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 10.17073/0368-0797-2023-4-485-491

CC BY

Оригинальная статья
Original article

Напряженное состояние системы заготовка – оправка при получении стальной полой заготовки на установке непрерывного литья и деформации. Часть 1

О. С. Лехов[1], **А. В. Михалев**[2], **С. О. Непряхин**[3]

[1] **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)

MXLehov38@yandex.ru

Аннотация. Приводится обоснование актуальности получения непрерывнолитых стальных трубных полых заготовок с позиции улучшения качества труб из углеродистых и легированных сталей. Представлена оценка качества внутренней поверхности труб, прокатанных из стальных сплошных трубных заготовок. Предлагается новая технология получения стальных трубных полых заготовок на ресурсосберегающей установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации. Приводится фотография участка непрерывного литья и деформации ОАО «Уральский трубный завод», показана опытная установка совмещенного процесса непрерывного литья и деформации. Статья содержит результаты теоретического исследования напряженно-деформированного состояния оправки и участков трубной заготовки при обжатии ее бойками установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации. В статье рассматривается общая модель системы кристаллизатор – бойки. Приведены исходные данные для расчета, размеры полой трубной заготовки и описание калибровки бойков для обжатия стальной полой заготовки. Рассматривается температурное поле полой заготовки. Для моделирования напряженно-деформированного состояния металла в очагах деформации и оправке рассматриваются четыре контактные пары. Излагается методика расчета с использованием метода конечных элементов и приводятся размеры конечного элемента в очагах деформации полой заготовки. Установлены величины и закономерности изменения перемещений металла и осевых напряжений в очагах деформации при получении стальных полых заготовок на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации (бойки выполнены по постоянному радиусу). Авторы дают оценку напряженного состояния металла в очагах деформации с позиции улучшения качества стальных полых заготовок при получении на установке 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 деформирования. Часть 1. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2023;66(4):485–491. https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-4-485-491

Stress state of billet – mandrel system during production of hollow steel billet in a unit of continuous casting and deformation. Part 1

O. S. Lekhov[1], **A. V. Mikhalev**[2], **S. O. Nepryakhin**[3]

[1] **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)

© О. С. Лехов, А. В. Михалев, С. О. Непряхин, 2023

MXLehov38@yandex.ru

Abstract. The substantiation of the relevance of obtaining continuous cast steel pipe hollow billet is given from the position of improving the quality of pipes made of carbon and alloy steels is given. The article presents an assessment of the quality of the inner surface of pipes made of solid steel pipe billet. A new technology is proposed for the production of hollow steel pipe billets on a resource-saving unit of combined continuous casting and deformation. The photo of the continuous casting and deformation section of JSC Ural Pipe Plant is given, where a pilot unit of combined continuous casting and deformation is installed. The paper presents the results of a theoretical study of stress-strain state of the mandrel and sections of a pipe billet when it is compressed by the strikers of the unit of combined continuous casting and deformation. The authors discuss the general model of the mold – striker system. The initial data on calculation, dimensions of the hollow pipe billet and a description of the calibration of strikers for compression of a hollow steel billet are given. The temperature field of a hollow billet was determined. To simulate the stress-strain state of the metal in the roll pass and the mandrel, four contact pairs were considered. Calculations were made by the finite element method. The dimensions of the final element in the roll pass of hollow billet were determined. The authors established the values and patterns of changes in metal displacements and axial stresses in the roll pass during the production of hollow steel billets in the unit of combined continuous casting and deformation (strikers are made along a constant radius). The stress state of metal in the roll pass was assessed from the standpoint of improving the quality of hollow steel billets.

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

For citation: 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

Введение

В связи с увеличением выпуска и расширением сортамента бесшовных труб и повышением требований к их качеству особенно актуальны исследования по разработке новых способов и установок для получения непрерывнолитых трубных полых заготовок из углеродистых и легированных сталей. Установлено, что качество внутренней поверхности труб, полученных из полых заготовок, более высокое по сравнению с качеством труб, прокатанных из сплошных заготовок. Это объясняется тем, что в непрерывнолитой полой заготовке ликвационные зоны и усадочная рыхлость расположены внутри ее стенки, тогда как в сплошной заготовке они сосредоточены в осевой зоне.

