

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ БЕСШОВНЫХ ТРУБ: АНАЛИЗ КИНЕМАТИКО-СИЛОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НА ИЗВЛЕКАТЕЛЬНО-КАЛИБРОВОЧНОМ СТАНЕ

Д.А. Ахмеров¹, akhmerovda@tmk-group.com
А.В. Выдрин^{1,2}, vydrinav@susu.ru
И.К. Фарукшин^{1,2}, ilya.farukshin@tmk-group.com
А.Г. Ульянов^{2,3}, a.ulyanov@tmk-group.com
С.Ю. Мотяков³, sergey.motyakov@tmk-group.com
М.В. Бунышин⁴, mikhail.bunyashin@tmk-group.com

¹ ООО «Исследовательский центр ТМК», Челябинск, Россия

² Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

³ АО «Волжский трубный завод», Волжский, Россия

⁴ ПАО «ТМК», Москва, Россия

Аннотация. При производстве бесшовных труб в настоящее время наиболее распространенными являются ТПА с непрерывными станами. Одной из особенностей непрерывных раскатных станов с удерживаемой оправкой является наличие извлекательно-калибровочного стана (ИКС). При производстве труб на непрерывном раскатном стане формирование конечных размеров трубы производится на ИКС, обеспечивающем помимо конечной стадии деформации трубы еще и снятие трубы с оправки непрерывного раскатного стана. При осуществлении этой операции возникает натяжение между станами, которое влияет на точность производимых труб. Особенно это заметно при формировании заднего конца плети, так как после выхода плети из последней клетки непрерывного стана она какое-то время контактирует с оправкой, а извлекательно-калибровочный стан создает растягивающие напряжения, из-за чего образуется участок локального утонения трубы. Отбраковка труб по данному дефекту может достигать 8 % от общего объема производств. Поэтому поиск новых технических решений по уменьшению длины локального утонения плети является актуальной задачей на сегодняшний день.

Ключевые слова: производство труб, бесшовные трубы, трубопрокатный агрегат, непрерывный стан, безопрочная прокатка, извлекательно-калибровочный стан, QForm 3D, компьютерное моделирование

Для цитирования: Исследование процесса формирования геометрических параметров бесшовных труб: анализ кинематико-силового взаимодействия на извлекательно-калибровочном стане / Д.А. Ахмеров, А.В. Выдрин, И.К. Фарукшин и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2025. Т. 25, № 1. С. 37–43. DOI: 10.14529/met250104

INVESTIGATION OF THE PROCESS OF FORMING GEOMETRIC PARAMETERS OF SEAMLESS PIPES: ANALYSIS OF THE KINEMATIC-FORCE INTERACTION ON THE EXTRACTION-CALIBRATION MILL

D.A. Akhmerov¹, akhmerovda@tmk-group.com

A.V. Vydrin^{1, 2}, vydrinav@susu.ru

I.K. Farukshin^{1, 2}, ilya.farukshin@tmk-group.com

A.G. Ulyanov^{2, 3}, a.ulyanov@tmk-group.com

S.Yu. Motyakov³, sergey.motyakov@tmk-group.com

M.V. Bunyashin⁴, mikhail.bunyashin@tmk-group.com

¹ TMK Research, LLC, Chelyabinsk, Russia

² South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

³ JSC "Volzhsky Pipe Plant", Volzhsky, Russia

⁴ PJSC TMK, Moscow, Russia

Abstract. In the production of seamless pipes, continuous-mill TPAs are currently the most common. One of the features of continuous rolling mills with a retained mandrel is the presence of an extraction and calibration mill (ICS). In the production of pipes on a continuous rolling mill, the final dimensions of the pipe are formed on the ICS, which ensures, in addition to the final stage of pipe deformation, that the pipe is also removed from the mandrel of the continuous rolling mill. During this operation, tension occurs between the mills, which affects the accuracy of the pipes produced. This is especially noticeable when forming the rear end of the whip, since after the whip leaves the last cage of the continuous mill, it comes into contact with the mandrel for some time, and the extraction and calibration mill creates tensile stresses, which leads to a section of local thinning of the pipe. The rejection of pipes for this defect can reach 8 % of the total production volume. Therefore, the search for new technical solutions.

