



УДК 621.774

DOI 10.17073/0368-0797-2025-1-8-13



Оригинальная статья

Original article

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ПРОФИЛЬНЫХ ТРУБ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕЙ БОЛЕЕ ВЫСОКУЮ ТОЧНОСТЬ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПО СРАВНЕНИЮ С ЗАРУБЕЖНЫМИ ПРОИЗВОДИТЕЛЯМИ

М. Н. Мозжегоров, М. С. Машенцева

ООО «Исследовательский центр ТМК» (Россия, 454139, Челябинск, Новороссийская ул., 30)

mashentseva@rosniti.ru

Аннотация. Для освоения производства трубной продукции некруглого поперечного сечения из коррозионностойких марок сталей широко используется метод профилирования круглых труб в линиях трубоэлектросварочных и профилировочных агрегатов. К трубной продукции, применяемой в установках генерации атомной энергии, предъявляются повышенные требования к механическим свойствам и геометрическим параметрам. В частности, для профильных труб-обмоток статоров турбогенераторов прямоугольного поперечного сечения наиболее труднодостижимыми являются обеспечение плоскостности полок и получение радиусов наружного закругления углов в допуске $\pm 0,10$ мм по отношению к номиналу. Для успешного освоения производства данного вида продукции проведен синтез схемы профилирования круглой трубы. Разработана технология профилирования в приводных валках, образующих ящичные калибры, и не приводных четырехвалковых клетях. Компьютерное моделирование процесса профилирования было выполнено в программе Marc Mentat 2021. После проведения комплекса опытных прокаток авторы проанализировали геометрические параметры профилей с применением оптического микроскопа и специального программного обеспечения. Приемочно-сдаточные испытания прошли в соответствии с требованиями к профильным трубам для обмоток статоров турбогенераторов.

Ключевые слова: профилировочный стан, трубоэлектросварочный агрегат (ТЭСА), технология профилирования, радиус угла наружного контура, вогнутость полок профиля, ящичный калибр, калибровка валкового инструмента, компьютерное моделирование

Для цитирования: Мозжегоров М.Н., Машенцева М.С. Разработка технологии производства профильных труб, обеспечивающей более высокую точность геометрических параметров по сравнению с зарубежными производителями. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2025;68(1):8–13. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-1-8-13>

DEVELOPMENT OF PROFILE PIPES PRODUCTION TECHNOLOGY, PROVIDING HIGHER ACCURACY OF GEOMETRIC PARAMETERS COMPARED TO FOREIGN MANUFACTURES

M. N. Mozzhegorov, M. S. Mashentseva

LLC “TMK Research Center” (30 Novorossiiskaya Str., Chelyabinsk 454139, Russian Federation)

mashentseva@rosniti.ru

Abstract. The method of profiling circular pipes is used in the lines of pipe-electric welding and profiling units in order to master the production of pipe products of non-circular cross-section from corrosion-resistant steel grades. Tubular products used in nuclear power generation facilities have higher requirements to mechanical properties and geometrical parameters. In particular, the most difficult aspect of manufacturing profile pipes-windings for turbo-generator stators with a rectangular cross-section is ensuring the flatness of flanges and achieving the radius of the outer corner rounding within a tolerance of ± 0.10 mm relative to the nominal value. In order to successfully master the production of this type of product, a synthesis of the circular pipe profiling scheme was carried out. The authors developed the technology of profiling in drive rolls forming box gauges and in non-driven four-roll stands. Computer modeling of the profiling process was carried out in the Marc Mentat 2021 program. After experimental rolling, the profiles' geometric parameters were analyzed using an optical microscope and special software. Acceptance tests were performed in accordance with the requirements to profile pipes for windings of turbogenerator stators.

Keywords: shaping mill, pipe-electric welding unit (PEWU), profiling technology, outer contour corner radius, concavity of profile flanges, roll-pass design, computer modeling

For citation: Mozzhegorov M.N., Mashentseva M.S. Development of profile pipes production technology, providing higher accuracy of geometric parameters compared to foreign manufactures. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2025;68(1):8–13.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-1-8-13>

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Динамичное развитие промышленности приводит к постоянному росту требований к эксплуатационным свойствам изделий, применяемых в установках генерации энергии, в том числе атомной [1]. На сегодняшний день для бесперебойной работы многим предприятиям атомной промышленности необходимы комплектующие – профильные трубы определенного сечения для статоров турбогенераторов.

