

ФИЗИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ЗАДНИХ КОНЦЕВЫХ УЧАСТКОВ ТРУБ

Д.А. Ахмеров^{1,3}, ahmerovda@rosniti.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8498-8954>

А.В. Выдрин¹, vydrinav@rosniti.ru

Т.О. Новиков², NovikovTO@tagmet.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6682-1069>

Э.Ш. Исрафилова¹, Israfilova@rosniti.ru

Е.А. Гейм^{1,3}, geym@rosniti.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0856-0056>

¹ АО «Русский научно-исследовательский институт трубной промышленности» (АО «РусНИТИ»), Челябинск, Россия

² АО «Таганрогский металлургический завод» (АО «ТАГМЕТ»), Таганрог, Россия

³ Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Для расширения сортамента производимых труб и повышения производительности на современных трубопрокатных агрегатах применяют редуциционно-растяжные станы. Однако характерной особенностью при редуцировании труб с натяжением является образование утолщенных концов. Это явление связано с тем, что передний и задний концы подвергаются формоизменению в условиях, отличных от деформации средней части трубы. Характер изменения толщины стенки на концах труб определяет длину и массу концевой обрезки, что в значительной мере определяет экономические показатели всего трубопрокатного агрегата в целом. В данной работе с помощью физического и компьютерного моделирования процесса редуцирования труб в одной клетке исследовано влияние параметров прокатки на длину утолщенных концов. Для всестороннего исследования процесса редуцирования необходимо учесть большинство факторов, таких как овальность калибра, уровень натяжения, степень деформации, степень тонкостенности и др. Часть из этих факторов, например влияние межклетьевого заднего натяжения по раскату, лучше реализовывать при физическом моделировании, а часть факторов (например температура заготовки) лучше исследовать при компьютерном моделировании. Данные исследования помогут в разработке технических решений с целью уменьшения длины утолщенных концевых участков труб. Для создания заднего натяжения в экспериментальном исследовании, моделирующим процесс работы редуциционно-растяжного стана (создание натяжения), был создан рабочий инструмент (волочильное кольцо). Для улучшения механических характеристик волочильное кольцо подвергалось термической обработке, заключающейся в нагреве под закалку в аустенитную область выше точки Ас3 при температуре 880 °С в течение 20 мин.

Ключевые слова: производство труб, бесшовные трубы, редуцирование, разностенность, концевые участки труб, физическое моделирование, компьютерное моделирование, скоростные режимы, редуцирование труб, Qform

Для цитирования: Физическое и компьютерное моделирование формоизменения задних концевых участков труб / Д.А. Ахмеров, А.В. Выдрин, Т.О. Новиков и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2022. Т. 22, № 4. С. 72–80. DOI: 10.14529/met220408

PHYSICAL AND COMPUTER MODELING OF THE SHAPE OF THE REAR END SECTIONS OF PIPES

D.A. Akhmerov^{1,3}, ahmerovda@rosniti.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8498-8954>

A.V. Vydrin¹, vydrinav@rosniti.ru

T.O. Novikov², NovikovTO@tagmet.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6682-1069>

E.Sh. Israfilova¹, Israfilova@rosniti.ru

E.A. Geym^{1,3}, geym@rosniti.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0856-0056>

¹ The Russian Research Institute of the Tube & Pipe Industries, Joint Stock Company (RusNITI JSC), Chelyabinsk, Russia