Для промышленной реализации разработана новая технология получения стальных трубных полых заготовок на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации (рис. 1) [1 – 3].

Предлагаемая технология включает формирование в неразъемном медном кристаллизаторе стальной кольцевой оболочки со стенкой с жидкой фазой, смыкание бойками корочек стенки с вытеснением из нее жидкой фазы, обжатие затвердевшей стенки оболочки калиброванными бойками по всему периметру за один проход и калибровку готовой полой заготовки.

Постановка задачи и исходные данные для расчета

Для оценки новой технологии получения стальных полых заготовок и выбора основных параметров установки проведено теоретическое исследование. Общая модель кристаллизатора, бойка, оправки и корочек стенки полой заготовки представлены на рис. 2. Приведены размеры очагов деформации при гибке и обжатии бойками стенки полой заготовки, калибрующего участка и оправки. Для этой цели необходимо определить напряженно-деформированное состояние (НДС) металла в очагах деформации при гибке и обжатии стенки полой заготовки, а также напряжения в оправке при получении на установке стальной полой заготовки.

Для расчета НДС решали упругопластическую контактную задачу с учетом больших перемещений и деформаций [4 – 6].

Расчет выполнен методом конечных элементов в многофункциональном пакете ANSYS 15.0 [7 – 9]. На рис. 2 представлен общий вид элементов установки совмещенного процесса непрерывного литья и дефор-

Рис. 1. Установка непрерывного литья и деформации:
1 – индукционная печь; *2* – электродвигатель постоянного тока;
3 – редуктор-синхронизатор; *4* – станина установки

Fig. 1. Unit of continuous casting and deformation:
1 – induction furnace; *2* – DC electric motor;
3 – synchronizer geared system; *4* – bed

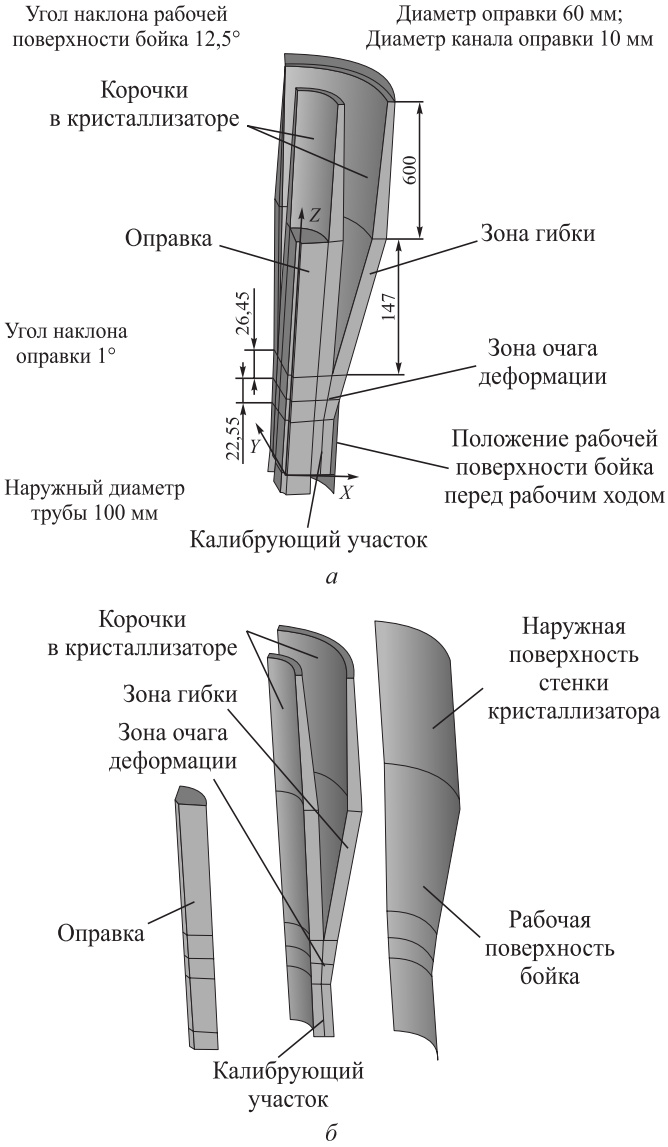

Рис. 2. Геометрия оправки, корочек в кристаллизаторе, зоны гибки, очага деформации и бойка:
а – общая модель; *б* – элементы модели