Keywords: pipe production, seamless pipes, pipe rolling unit, continuous mill, mandrelless rolling, extraction and sizing mill, QForm 3D, computer modeling

For citation: Akhmerov D.A., Vydrin A.V., Farukshin I.K., Ulyanov A.G., Motyakov S.Yu., Bunyashin M.V. Investigation of the process of forming geometric parameters of seamless pipes: analysis of the kinematic-force interaction on the extraction-calibration mill. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*. 2025;25(1):37–43. (In Russ.) DOI: 10.14529/met250104

Введение

Особенностью современных трубопрокатных агрегатов (ТПА) с непрерывным раскатным станом (РС) является наличие удерживаемой оправки [1–5], при производстве бесшовных труб важно минимизировать дефекты стенки, так как они снижают качество продукции и увеличивают отходы. Одной из ключевых проблем является локальное утонение трубы на заднем конце плети, возникающее из-за взаимодействия непрерывного раскатного стана и извлекательно-калибровочного стана (ИКС).

В работе предлагается метод уменьшения длины утоненной зоны за счет изменения конструкции оправки и регулирования скорости прокатки.

Цель работы – исследование влияния длины проточки оправки и скорости прокатки

на геометрию трубы с использованием компьютерного моделирования.

Теоретически и практически было установлено, что взаимодействие оправки трубной плети и извлекательно-калибровочного стана оказывает влияние на формирование геометрических размеров плети, в частности толщины стенки.

В связи с этим в работе основное внимание уделяется уменьшению длины участка локального утонения и обеспечению равномерности толщины стенки.

При операции стягивания трубной плети с оправки возникают продольные усилия в промежутке между раскатным станом и станом извлекателем. Усилие, которое необходимо преодолеть при стягивании трубы с оправки, можно описать следующей зависимостью [6]:

$$F = 2\pi kLD_{оп}, \quad (1)$$

где k – коэффициент, учитывающий степень охвата оправки трубой (если труба полностью отходит от оправки $k = 0$; если труба полностью охватывает оправку $k = 1$); L – длина трубы, контактирующая с оправкой, мм; $D_{оп}$ – диаметр оправки, мм.

Как видно из формулы (1), для снижения усилия стягивания целесообразно уменьшать длину контактной поверхности. Это, в свою очередь, приводит к сокращению длины плети с утоненным концом. Одним из технических решений для уменьшения контактной поверхности между трубой и оправкой является снижение диаметра переднего конца оправки. Данное решение было исследовано посредством компьютерного моделирования в программной среде QForm 3D. Моделирование проводилось с варьированием таких параметров, как длина проточки оправки и час-

тота вращения валков ИКС первой клетки, что позволило оценить влияние данных параметров на величину стягивающего усилия.

Компьютерное моделирование

Параметры созданных трехмерных моделей заготовок представлены в таблице.

Выходными параметрами компьютерного моделирования является толщина стенки трубы.

По результатам моделирования толщина стенки определялась в различных сечениях и точках вдоль продольного направления с использованием специально разработанной программы [7]. Для обеспечения высокой точности измерений в продольном направлении проводилось определение данных в 400 сечениях с шагом 15 мм, а в поперечном – с шагом 10° .