² Taganrog Metallurgical Plant JSC (TAGMET JSC), Taganrog, Russia

³ South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. Reduction-stretching mills are used to expand the range of pipes produced and increase productivity on modern pipe rolling units. However, a characteristic feature when reducing pipes with tension is the formation of thickened ends. This phenomenon is due to the fact that the front and rear ends undergo shape change under conditions other than deformation of the middle part of the pipe. The nature of the change in the wall thickness at the ends of the pipes determines the length and weight of the end trim, which largely determines the economic performance of the entire pipe rolling unit as a whole. In this paper, the influence of rolling parameters on the length of the thickened ends is studied using physical and computer modeling of the process of reducing pipes in one cage. For a comprehensive study of the reduction process, it is necessary to take into account most factors, such as the ovality of the gauge, the level of tension, the degree of deformation, the degree of thinness, etc., other than the deformation of the middle part of the pipe. Some of these factors, for example, the influence of the intercellular back tension on the roll is better realized in physical modeling, and some factors (for example, the temperature of the workpiece) are better investigated in computer modeling. These studies will help in the development of technical solutions to reduce the length of thickened end sections of pipes. A working tool (drawing ring) was created to create a back tension in an experimental study that simulates the process of operation of a reduction-stretching mill (creating tension). To improve the mechanical characteristics, the drawing ring was subjected to heat treatment, consisting in heating for quenching in the austenitic region above the Ac3 point at a temperature of 880 °C for 20 min.

Keywords: pipe production, seamless pipes, reduction, wall thickness, end sections of pipes, physical modeling, computer modeling, speed modes, pipe reduction, Qform

For citation: Akhmerov D.A., Vydrin A.V., Novikov T.O., Israfilova E.Sh., Geym E.A. Physical and computer modeling of the shape of the rear end sections of pipes. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*. 2022;22(4):72–80. (In Russ.) DOI: 10.14529/met220408

Введение

В трубном производстве затраты на металл составляют подавляющую часть издержек. В среднем при производстве заготовок для бесшовных горячекатаных труб порядка 60 % себестоимости формируется за счет затрат на сырье и материалы, используемые для производства заготовок из черных металлов. В себестоимости производства стальных труб основная доля затрат приходится на металл – от 75 до 80 % [1]. Непрерывное совершенствование технологии трубопрокатного производства должно быть направлено в первую очередь на сокращение потерь металла.

При изготовлении труб по любой технологической схеме часть операций производственного процесса сопровождается отходами и потерями металла. Важным является снижение потерь металла при технологических процессах любыми действенными методами.

На современных трубопрокатных агрегатах (ТПА) с целью повышения производительности процесса используют редуционно-растяжные станы. Однако высокие продольные напряжения при редуцировании с растяжением сопровождаются наряду с преимуществами в технологии также отрицательным эффектом появления «утолщенных концов» [2, 3]. Так называются участки с увеличенной



Рис. 1. Обрезь концов труб
Fig. 1. Trimming of pipe ends

толщиной стенки, появляющиеся на концах труб в результате ослабленного натяжения, по сравнению с центральной частью трубы, прокатанной в установившемся режиме [4–8]. Такие концевые участки готовой трубы должны быть отрезаны (рис. 1), если толщина стенки превышает значения допусков для труб соответствующего размера.

Данные потери материалов в установках по производству бесшовных труб могут составить до нескольких процентов годового объема производства, если не будут приняты подходящие меры по оптимизации.

Данной проблеме в свое время посвящено множество исследований, опубликованных в работах [9–11]. Однако данные работы имеют устаревшие данные, так как в трубопрокатном производстве произошли значительные изменения, связанные с появлением трубопрокатных агрегатов новой конструкции. Поэтому объектом исследования является n -клетевой редуционно-растяжной стан с 3-валковыми клетями.

В данной статье выполнен комплекс исследований с помощью физического и компьютерного моделирования с целью анализа

влияния факторов образования утолщенных концевых участков.

Физическое моделирование

Цель физического моделирования – оценить исследуемые параметры на длину утолщенных концов труб.

При исследовании процесса редуцирования довольно сложно учесть влияние каждого из этих факторов (натяжение, тонкостенность трубы, степень деформации, температура) и обеспечить постоянство условий эксперимента. Поэтому для выявления многофакторной зависимости параметров редуционной прокатки необходимо выбрать такие планы эксперимента, которые позволяют на основе четких формализованных правил свести ошибку эксперимента к минимуму и оценить влияние управляющих параметров.

Методология проведения эксперимента при постановке задачи требует проведения $2^{4-1} = 8$ опытов с 5-кратным повторением.

