

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

Оригинальная статья
Original article

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>

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>

ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] приведены результаты расчета напряженно-деформированного состояния металла в очагах деформации при получении стальной поллой заготовки на установке непрерывного литья и деформации, в которой рабочие поверхности бойков выполнены по постоянному радиусу. В настоящей работе представлены результаты расчета зоны гибки и очага деформации трубы при обжатии заготовки бойком на 5 мм с одновременным опусканием последнего на 5 мм, причем рабочая поверхность бойка выполнена по переменному радиусу. Это позволяет надежно осуществлять захват и обжатие бойками поллой заготовки, выходящей из кристаллизатора установки.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Проведено моделирование обжатия заготовки бойком на 5 мм (перемещение бойка на –5 мм по оси X) с одновременным опусканием бойка на 5 мм (перемещение бойка на –5 мм по оси Z).

Результаты расчета приведены через точки по линиям, расположенным в плоскости $Y = 0$ (рис. 1).

Характер перемещений и напряжений приведен на рис. 1, 2.

Для линий перемещения и напряжения в декартовой системе координат совпадают с напряжениями в цилиндрической системе координат [2 – 4].

При этом усилие при обжатии стенки поллой заготовки бойками по оси X составляет 694 кН, а по оси Y – 384 кН. Усилие вытягивания заготовки из кристаллизатора по оси Z – 41 кН.

Дополнительно к графикам (рис. 2) в табл. 1 приведены конкретные значения перемещений и напряжений в точках 1 – 15. Поскольку максимумы и минимумы параметров не всегда находятся в точках 1 – 15, то дополнительно приведены также максимальные и минимальные перемещения и напряжения вдоль этих трех линий.

Из полученных данных следует, что по длине очага деформации (линия 2 – 3 – 4) в точке 3 происходит обжатие стенки заготовки на 5 мм с одновременным перемещением заготовки на 5 мм по направлению литья

(табл. 1, рис. 2, а). Следует отметить, что при обжатии калиброванными бойками стенки поллой заготовки перемещение металла по оси X снижается до 3 мм (точка 8), а по оси Z увеличивается до 6,6 мм (рис. 2, б, точка 9).

При обжатии поллой заготовки бойками с рабочей поверхностью, выполненной по переменному радиусу, изменяется характер напряженного состояния металла в очаге деформации [5 – 7]. В этом случае возникают наибольшие сжимающие напряжения в стенке заготовки по оси X и линии 3 – 8 – 13 и, соответственно, равные –152,0, –187,5 и –190,0 МПа (табл. 1, рис. 2, в, г, 3). Причем максимальное сжимающее напряжение (–190 МПа) возникает на контактной поверхности стенки поллой заготовки с оправкой (табл. 1, точка 13).