На рис. 1 представлены результаты измерения толщины стенки полученной трубы при

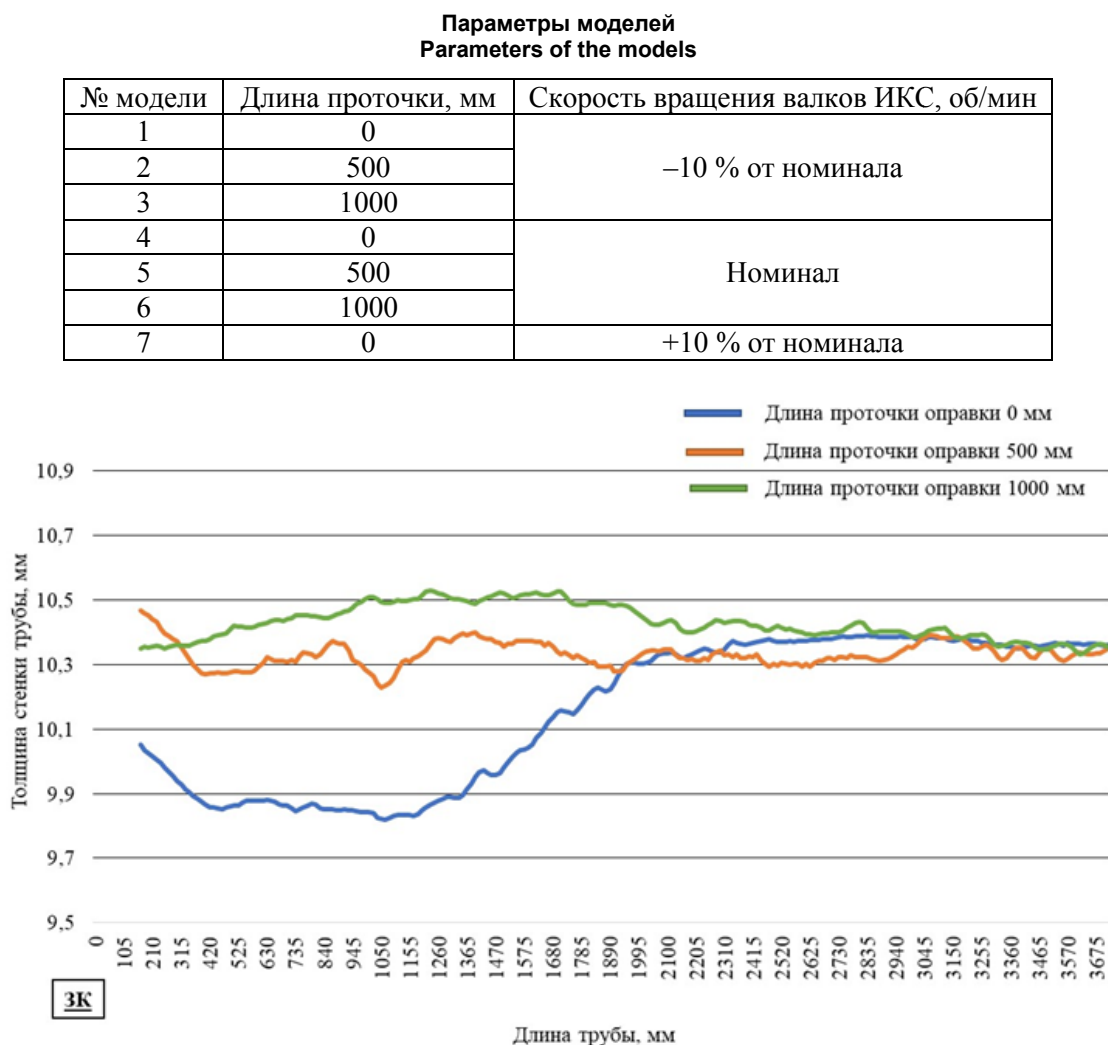


Рис. 1. Толщина стенки труб после моделирования при варьировании длины проточки оправки
Fig. 1. Pipe wall thickness after modeling when varying the mandrel bore length

извлечении с оправки с проточкой длиной 1000, 500 и 0 мм.

Из представленного рисунка видно, что при извлечении трубы с оправки без проточки наблюдается локальное утонение толщины стенки, что подтверждается данными, полученными в работе [8].

Кроме того, при исследовании процессов производства труб на непрерывном раскатном стане с удерживаемой оправкой, помимо изменения геометрических параметров, особый интерес представляет уровень усилия удержания оправки. На рис. 2 приведены графики, демонстрирующие изменение усилий удержания оправки, что позволяет оценить влияние параметров проточки ИКС на данный показатель.