Fig. 2. Geometry of the mandrel, crusts in the mold, bending zone, roll pass, and striker
а – general model; *б* – model elements

мации, входящих в модель для расчетов. Наружный диаметр трубы составляет 100 мм; диаметр оправки – 60 мм; внутреннего канала оправки – 10 мм; длина калибрующего участка – 60 мм; очага деформации – 49 мм; толщина корочек в зоне гибки – 15 мм; жидкой фазы между корочками (где действует ферростатическое давление) принята равной 30 мм; угол наклона рабочей поверхности бойка – 12,5°; наклона оправки – 1°. Температура внутренней поверхности оболочек трубной заготовки (со стороны действия ферростатического давления) составляет 1450 °С, наружной поверхности оболочек (в зоне контакта с оправкой, стенками кристаллизатора и бойками) – 1200 °С. По толщине оправки и оболочек температура меняется по логарифмическому закону. Температура трубной заготовки в зоне входа в боек принята равной 1200 °С, а после выхода из бойков – 1000 °С. Угловая скорость эксцентриковых валов 40 об/мин. При такой скорости эксцентрикового вала время контакта заготовки с бойками при рабочем ходе составляет 0,375 с, а время паузы – 1,125 с. Материал оправки и трубной заготовки принят упругопластическим; бойка – упругим. Материал оправки и бойка – сталь марки 4Х4ВМФС; заготовки трубы – сталь марки 09Г2С. Зависимости модуля упругости и сопротивления пластической деформации от степени, скорости деформации и температуры для рассматриваемой стали представлены в работе [1], в которой графики приведены для диапазона температур 1200 – 1450 °С.

Для расчета НДС оправки и участков трубной заготовки при обжатии ее бойками, совершающими движение по траектории эксцентрикового вала, разработана конечно-элементная модель [10 – 12]. В модель для расчета входят корочки заготовки трубы внутри кристаллизатора, стенки кристаллизатора, контактирующие с корочками в кристаллизаторе, оправка, участок гибки, очаг деформации и боек. При этом корочки внутри кристаллизатора, оправка, участок гибки и очаг деформации представляют собой объемные тела. Материал оправки, корочек внутри кристаллизатора, участок гибки, очаг деформации и зона калибрующего участка приняты упругопластическими. В модели боек и стенки кристаллизатора приняты абсолютно жесткими, что позволило снизить размерность задачи [13 – 16]. Основные размеры элементов модели приведены на рис. 2. В сетке конечных элементов использованы элементы SOLID185, CONTA 174 и TARGE 170. Размер конечного элемента в зоне гибки, очага деформации и зоне калибрующего участка принят равным 1 мм, в остальных зонах – 2 мм.

Для моделирования НДС оправки, зоны гибки и очага деформации созданы четыре контактные пары: между оправкой и зоной гибки и очага деформации; между внутренней корочкой заготовки в кристаллизаторе и стенкой кристаллизатора; между наружной корочкой заготовки в кристаллизаторе и стенкой кристаллизатора; между участком зоны гибки, зоной очага деформации и рабочей поверхностью бойка.

В силу симметрии расчет проводился для четверти элементов, входящих в модель для расчета. При этом на поверхностях симметрии задавались кинематические граничные условия (отсутствие нормальных перемещений). Моделировали обжатие 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

Результаты расчета приведены по линиям через точки (рис. 3), расположенным в плоскости $Y = 0$.

Усилие обжатия бойка по оси *X* составляет 722 МПа, по оси *Y* – 399 МПа, усилие вытягивания по оси *Z* – 42 МПа.