Поскольку в полнофакторном эксперименте реализуются все возможные сочетания уровней, то матрица планирования эксперимента примет вид, представленный в таблице.

Матрица планирования
Planning matrix

№	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4
1	+	–	–	–	–
2	+	+	–	–	+
3	+	–	+	–	+
4	+	+	+	–	–
5	+	–	–	+	+
6	+	+	–	+	–
7	+	–	+	+	–
8	+	+	+	+	+

Целевые значения при поиске решений задавались в соответствии с планом эксперимента для значений:

– обжатие трубы по диаметру

$$\varepsilon_{\varnothing} = (3,4\%; 8,2\%);$$

– исходная тонкостенность трубы

$$\left(\frac{S_{i-1}}{d_{i-1}}\right) = (5,6; 17);$$

– температура трубы

$$T = (800\text{ }^{\circ}\text{C}; 1000\text{ }^{\circ}\text{C}).$$

Выходным параметром данного исследования является изменение толщины стенки на заднем концевом участке.

Экспериментальная установка (рис. 2) для исследования процессов продольной прокатки труб предназначена для изучения формоизменения, силовых и кинематических параметров процессов продольной прокатки труб путем моделирования процессов де-

формации металла по различным технологическим схемам с учетом масштабного фактора.

В качестве исходной полой заготовки для прокатки используются патрубки размерами $\varnothing 34 \times 2$ мм; $\varnothing 34 \times 6$ мм. Для создания натяжения на передней части заготовки производили уменьшение диаметра (рис. 3).

Для создания заднего натяжения, моделирующего процесс работы редуционно-растяжного стана, был создан рабочий инструмент (оснастка) по аналогии с работой [12]. Оснастка в виде проводки и деформирующего кольца показана на рис. 4.

Для улучшения механических характеристик волоочильное кольцо подвергалось термической обработке, заключающейся в нагреве под закалку в аустенитную область выше точки A_{c3} при температуре $880\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 20 мин. Закалку кольца проводили в закалочном баке с водой [13].



Рис. 2. Лабораторная установка для продольной прокатки труб
Fig. 2. Laboratory installation for longitudinal rolling of pipes

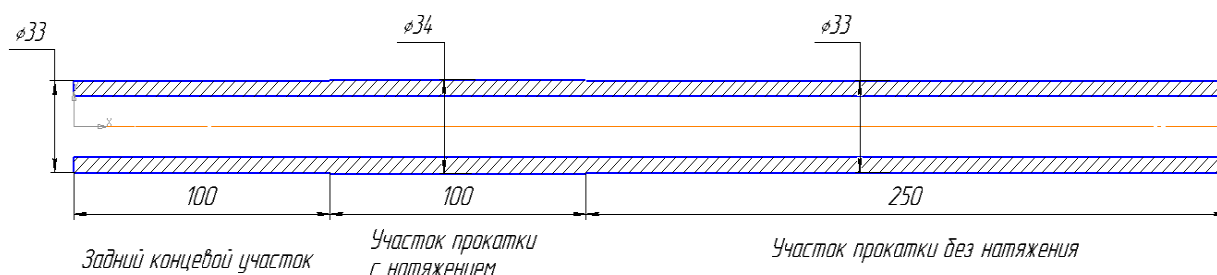


Рис. 3. Схема заготовки для проведения эксперимента
Fig. 3. Diagram of the workpiece for the experiment



Рис. 4. Оснастка для физического моделирования: а – в разобранном виде;
 б – установленная в 3-валковой клетки
 Fig. 4. Equipment for physical modeling: a – disassembled; b – installed in a 3-roll cage

Полученные результаты и их обсуждение

Толщина стенок прокатанных заготовок измерялись согласно схеме, приведенной на рис. 5.

По результатам замеров геометрических размеров заготовок в поперечных сечениях строились графики изменения толщины стенки. Важным отрезком является участок на расстоянии 90–100 мм от ЗК (задний концевой участок трубы), так как там происходит переход участка с натяжением на концевой участок трубы. На данном участке произведены замеры до и после деформации трубы и вычислено среднее значение изменения толщины стенки.