В результате применения проточки переднего конца оправки наблюдается сокращение площади контактной поверхности, что приводит к уменьшению усилия, необходимого для стягивания трубы с оправки (рис. 3).

Из рис. 3 следует, что с учетом наличия проточки переднего конца оправки зависимость стягивающего усилия принимает вид

$$F = 2\pi tk(L_1 - L_2)D_{оп0}. \quad (2)$$

В соответствии с проведенными исследованиями были изготовлены соответствующие оправки.

Дополнительный анализ выявил, что разница в условиях деформации трубы при стягивании и установившемся процессе зависит от соотношения скоростных режимов работы ИКС и РС. В связи с этим в промышленных

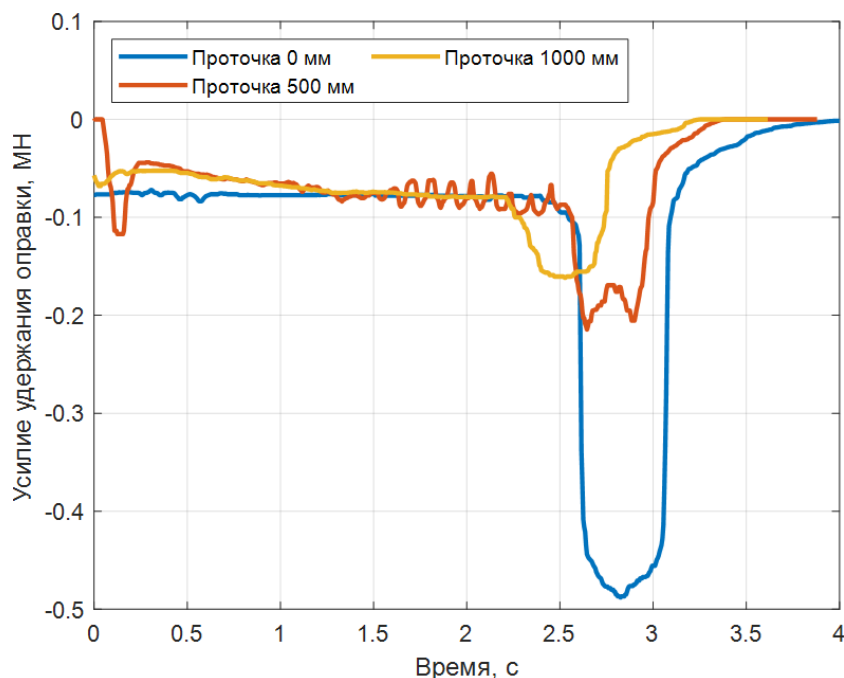


Рис. 2. Графики усилий удержания оправки
 Fig. 2. Mandrel holding force graphs

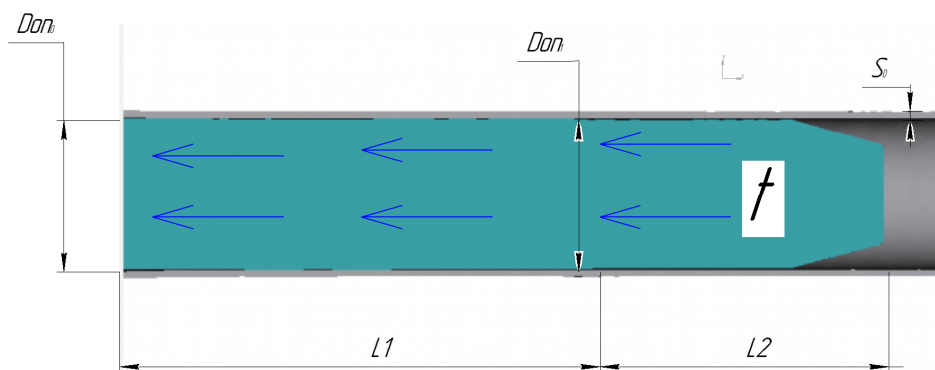


Рис. 3. Схема стягивания трубы с оправки с длиной проточки 500 мм
 Fig. 3. Schematic of pipe pulling from a mandrel with 500 mm bore length