Для обеспечения потребностей в профильных трубах энергомашиностроительных компаний Российской Федерации специалистами Трубной металлургической компании (ТМК) проработана возможность изготовления требуемой продукции.

На этапе подготовки к освоению производства профильных труб размером $10,0 \times 3,8 \times 0,9$ мм возникли вопросы, не позволяющие в полной мере добиться стабильности получения ряда качественных характеристик изделия [1], изготовленного методом волочения, а именно:

- вогнутость полок профильных труб превышала нормы технических требований (рис. 1, а);
- в процессе профилирования образовывались дефекты на наружной поверхности (рис. 1, б);
- величина эффективных радиусов наружного закругления углов (методика замера по ASTM A554 [2]) превышала нормы требований к геометрии.

В рамках работы проведен анализ оборудования для производства требуемой продукции, имеющегося на производственной площадке предприятия, и дана оценка возможности производства профильных труб в сварном исполнении. На основе проведенного анализа разработана принципиальная схема технологического

процесса производства профильных труб в линии ТЭСА Т 30/35, приведен перечень инструмента и оборудования для дооснащения ТЭСА, позволяющий организовать непрерывное производство [3; 4]. Наиболее технологичным решением для производства необходимого сортамента является непрерывное производство профильных труб из рулонного проката методом аргонодуговой сварки круглой трубы-заготовки с последующей ее термообработкой и профилированием в размер в линии ТЭСА Т 30/35.

Предварительный анализ показал, что для успешного освоения непрерывного производства профильных труб в сварном исполнении необходимо дооснастить ТЭСА Т 30/35 следующим оборудованием и инструментом:

- печью светлого отжига;
- двумя неприводными четырехвалковыми клетями [5];
- валковым формовочным, калибрующим и профилирующим инструментом.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ

РЕШЕНИЯ

В связи с необходимостью совершенствования технологии в условиях импортозамещения решено организовать опытное производство профильных труб размером $10,0 \times 3,8 \times 0,9 \times 4000$ мм из круглых труб-заготовок на профилирующем стане, имеющемся на предприятии, по полунепрерывной схеме.

Для реализации принятого решения разработана схема профилирования, выполнен расчет калибровки калибрующего и профилирующего валкового инструмента [6; 7], также проведено компьютерное модели-

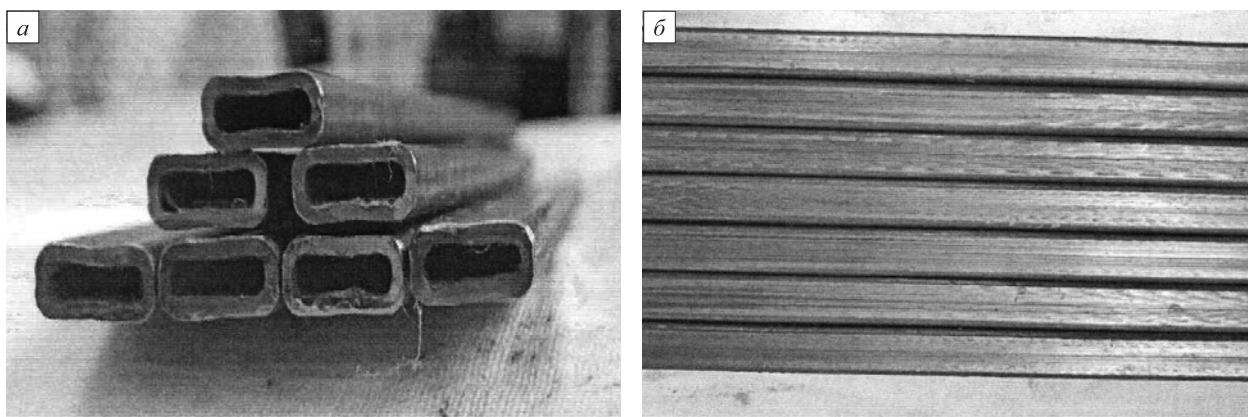
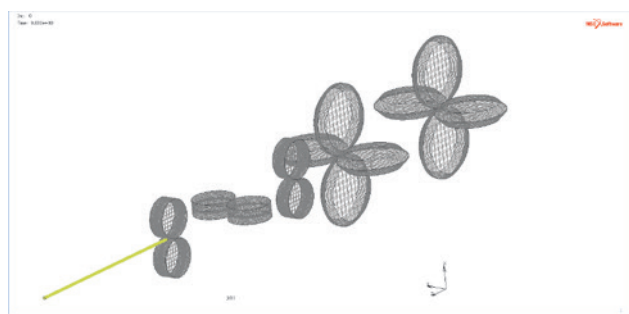
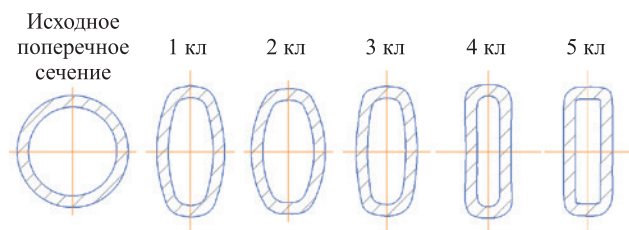