При деформации 3 % получены практически одинаковые результаты по среднему утолщению участка трубы после натяжения, и толщина стенки на данном участке практически не изменялась. Это объясняется тем, что частные деформации 3–4 % используют, как

правило, только при редуцировании без натяжения [14].

На рис. 6, 7 представлены данные при прокатке заготовок со степенью деформации 3 и 8 %.

Если сравнить значение толщины стенки труб, прокатанных с натяжением при деформации 8 и 3 %, то видно, что при деформации 8 % продольные усилия больше, чем при деформации 3 %, вследствие чего утолщение стенки трубы после участка прокатки с натяжением происходит значительно больше.

Зависимость утолщенных концов недостаточно рассматривать лишь связью только с натяжением, так как эта связь определяется также и величиной деформации. Это подтверждает тот факт, что с увеличением натяжения длина за счет увеличения степени деформации утолщенных концевых участков возрастает [14].

В данной работе также исследовали влияние контактного трения за счет изменения

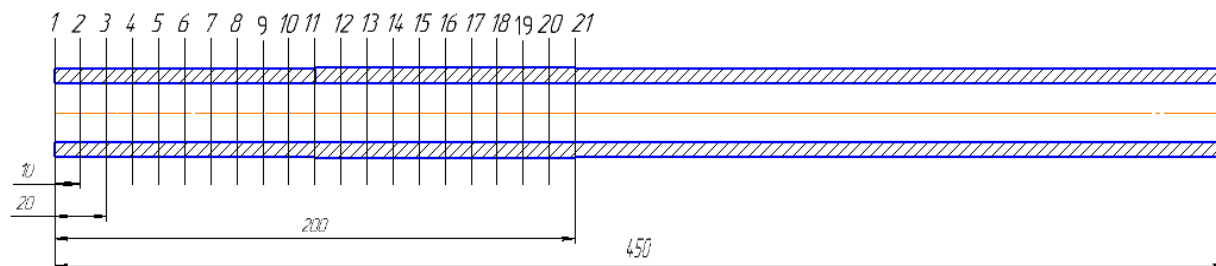


Рис. 5. Схема замеров прокатанных заготовок
 Fig. 5. Measurement scheme of rolled workpieces

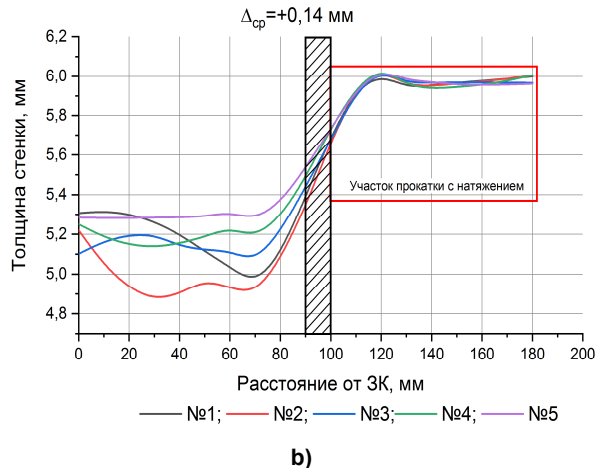
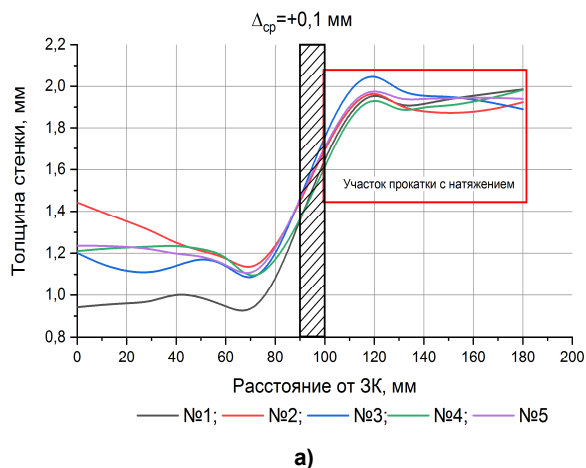