Результаты расчета представлены в таблице (приведены конкретные значения перемещений и напряжений в точках *1 – 15*). Поскольку максимумы и минимумы параметров не всегда находятся в точках *1* и *15*, то дополнительно приведены также максимальные и минимальные перемещения и напряжения вдоль этих трех линий.

Характер напряжений в очагах деформации в направлении трех осей координат (*SX*, *SY*, *SZ*) показан на рис. 4 (обжатие заготовки бойком на 5 мм с одновременным опусканием последнего на 5 мм; рабочая поверхность бойка по постоянному радиусу).

Из эпюр осевых напряжений следует, что по мере обжатия бойками полой заготовки на их контактной поверхности в точке *3* возникает максимальное сжимающее напряжение *SX*, равное –147,9 МПа, при этом напряжения *SY* и *SZ* значительно ниже и равны –102,2 и –86,4 МПа (рис. 4). Наибольшее касательное напря-

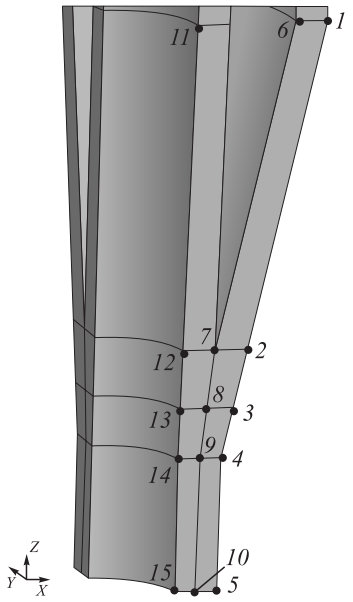

Рис. 3. Положение точек для представления результатов расчета

Fig. 3. Position of the points to represent the calculation results

Результаты расчета перемещений и напряжений

Results of calculation of displacements and stresses

Точка	Перемещение, мм		Напряжение, МПа			
	UX	*UZ*	*SX*	*SY*	*SZ*	*SXZ*
Результаты по линии, проходящей через точки *1 – 5*						
1	–3,2	0,8	–0,5	–32,8	–7,0	–0,5
2	–4,1	–1,1	–91,2	–42,0	–3,1	–6,8
3	–5,0	–4,8	–147,9	–102,2	–86,4	–19,8
4	–0,2	–5,2	–0,2	19,8	17,5	–0,1
5	0	–5,2	–1,7	–8,7	–0,7	0,3
Min по линии *1 – 5*	0	1,1	0,2	22,7	24,1	16,1
Max по линии *1 – 5*	–5,0	–5,2	–147,9	–102,2	–105,4	–22,9
Результаты по линии, проходящей через точки *6 – 10*						
6	–3,3	1,8	0,6	–3,6	11,9	3,0
7	–2,0	–0,1	–83,5	–39,9	–32,3	–6,8
8	–2,9	–3,7	–164,6	–89,0	–53,0	–4,2
9	–0,4	–5,5	–37,8	–19,4	–26,9	–17,2
10	0	–5,2	–8,8	–6,9	0,1	–0,2
Min по линии *6 – 10*	0	1,8	0,9	13,7	13,7	3,8
Max по линии *6 – 10*	–4,0	–5,5	–164,6	–89,6	–56,3	–20,9
Результаты по линии, проходящей через точки *11 – 15*						
11	0	0,2	0	–1,0	–7,9	–0,1
12	–0,1	0	–94,4	–68,3	–60,2	25,2
13	–0,2	–1,4	–175,5	–116,4	–102,4	–44,6
14	0	–5,2	–48,6	–16,1	–14,1	–14,5
15	0	–5,2	–15,7	–10,0	–0,1	–4,5
Min по линии *11 – 15*	0	0,6	0	10,9	1,6	25,2
Max по линии *11 – 15*	–0,2	–5,3	–179,0	–116,4	–102,4	–49,9