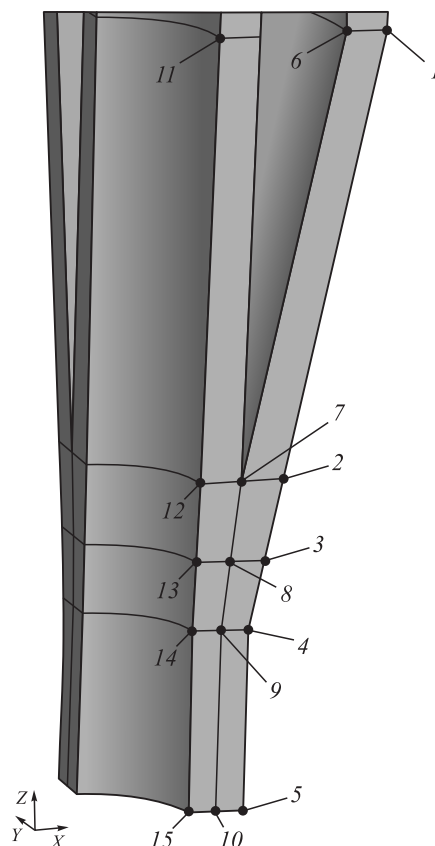


Рис. 1. Положение точек для представления результатов расчета

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

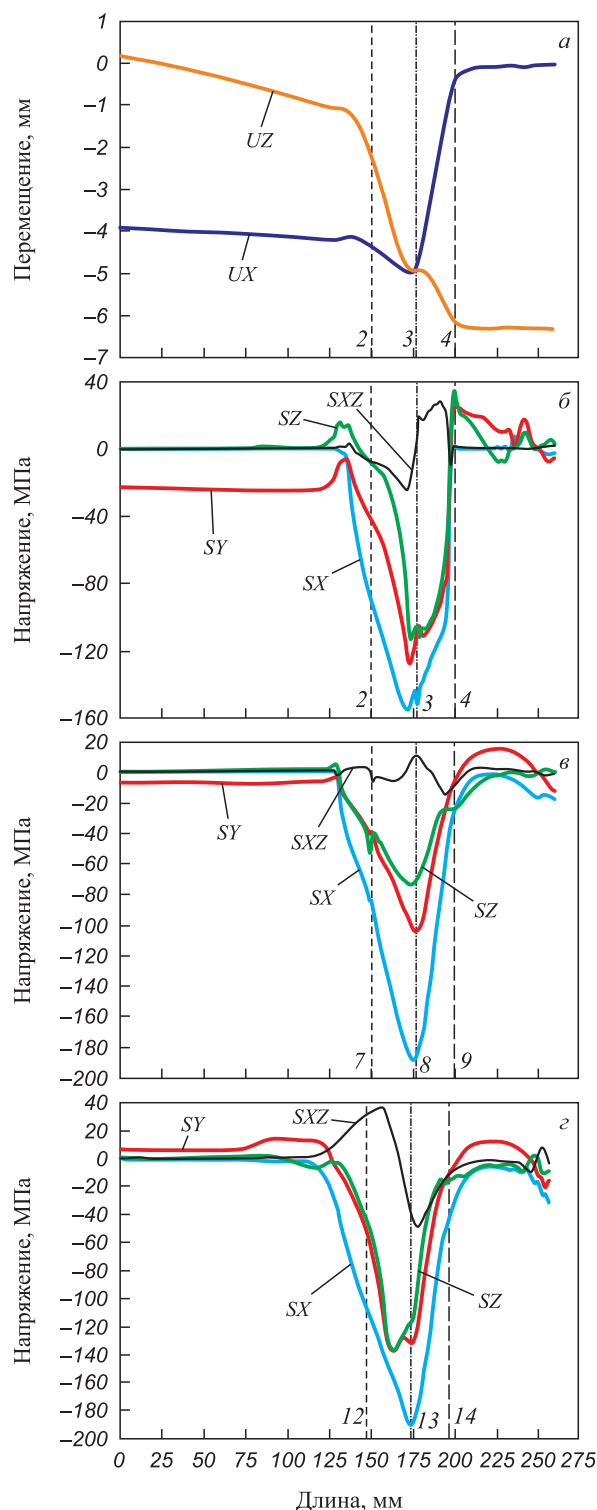


Рис. 2. Характер перемещений (а) и напряжений (б, в, з) по линиям, проведенным через точки 1 – 2 – 3 – 4 – 5 (а, б), 6 – 7 – 8 – 9 – 10 (в) и 11 – 12 – 13 – 14 – 15 (з) (обжатие заготовки бойком на 5 мм с одновременным опусканием последнего на 5 мм, рабочая поверхность бойка выполнена по переменному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

Fig. 2. Patterns of displacements (a) and stresses (б, в, з) along the lines passing through points 1 – 2 – 3 – 4 – 5 (a, б), 6 – 7 – 8 – 9 – 10 (в) and 11 – 12 – 13 – 14 – 15 (з) (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)

РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ОПРАВКИ

Приведены результаты расчета напряженно-деформированного состояния оправки диаметром 60 мм с диаметром канала 10 мм. Для этого решена упруго-пластическая задача методом конечных элементов

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)

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)

Точка	Перемещение, мм		Напряжение, МПа			
	UX	UZ	SX	SY	SZ	SXZ
Результаты по линии, проходящей через точки 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 по линии 1 – 5	0	0,2	9,3	24,4	33,9	28,0
Max по линии 1 – 5	-5,0	-6,3	-155,0	-127,0	-112,8	-24,3
Результаты по линии, проходящей через точки 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 по линии 6 – 10	0	0,2	0	15,1	5,2	10,8
Max по линии 6 – 10	-4,4	-6,7	-188,4	-104,1	-73,7	-14,5
Результаты по линии, проходящей через точки 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 по линии 11 – 15	0	-1,4	-0,2	13,8	2,1	36,4
Max по линии 11 – 15	-0,1	-6,5	-190,0	-137,0	-137,2	-48,6

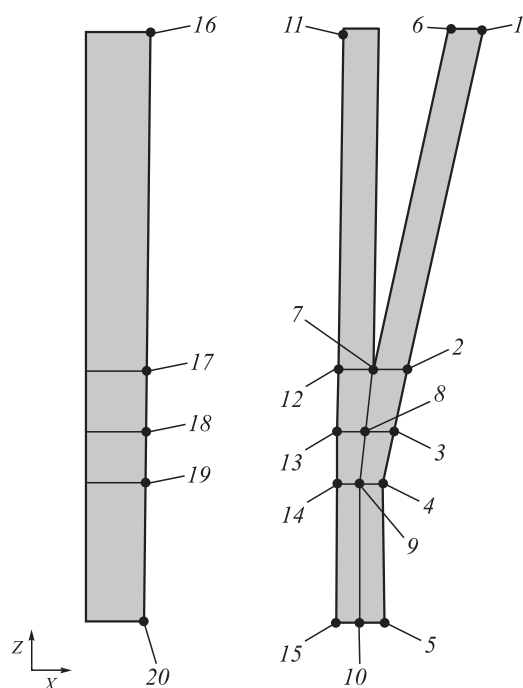


Рис. 3. Положение точек для представления результатов расчета оправки

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

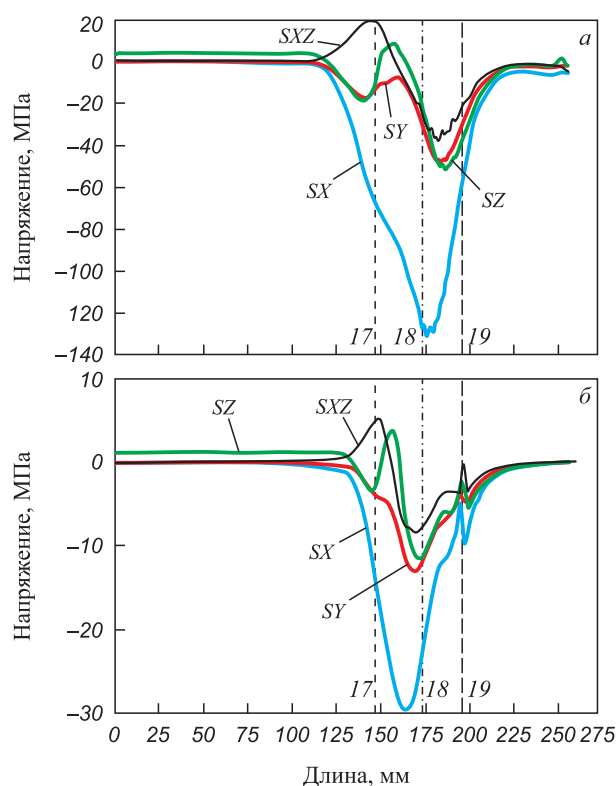


Рис. 4. Характер напряжений по линиям, проведенным через точки 16–17–18–19–20:
а и б – обжатие 5 и 11 мм

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

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)

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)

Точка	Перемещение, мм		Напряжение, МПа			
	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 по линии 16–20	0	–0,08	0	0	8,60	19,60
Max по линии 16–20	–0,12	–0,29	–130,80	–47,50	–51,20	–37,40

в объемной постановке в многофункциональном пакете ANSYS [8–10].