Рис. 6. Толщина стенки деформированных заготовок (среднее значение) без натяжения с деформацией 3 %: а – толщина стенки трубы 2 мм; б – толщина стенки трубы 6 мм
Fig. 6. Wall thickness of deformed workpieces (average value) without tension with a deformation of 3 %: a – pipe wall thickness of 2 mm; b – pipe wall thickness of 6 mm

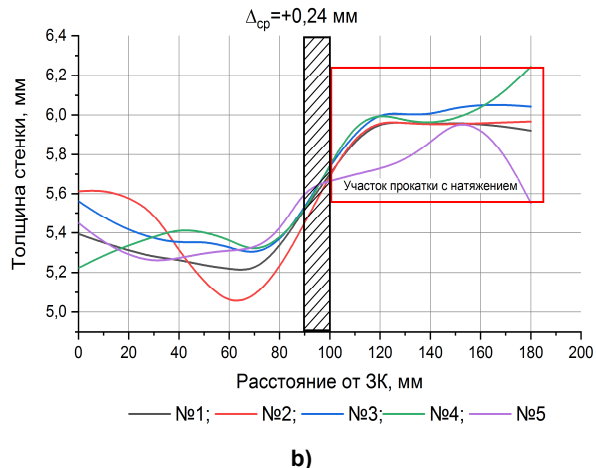
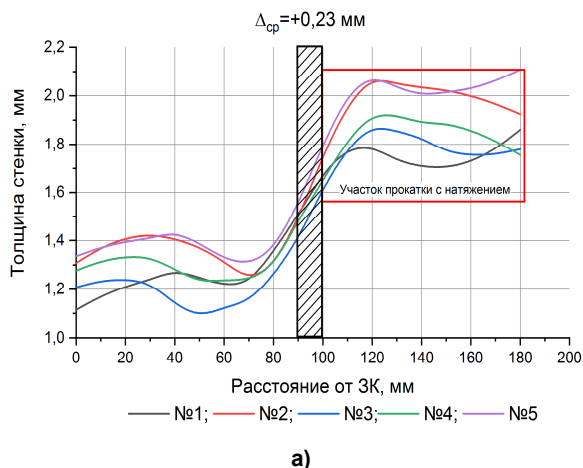


Рис. 7. Толщина стенки деформированных заготовок (среднее значение) без натяжения с деформацией 8 %: а – толщина стенки трубы 2 мм; б – толщина стенки трубы 6 мм
Fig. 7. Wall thickness of deformed workpieces (average value) without tension with deformation of 8 %: a – pipe wall thickness of 2 mm; b – pipe wall thickness of 6 mm

начальной температуры заготовок. Однако данный параметр сложно поддается контролю и измерению и зависит от многих факторов. Поэтому влияние данного фактора лучше всего проверить с помощью МКЭ (метод конечных элементов).

Компьютерное моделирование

Для исследования используем модель с исходной заготовкой 178×6 мм. Варьирование начальной температуры заготовки 800–1000 °С (через каждые 50 °С).

Для более точных результатов сетку конечных элементов в области деформации необходимо уменьшить [15]. Поскольку в рабо-

те исследуются концевые участки, принято для анализа взять данные средних значений на расстоянии 100 мм от заднего торца. На рис. 8 показано влияние температуры на концевые участки труб. Варьирование начальной температуры заготовки 800–1000 °С (через каждые 50 °С).

Из рис. 8 видно, что при прокатке труб 178×6 мм увеличение температуры от 800 до 950 °С приводит в целом к уменьшению толщины стенки трубы на заднем конце. Выше температуры 950 °С происходит смена тренда, соответственно оптимальный температурный режим необходимо искать в интервале температур 950–1000 °С.