Рис. 1. Профильные трубы, изготовленные методом волочения: поперечное сечение (а); задиры на наружной поверхности (б)

Fig. 1. Profile pipes made by drawing: cross-section (a); backfins on the outer surface (b)



а



б

Рис. 2. Конечно-элементное моделирование: конечно-элементная модель прокатки трубы из круга в квадрат (а); поперечное сечение конечно-элементной-модели профильной трубы (б)

Fig. 2. Finite element modeling:

finite element model of rolling a pipe from a circle to a square (a); cross-section of finite element model of a profile pipe (b)

рование процесса профилирования круглых труб-заготовок [8 – 10]. Для оценки работоспособности новой калибровки валкового инструмента на этапе моделирования за объект исследования взята трубная заготовка диаметром 8,75 мм с толщиной стенки 0,9 мм. Модель трубы разбивали на 3600 конечных элементов типа Shell 7¹ [11]. Жарковым А.В. были подробно исследованы методы моделирования в системе Marc (CAD/CAE) различных видов гибки [12 – 18]. Данный тип элементов применяется для тонкостенных труб, когда толщина стенки существенно меньше диаметра. Для достижения высокой точности результатов и снижения вычислительных затрат применялась функция измельчения сетки в областях, где происходит интенсивная деформация [19]. Модели валков задавали как абсолютно жесткие тела [20]. Данное условие часто применяется при моделировании процессов непрерывной формовки труб и может считаться допустимым, учитывая небольшую толщину стенки трубы. Конечно-элементная модель профильной прокатки трубы представлена на рис. 2, а.

При анализе результатов расчетов оценивали напряженно-деформированное состояние трубы в межклетевом пространстве по распределению пластических

деформаций, а также геометрические параметры трубы. Поперечное сечение после каждой клетки представлено на рис. 2, б.

Максимальные пластические деформации появляются в месте образования будущих «углов» прямоугольного профиля, именно в этих местах накапливаются максимальные растягивающие и сжимающие нагрузки по внешнему и внутреннему диаметру соответственно [21]. Во второй и третьей клетях основной очаг деформации возникает в месте контакта валкового инструмента с трубой. Происходит поочередная деформация вертикального и горизонтального размеров трубы [22] во второй клетке по высоте, а в третьей по ширине. Завершающий этап прокатки происходит в двух идентичных клетях. В четвертой осуществляются последние изменения формы трубы, в то время как в пятой производится калибровка профиля.

Геометрические параметры конечно-элементного моделирования сведены в табл. 1. Для подтверждения требований и работоспособности разработанной калибровки проведены измерения параметров конечно-элементной модели профиля трубы: высоты A , ширины B и толщины стенки на переднем конце (ПК), в центре и заднем конце (ЗК) трубы после каждой клетки.

По результатам исследований утверждена следующая технологическая схема производства профильных труб:

- формовка и сварка труб круглого сечения 9,0×0,9 мм длиной 5 – 6 м из стали марки 08X18H10T на ТЭСА с применением аргоноводородной смеси;
- термообработка;
- правка;
- профилирование на стане в двух приводных двухвалковых клетях с ящичными калибрами и двух не приводных четырехвалковых клетях в размер 10,0×3,8×0,9 мм с обеспечением движения труб шестью приводными двухвалковыми клетями с валками от комплекта калибровочной группы для производства труб диаметром 9 мм;