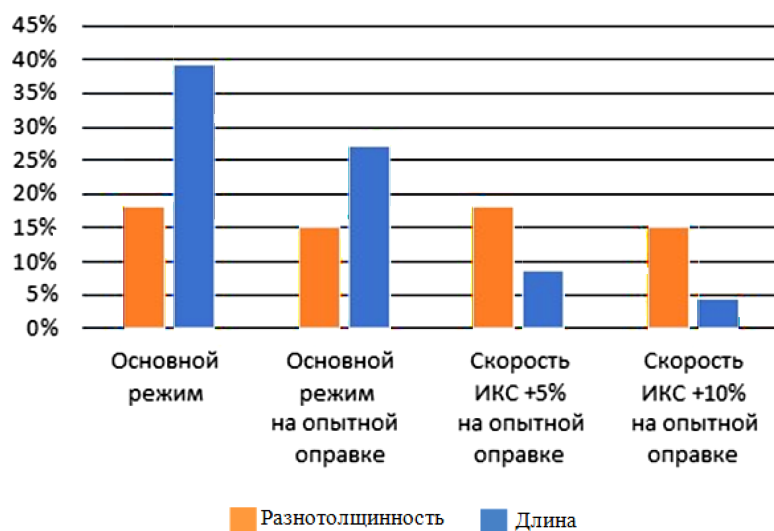


Рис. 4. Результаты анализа диаграмм УЗК
Fig. 4. Results of the analysis of UT diagrams

условиях проведено исследование влияния скоростного режима на изменение геометрических параметров труб. При этом исследования проводились как при существующем скоростном режиме ИКС, так и при увеличении скорости на 5 и 10 %. Для данного исследования было опробовано четыре режима опытной прокатки труб:

- 1) основной скоростной режим прокатки на используемой оправке;
- 2) основной скоростной режим прокатки на опытной оправке;
- 3) скорость вращения валков ИКС + 5 % на опытной оправке;
- 4) скорость вращения валков ИКС + 10 % на опытной оправке.

Диаграмма, иллюстрирующая разнотолщинность стенки трубы при анализе влияния скоростного режима, представлена на рис. 4.

Из рис. 4 видно, что при использовании основного скоростного режима прокатки разнотолщинность толщины стенки трубы на заднем конце достигает 1,8 мм (вариация от -0,6 до 1,2 мм), что соответствует 18 % от номинальной толщины стенки. При этом участок с максимальной разнотолщинностью занимает значительную протяжённость – примерно половину длины трубы (с 7 по 11,5 м).

На трубах, полученных по второму и третьему вариантам с использованием опытной оправки, наблюдаются локальные участки разнотолщинности на расстоянии 2,5–3,0 м от заднего конца. При этом по второму варианту максимальное значение разнотолщинности составляет 2,1 мм (21 % от толщины стенки),

что связано с использованием новой оправки (без наработки), способной существенно влиять на процесс проката. Для варианта 3 максимальная разнотолщинность составила 1,5 мм (15 %), при этом на задних концах труб по обоим вариантам наблюдается меньшая разнотолщинность по сравнению с трубой, изготовленной по существующей технологии.

В случае варианта 3 разнотолщинность, составляющая 18 % от толщины стенки, смещается ближе к заднему концу трубы (на расстоянии 0,5–1,0 м от заднего края), тогда как по основной технологии разнотолщинность по телу трубы остаётся существенно выше. При варианте 4 максимальная разнотолщинность равна 15 %, при этом участок с наибольшей разнотолщинностью локализуется непосредственно на заднем конце трубы, а по остальной части трубы разнотолщинность значительно ниже, чем по основной технологии.

Характер распределения толщины стенки, при котором разнотолщинный участок локализован в задней части трубы, позволяет осуществлять его последующее удаление, что способствует повышению точности по толщине стенки конечного изделия. Полученные данные толщинометрии подтверждают работоспособность предложенной технологии и обоснованность её дальнейшего развития.