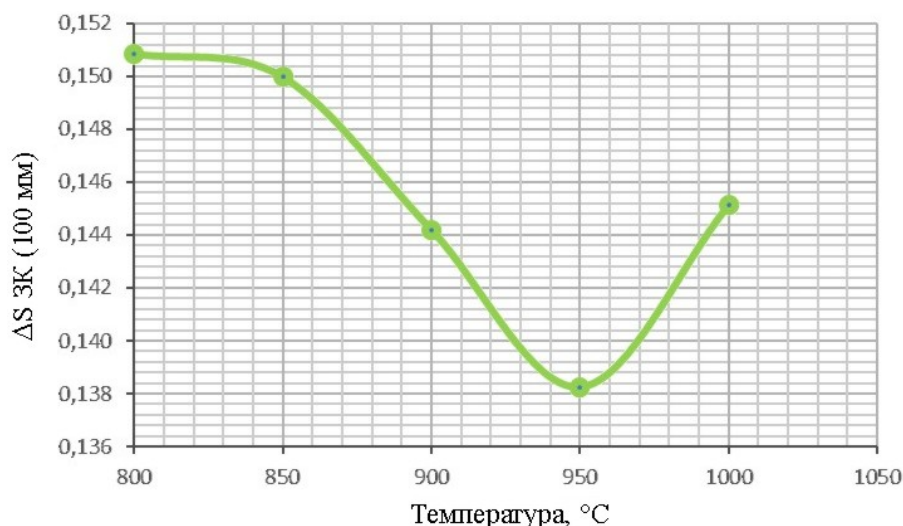


Рис. 8. Влияние температуры на концевые участки труб
Fig. 8. The effect of temperature on the end sections of pipes

Заключение

По результатам физического моделирования определили, что наиболее значимым параметром процесса редуцирования труб является межклетевое натяжение, так как оно непосредственно влияет на геометрию проката (толщину стенки) и образование утолщенных концов труб. Утолщение стенки при прокатке увеличивается как с ростом тонкостенности, так и с увеличением деформации. Причем при

малых деформациях (3 %) степень тонкостенности практически не влияет. Но с увеличением деформации чем больше степень тонкостенности, тем больше изменение толщины стенки (увеличение происходит на 4–10 %).

С целью полноценного исследования процесса редуцирования и оценки всех входных параметров, влияющих на концевые участки труб, необходимо провести исследование на базе конечно-элементной модели.

Список литературы

1. Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»: сайт. URL: <https://dcenter.hse.ru/otrasli> (дата обращения: 10.11.2022).
2. Ахмеров Д.А., Выдрин А.В. Исследование процесса образования концевых участков труб при продольной прокатке в калибрах, образованных разным числом валков // Черные металлы. 2021. № 1. С. 44–49. DOI: 10.17580/chm.2021.01.06
3. Чумакова Л.А. Динамика редуцированных станов: Электронный образовательный текстовый ресурс. Екатеринбург, 2019. 68 с.
4. Выдрин А.В., Ахмеров Д.А., Храмов Е.В. Имитационная математическая модель процесса редуцирования // Черные металлы. 2021. № 10. С. 56–60.
5. Влияние скоростных параметров редуцирования на точность получаемого трубного профиля / Ю.Л. Бобарикин, Я.И. Радькин, Ю.В. Мартынов, А.В. Стрельченко // Черные металлы. 2021. № 10. С. 35–39.
6. Bayoumi L.S. Analysis of flow and stresses in a tube stretch-reducing hot rolling schedule // International journal of mechanical sciences. 2003. Vol. 45, no. 3. P. 553–565.
7. Hui Yu, Jun Hong Li, Hua Guo. CEC Control Model for Wall Thickness Thickening of Tube Ends and Simulation // Advanced Materials Research. 2011. Vols. 317–319. P. 2509–2514. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.317-319.2509
8. Rešković S., Križanić R., Vodopivec F. Numerical design of a hot-stretch-reducing process for welded tubes // Materials and Technologies. 2010. Vol. 44, no. 5. P. 243–250.
9. Технология непрерывной безоправочной прокатки труб / Г.И. Гуляев, П.Н. Ившин, И.Н. Ерохин и др. М.: Металлургия, 1975. 264 с.
10. Храмов Е.В. Повышение эффективности изготовления горячедеформированных труб на основе физического и математического моделирования процесса редуцирования: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Челябинск: ЮУрГУ, 2017.