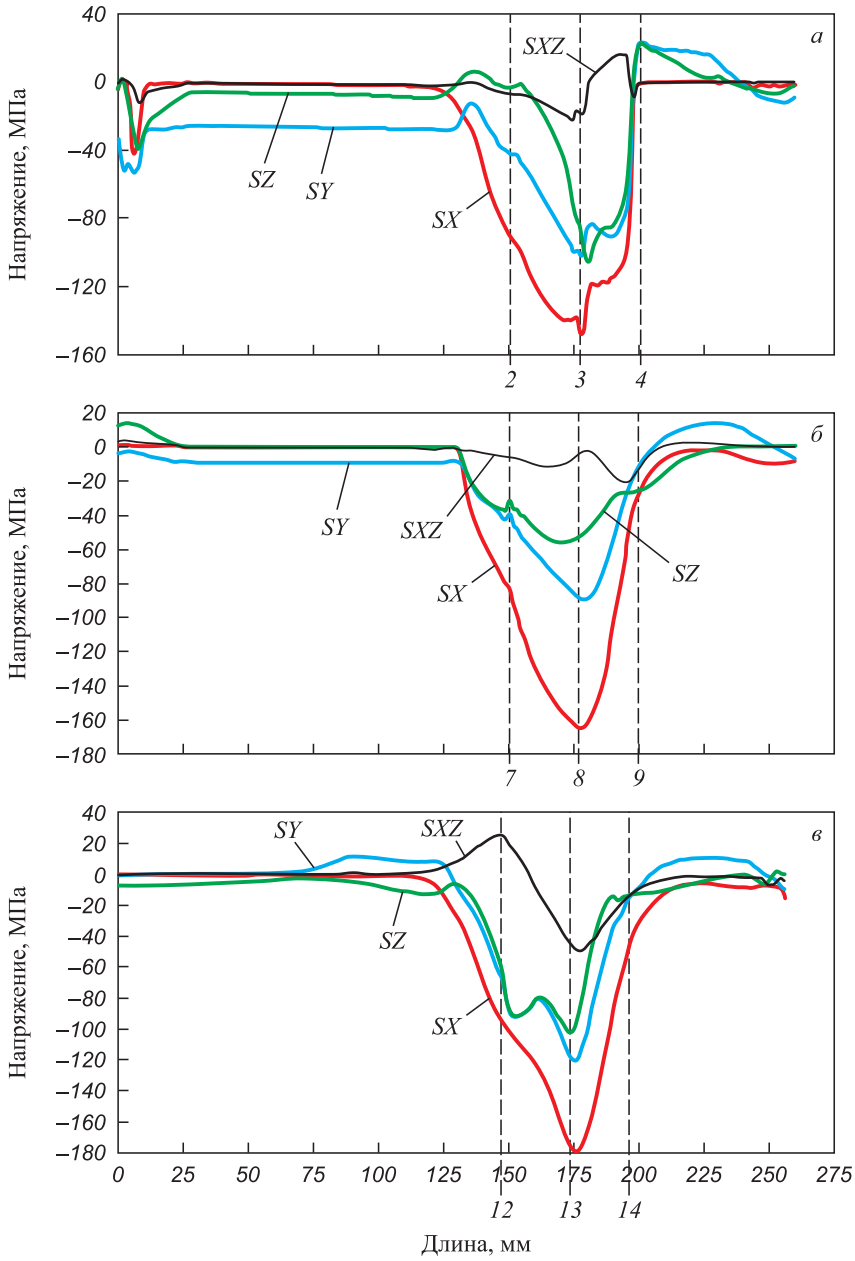

Рис. 4. Характер напряжений по линии, проведенной через точки *1 – 5* (*а*), *6 – 10* (*б*) и *11 – 15* (*в*)

Fig. 4. Nature of stresses along the line drawn through points *1 – 5* (*а*), *6 – 10* (*б*) and *11 – 15* (*в*)

жение *SXZ* в точке *3* составляет 19,8 МПА. По линии смыкания корочек стенки полой заготовки характер осевых напряжений изменяется, наибольшее значение, равное –164,6 МПа, имеет напряжение *SX* в точке *8*, при этом по другим осям координат напряжения значительно меньше (рис. 4, *б*, таблица). Следует отметить, что максимальные осевые напряжения *SX*, *SY*, *SZ* фиксируются на контактной поверхности заготовки с оправкой в точке *13* (–179,0; –116,4 и –102,4 МПа) (рис. 4, *в*). Также в этой точке возникает максимальное касательное напряжение (44,6 МПа).