Заключение

В настоящей работе выполнен комплексный анализ кинематико-силового взаимодействия непрерывного раскатного стана и извлекательно-калибровочного стана в процессе

формирования бесшовных труб. Установлено, что основными параметрами, определяющими интенсивность локального утонения стенки на заднем конце плети, являются протяжённость контактной зоны трубы с оправкой и режимы деформационно-скоростного нагружения, определяемые кинематикой приводных валков ИКС.

Результаты численного моделирования методом конечных элементов, выполненного в программной среде QForm 3D, в сочетании с данными физического эксперимента свидетельствуют о том, что применение модифици-

рованной оправки с проточкой переменной длины и регулирование частоты вращения валков ИКС приводят к значительному сокращению протяжённости зоны локального утонения. При этом изменение параметров геометрии оправки и скоростного режима зависит от механических свойств обрабатываемого металла, температурных режимов прокатки и конструкции прокатного агрегата. В целом предложенная технология позволяет снизить разностенность стенки в задней части трубы на 15 % по сравнению с базовым технологическим вариантом.

Список литературы

1. Коликов А.П., Романцев Б.А., Алещенко А.С. Обработка металлов давлением: теория процессов трубного производства: учеб. М.: Издат. Дом НИТУ «МИСиС», 2019. 502 с.
2. Черных И.Н., Струин Д.О., Шкуратов Е.А. Определение технологических факторов прокатки, способствующих возникновению дефектов поверхности на трубах // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2018. Т. 18, № 3. С. 51–58. DOI: 10.14529/met180306
3. Ковтунов Ю.С., Галаган В.В. Анализ условий прокатки бесшовных труб // XXV Региональная конференция молодых ученых и исследователей Волгоградской области. 2021. С. 141–142.
4. Исследование характера износа оправок стана МРМ и пути повышения срока их эксплуатации / С.Н. Мишин, В.Г. Шеркунов, Е.А. Алюшкаев, Д.О. Струин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2016. Т. 16, № 1. С. 125–130. DOI: 10.14529/met160118
5. Повышение эксплуатационного ресурса оправок непрерывного раскатного стана / Д.О. Струин, В.А. Топоров, О.А. Панасенко и др. // Metallurg. 2019. № 7. С. 22–25.
6. Выдрин А.В., Храмов Е.В., Буняшин М.В. Механизм формирования и расчет концевой разнотолщинности трубных плетей между раскатным и извлекающе-калибровочным станами // Черные металлы. 2017. № 3. С. 47–50.
7. Оценка точности формоизменения концов труб при калибровании / Д.А. Ахмеров, Д.Ю. Звонарев, А.В. Выдрин и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2020. Т. 20, № 4. С. 39–47. DOI: 10.14529/met200405
8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020662611 Российская Федерация. Программа для расчета геометрических параметров труб при моделировании в среде QForm / Д.Ю. Звонарев, М.А. Павлова, Д.А. Ахмеров, М.А. Зинченко; заявитель Открытое акционерное общество «Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности» (ОАО «РосНИТИ»). № 2020661915; заявл. 08.10.2020; опубл. 16.10.2020.
9. 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

References

1. Kolikov A.P., Romantsev B.A., Aleshchenko A.S. *Obработка metallov davleniem: teoriya protsessov trubnogo proizvodstva: ucheb.* [Metal forming: theory of tube production processes: textbook]. Moscow: MISIS Publishing House; 2019. 502 p. (In Russ.)
2. Chernykh I.N., Struin D.O., Shkuratov E.A. Determination of Technological Factors of Rolling Ability to Occurrence of Surface Defects on Pipes. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*. 2018;18(3):51–58. (In Russ.) DOI: 10.14529/met180306
3. Kovtunov Yu.S., Galagan V.V. [Analysis of seamless pipe rolling conditions]. In: *XXV Regional Conference of Young Scientists and Researchers of the Volgograd Region*. 2021. P. 141–142. (In Russ.)
4. Mishin S.N., Sherkunov V.G., Alyushkaev E.A., Struin D.O. Analysis of Wear-Out Behavior of MPM Mill Mandrels and Methods of Extension of Their Service Life. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*. 2016;16(1):125–130. (In Russ.) DOI: 10.14529/met160118

5. Struin D.O., Toporov V.A., Panasenko O.A., P'yankov A.G., P'yankov K.P., Shkuratov E.A. Increase of service life of continuous rolling mill mandrels. *Metallurgist*. 2019;(7):22–25. (In Russ.)