11. Редукционные станы / В.П. Анисифоров, Л.С. Зельдович, В.Д. Курганов и др. М.: Металлургия, 1971. 256 с.
12. Физическое моделирование геометрических и силовых параметров процесса непрерывной продольной прокатки труб без оправки / М.В. Буняшин, А.В. Выдрин, Б.В. Баричко и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2019. Т. 19, № 4. С. 49–55. DOI: 10.14529/met190406
13. Марочник сталей и сплавов / Драгунов Ю. Г. [и др.]. М.: Машиностроение, 2014. 1201 с.
14. Теория редуцирования труб / В.В. Ериклинцев, Ю.И. Блинов, Д.С. Фридман, Л.М. Грабарник. Свердловск: Средне-Уральское книжное издательство, 1970. 230 с.
15. Власов А.В., Стебунов С.А., Евсюков С.А. Конечно-элементное моделирование технологических процессовковки и объемной штамповки. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. 383 с.

References

1. National Research University “Higher School of Economics”: website. Available at: <https://dcenter.hse.ru/otrasli> (accessed 10.11.2022).
2. Akhmerov D.A., Vydrin A.V. Study of the process of formation of tubes end sections during longitudinal rolling in grooves formed by a different number of rolls. *Stahl und Eisen*. 2021;(1):44–49. (In Russ.) DOI: 10.17580/chm.2021.01.06
3. Chumakova L.A. *Dinamika reduktsionnykh stanov: Elektronnyy obrazovatel'nyy tekstovyy resurs* [Dynamics of reduction mills: An electronic educational text resource]. Ekaterinburg; 2019. 68 p. (In Russ.)
4. Vydrin A.V., Akhmerov D.A., Khramkov E.V. Simulation mathematical model of the reduction process. *Stahl und Eisen*. 2021;(10):56–60. (In Russ.)
5. Bobarikin Yu.L., Radkin Ya.I., Martyanov Yu.V., Strelchenko A.V. The influence of speed reduction parameters on the accuracy of the obtained pipe profile. *Stahl und Eisen*. 2021;(10):35–39. (In Russ.)
6. Bayoumi L.S. Analysis of flow and stresses in a tube stretch-reducing hot rolling schedule. *International journal of mechanical sciences*. 2003;45(3):553–565.
7. Hui Yu, Jun Hong Li, Hua Guo. CEC Control Model for Wall Thickness Thickening of Tube Ends and Simulation. *Advanced Materials Research*. 2011;317–319:2509–2514. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.317-319.2509
8. Rešković S., Križanić R., Vodopivec F. Numerical design of a hot-stretch-reducing process for welded tubes. *Materials and Technologies*. 2010;44(5):243–250.
9. Gulyayev G.I., Ivshin P.N., Erokhin I.N., Zimin A.K., Rukobratskiy V.P. *Tekhnologiya nepreryvnoy bezopravochnoy prokatki trub* [Technology of continuous bezopravochny rolling of pipes]. Moscow: Metallurgiya; 1975. 264 p. (In Russ.)
10. Khramkov E.V. *Povysheniye effektivnosti izgotovleniya goryachedeformirovannykh trub na osnove fizicheskogo i matematicheskogo modelirovaniya protsessa redutsirovaniya: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Improving the efficiency of manufacturing hot-deformed pipes based on physical and mathematical modeling of the reduction process. Abstract of cand. diss.]. Chelyabinsk: South Ural St. Univ.; 2017. (In Russ.)
11. Anisiforov V.P., Zeldovich L.S., Kurganov V.D., Shpigelman R.M., Ivobotenko V.A. *Reduktsionnyye stany* [Reduction mills]. Moscow: Metallurgiya; 1971. 256 p. (In Russ.)
12. Bunyashin M.V., Vydrin A.V., Barichko B.V., Kochkin A.S., Khramkov E.V. Physical Modeling of Geometric and Force Parameters of the Continuous Longitudinal Rolling of Tubes without a Mandrel. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*. 2019;19(4):49–55. (In Russ.) DOI: 10.14529/met190406
13. Dragunov Yu.G. et al. *Marochnik staley i splavov* [Grader of steels and alloys]. Moscow: Mashinostroyeniye; 2014. 1201 p. (In Russ.)
14. Eriklintsev V.V., Blinov Yu.I., Fridman D.S., Grabarnik L.M. *Teoriya redutsirovaniya trub* [Theory of pipe reduction]. Sverdlovsk: Sredne-Uralsky Book Publishing House; 1970. 230 p. (In Russ.)
15. Vlasov A.V., Stebunov S.A., Evsyukov S.A. *Konechno-elementnoye modelirovaniye tekhnologicheskikh protsessov kovki i ob'yemnoy shtampovki* [Finite element modeling of technological processes of forging and forging]. Moscow: Bauman MSTU; 2019. 383 p. (In Russ.)

