trubprom.com

Sergei O. Nepriakhin, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair of Metal Forming, Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin

E-mail: s.o.nepriakhin@urfu.ru

Сведения об авторах

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., генеральный директор, ОАО «Уральский трубный завод»

E-mail: mialex@trubprom.com

Сергей Олегович Непряхин, к.т.н., доцент кафедры обработки металлов давлением, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

E-mail: s.o.nepriakhin@urfu.ru

Contribution of the Authors

O. S. Lekhov – formulation of the article idea, analysis of the calculation results, writing the text.

A. V. Mikhalev – conducting an experiment on a pilot unit.

S. O. Nepriakhin – conducting computer calculations.

Вклад авторов

О. С. Лехов – идея статьи, анализ результатов расчета, написание статьи.

А. В. Михалев – проведение эксперимента на опытной установке.

С. О. Непряхин – проведение компьютерных расчетов.

Received 15.03.2023

Revised 23.11.2023

Accepted 19.02.2024

Поступила в редакцию 15.03.2023

После доработки 23.11.2023

Принята к публикации 19.02.2024