Представленные результаты свидетельствуют о том, что при циклической деформации бойками затвердевшей стенки оболочки из стали в ней возникают высокие (до –179,0 МПа) сжимающие напряжения по трем осям координат. Стенка оболочки при ее обжатии калиброванными бойками находится практически в условиях всестороннего сжатия, что особенно важно при обработке непрерывнолитого металла для получения стальных полых заготовок высокого качества [17 – 20].

Выводы

Изложена новая технология получения стальных полых заготовок на ресурсосберегающей и компактной установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации. Определены закономерности распределения перемещений металла и осевых напряжений

в очагах циклической деформации при получении на установке стальных полых заготовок. Установлено, что металл при деформации стенки полой заготовки находится в условиях всестороннего сжатия, что способствует получению стальных трубных заготовок высокого качества.

Список литературы / References

1. Лехов О.С., Михалев А.В. *Установка непрерывного литья и деформации для производства стальных листов и сортовых заготовок*. Москва: Вологда: Инфра-Инженерия; 2021:304.
2. 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. Investigation of the combined process of continuous casting and cyclic deformation for the production of steel sheets. *Stal'*. 2016;(1):59–62. (In Russ.).
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. 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
5. 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
6. 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.
7. *ANSYS. Structural Analysis Guide*. Rel. 15.0.
8. 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.).
9. 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
10. Karrech A., Seibi A. Analytical model of the expansion in of tubes under tension. *Journal of Materials Processing Technology*. 2010;210:336–362.
11. 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
12. Kobayashi S., Oh S.-I., Altan T. *Metal Forming and Finite-Element Method*. New York: Oxford University Press; 1989:377.
13. Jansson N. Optimized sparse matrix assembly in finite element solvers with one-sided communication. *High Performance Computing for Computational Science – VECPAR 2012*. Springer: Berlin, Heidelberg; 2013:128–139.
14. 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 Technological Conference, Pittsburgh, Pa, 28–31 March 1982*. New York: 1982:264–270.
15. 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.
16. Ефименко Л.А., Прыгаев А.К. *Определение фактических механических свойств металла трубопроводов на основе измерения твердости*. Москва: изд. РТУ нефти и газа; 2007:18.
17. Кудря А.В. Критические факторы металлургического качества сталей повышенной прочности. В кн.: *Перспективные материалы. Т. V*. Тольятти: изд. ТГУ; 2013: 332–362.
18. Казаков А.А., Киселев Д.В. Современные методы оценки качества структуры материалов на основе панорамных исследований на основе анализатора изображений ТХІХОМЕТ. В кн.: *Перспективные материалы. Т. V*. Тольятти: изд. ТГУ; 2013:270–329.
19. 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
20. Эфрон Л.И. *Металловедение в «большой» металлургии. Трубные стали*. Москва: Металлургиздат; 2012:696.

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., генеральный 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.), General Director,* JSC "Ural Pipe Plant"
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

Sergei O. Nepryakhin, *Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair "Metal Forming",* Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin
E-mail: s.o.nepriakhin@urfu.ru

Вклад авторов

О. С. Лехов – введение, постановка задачи, анализ результатов расчета.
А. В. Михалев – введение, постановка задачи, анализ результатов исследований.
С. О. Непряхин – анализ результатов расчета.

Contribution of the Authors

O. S. Lechov – preparation of introduction, setting the task, analysis of the calculation results.
A. V. Mikhalev – introduction, setting the task, analysis of the research results.
S. O. Nepryakhin – analysis of the calculation results.

Поступила в редакцию 24.04.2022
После доработки 03.03.2023
Принята к публикации 10.03.2023

Received 24.04.2022
Revised 03.03.2023
Accepted 10.03.2023