Информация об авторах

Ахмеров Денис Альфредович, младший научный сотрудник лаборатории моделирования технологических процессов, АО «Русский научно-исследовательский институт трубной промышленности» (АО «РусНИТИ»), Челябинск, Россия; аспирант кафедры процессов и машин обработки металлов давлением, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; ahmerovda@rosniti.ru.

Выдрин Александр Владимирович, д-р техн. наук, проф., главный научный сотрудник, АО «Русский научно-исследовательский институт трубной промышленности» (АО «РусНИТИ»), Челябинск, Россия; vydrinav@rosniti.ru.

Новиков Тимур Олегович, инженер трубной лаборатории инженерно-технического центра, АО «Таганрогский металлургический завод» (АО «ТАГМЕТ»), Таганрог, Россия; NovikovTO@tagmet.ru.

Исрафилова Эльза Шамилевна, инженер лаборатории материаловедения, АО «Русский научно-исследовательский институт трубной промышленности» (АО «РусНИТИ»), Челябинск, Россия; Israfilova@rosniti.ru.

Гейм Евгений Александрович, инженер лаборатории продольной прокатки труб, АО «Русский научно-исследовательский институт трубной промышленности» (АО «РусНИТИ»), Челябинск, Россия; аспирант кафедры процессов и машин обработки металлов давлением, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; geym@rosniti.ru.

Information about the authors

Denis A. Akhmerov, Junior Researcher of the Laboratory for Modeling Technological Processes, The Russian Research Institute of the Tube & Pipe Industries, Joint Stock Company (RusNITI JSC), Chelyabinsk, Russia; Postgraduate Student of the Department of Processes and Machines for Metal Forming, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; ahmerovda@rosniti.ru.

Alexander V. Vydrin, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Chief Researcher, The Russian Research Institute of the Tube & Pipe Industries, Joint Stock Company (RusNITI JSC), Chelyabinsk, Russia; vydrinav@rosniti.ru.

Timur O. Novikov, Engineer of the Pipe Laboratory of the Engineering and Technical Center, Taganrog Metallurgical Plant JSC (TAGMET JSC), Taganrog, Russia; NovikovTO@tagmet.ru.

Elza Sh. Israfilova, Engineer of the Laboratory of Materials Science, The Russian Research Institute of the Tube & Pipe Industries, Joint Stock Company (RusNITI JSC), Chelyabinsk, Russia; Israfilova@rosniti.ru.

Evgeniy A. Geym, Engineer of the Laboratory of Longitudinal Pipe Rolling, The Russian Research Institute of the Tube & Pipe Industries, Joint Stock Company (RusNITI JSC), Chelyabinsk, Russia; Postgraduate Student of the Department of Processes and Machines for Metal Forming, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; geym@rosniti.ru.

Статья поступила в редакцию 11.08.2022

The article was submitted 11.08.2022