Проведено моделирование [11–13] обжатия заготовки бойком на 5 мм (перемещение бойка на –5 мм по оси X) с одновременным опусканием бойка на 5 мм (перемещение бойка на –5 мм по оси Z).

Результаты расчета приведены по линии, проведенной через точки 16–20 (рис. 3). Характер напряжений приведен на рис. 4. Дополнительно к графикам в табл. 2 приведены конкретные значения перемещений и напряжений в точках 16–20. Поскольку максимумы и минимумы параметров не всегда находятся в точках 16–20, то дополнительно приведены также максимальные и минимальные перемещения и напряжения вдоль этой линии [14–16].

Из расчетных данных следует, что на контактной поверхности оправки со стенкой заготовки в зоне очага деформации (по линии 17–18–19) в оправке возникают максимальные сжимающие напряжения (–130,8 МПа) в направлении оси X. Это следует учитывать при выборе конструктивных параметров и материала оправки [17–20].

Выводы

Определены закономерности распределения перемещений металла и осевых напряжений в очагах деформации при обжатии стенки полой заготовки бойками, рабочая поверхность которых выполнена по переменному радиусу. Определено напряженное состояние

оправки при получении стальной полой заготовки на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. 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>
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.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-4-485-491>
2. 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.
3. 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
4. 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
5. 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.
6. 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., 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.)
7. 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>
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>
8. ANSYS. Structural Analysis Guide. Rel. 15.0.
9. Богатов А.А., Нухов Д.Ш., Пьянков К.П. Конечно-элементное моделирование процесса толстолистовой прокатки. *Металлург*. 2015;(2):19–23.
Bogatov A.A., Nukhov D.Sh., P'yankov K.P. Finite element modeling of plate rolling. *Metallurg*. 2015;(2):19–23. (In Russ.).
10. 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>
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. 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>
13. Kobayashi S., Oh S.-I., Altan T. Metal Forming and Finite-Element Method. New York: Oxford University Press; 1989:377.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. Ефименко Л.А., Прыгаев А.К. Определение фактических механических свойств металла трубопроводов на основе измерения твердости. Москва: изд. РТУ нефти и газа; 2007:18.
18. Кудря А.В. Критические факторы металлургического качества сталей повышенной прочности. В кн.: *Перспективные материалы. Т. V*. Тольятти: изд. ТГУ; 2013:332–362.
19. Казаков А.А., Киселев Д.В. Современные методы оценки качества структуры материалов на основе панорамных исследований на основе анализатора изображений ТХИХОМЕТ. В кн.: *Перспективные материалы. Т. V*. Тольятти: изд. ТГУ; 2013:270–329.
20. 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>

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

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

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

Aleksandr V. Mikhalev, Cand. Sci. (Eng.), General Director, JSC “Ural
Pipe Plant”
E-mail: mialex@trubprom.com

Sergei O. Nepryakhin, 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

Вклад авторов

Contribution of the Authors

О. С. Лехов – идея статьи, анализ результатов расчета, написание
статьи.
А. В. Михалев – проведение эксперимента на опытной установке.
С. О. Непряхин – проведение компьютерных расчетов.

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. Nepryakhin – conducting computer calculations.

Поступила в редакцию 15.03.2023
После доработки 23.11.2023
Принята к публикации 19.02.2024

Received 15.03.2023
Revised 23.11.2023
Accepted 19.02.2024