6. Vydrin A.V., Khramkov E.V., Bunyashin M.V. Forming mechanism and calculation of pipe end thickness deviation between mandrel elongating and extracting sizing mills. *Chernye Metally*. 2017;(3):47–50. (In Russ.)

7. Akhmerov D.A., Zvonarev D.Yu., Vydrin A.V., Zinchenko M.A., Pavlova M.A. Estimation of the Accuracy of the Formation of the Ends of Pipes during Calibration. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*. 2020;20(4):39–47. (In Russ.) DOI: 10.14529/met200405

8. Zvonarev D.Yu., Pavlova M.A., Akhmerov D.A., Zinchenko M.A. *Programma dlya rascheta geometricheskikh parametrov trub pri modelirovanii v srede QForm* [Program for calculating the geometric parameters of pipes when modeling in the QForm environment]. Certificate of state registration of the computer program RF, no. 2020662611, 2020. (In Russ.)

9. 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

Информация об авторах

Ахмеров Денис Альфредович, заместитель заведующего лабораторией моделирования технологических процессов, ООО «Исследовательский центр ТМК», Челябинск, Россия; akhmerovda@tmk-group.com.

Выдрин Александр Владимирович, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой процессов и машин обработки металлов давлением, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; главный научный сотрудник отдела бесшовных труб, ООО «Исследовательский центр ТМК», Челябинск, Россия; vydrinav@susu.ru.

Фарушкин Илья Камильевич, инженер лаборатории моделирования технологических процессов, ООО «Исследовательский центр ТМК», Челябинск, Россия; аспирант кафедры процессов и машин обработки металлов давлением, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; ilya.farukshin@tmk-group.com.

Ульянов Андрей Геннадьевич, начальник лаборатории прокатки труб, АО «Волжский трубный завод», Волжский, Россия; аспирант кафедры процессов и машин обработки металлов давлением, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; a.ulyanov@tmk-group.com.

Мотяков Сергей Юрьевич, руководитель группы прокатного инструмента, АО «Волжский трубный завод», Волжский, Россия; sergey.motyakov@tmk-group.com.

Буняшин Михаил Васильевич, начальник управления, ПАО «ТМК», Москва, Россия; mikhail.bunyashin@tmk-group.com.

Information about the authors

Denis A. Akhmerov, Deputy Head of the Laboratory of Technological Process Modeling, TMK Research, LLC, Chelyabinsk, Russia; akhmerovda@tmk-group.com.

Aleksandr V. Vydrin, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Processes and Machines for Metal Forming, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; Chief Researcher of the Seamless Pipes Department, TMK Research, LLC, Chelyabinsk, Russia; vydrinav@susu.ru.

Ilya K. Farukshin, Engineer of the Laboratory of Technological Process Modeling, TMK Research, LLC, Chelyabinsk, Russia; Postgraduate Student of the Department of Processes and Machines for Metal Forming, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; ilya.farukshin@tmk-group.com.

Andrey G. Ulyanov, Head of the Pipe Rolling Laboratory, JSC “Volzhsky Pipe Plant”, Volzhsky, Russia; Postgraduate Student of the Department of Processes and Machines for Metal Forming, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; a.ulyanov@tmk-group.com.

Sergey Yu. Motyakov, Head of the Rolling Tools Group, JSC “Volzhsky Pipe Plant”, Volzhsky, Russia; sergey.motyakov@tmk-group.com.

Mikhail V. Bunyashin, Head of the Department, PJSC TMK, Moscow, Russia; mikhail.bunyashin@tmk-group.com.

Статья поступила в редакцию 11.01.2025

The article was submitted 11.01.2025