Таблица 1. Геометрические параметры образцов труб после моделирования

Table 1. Geometric parameters of pipe samples after modeling

Номер клетки	Габаритные размеры, мм					
	A			B		
	ПК	центр	ЗК	ПК	центр	ЗК
1	10,27	10,27	10,25	5,31	5,34	5,31
2	9,73	9,78	9,82	5,86	5,83	5,81
3	10,14	10,13	10,14	4,84	4,82	4,84
4	10,08	10,08	10,09	3,88	3,86	3,82
5	10,06	10,08	10,07	3,86	3,85	3,82
Требования к качеству	10,00 ± 0,10			3,80 ± 0,10		

¹ Корнеев А.Б., Моргулец С.В., Климов М.А., Девятков С.В. Опыт применения системы MSC. Marc для решения сложных задач. URL: https://www.cadmater.ru/magazin/articles/cm_29_msc.html (дата обращения 12.12.2024).

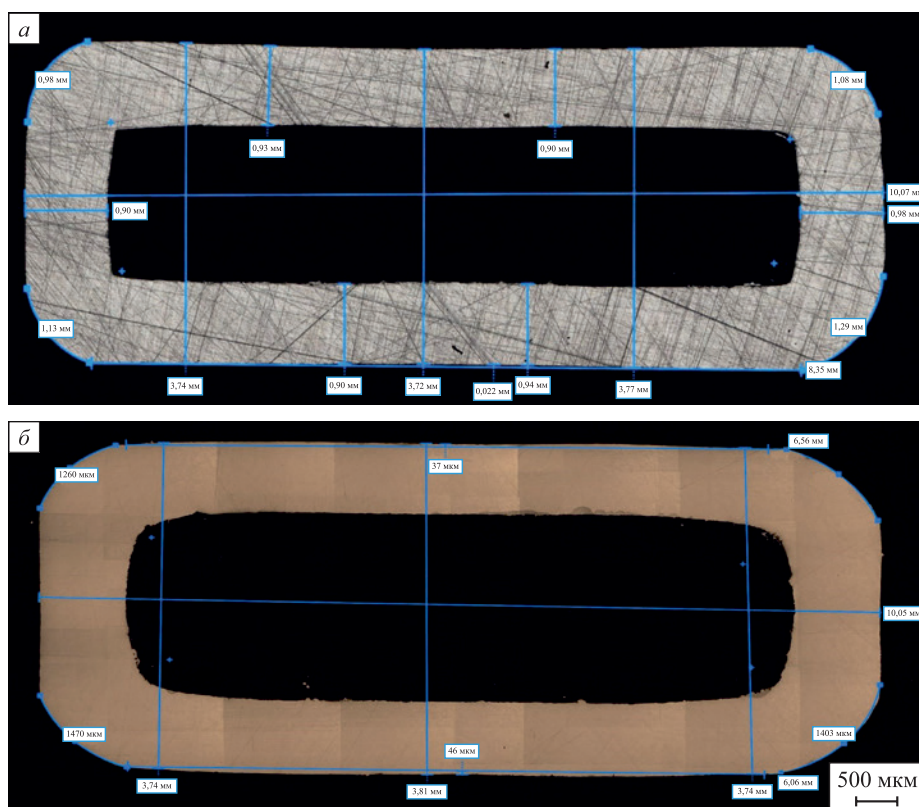


Рис. 3. Геометрические параметры труб, произведенных на российском (а) и зарубежном (б) предприятиях

Fig. 3. Geometric parameters of pipes manufactured by: a Russian (a), and foreign enterprise (b)

- повторная термообработка;
- проведение сдаточных испытаний.

Стан был модернизирован и дооснащен дополнительным двигателем для обеспечения стабильной работы привода и большей тянущей способности.

Следующим этапом проведен ряд опытно-промышленных прокаток для отработки технологии профилирования труб совместно. В качестве исходной заготовки использовали бесшовные трубы диаметром 8,40 – 8,75 мм с толщиной стенки от 0,88 до 1,05 мм. Режимы профилирования отрабатывались на скоростях 0,5 – 1,5 м/мин [23].

Для обеспечения заполнения углов применена поочередная деформация заготовки в вертикальной и горизонтальных плоскостях с минимальным обжатием периметра поперечного сечения [24; 25].

По результатам проведенных опытных прокаток получена опытно-промышленная партия профиль-

ных труб общим весом 50 кг. Геометрические характеристики труб исследованы с помощью оптического микроскопа и программного обеспечения.

Результаты измерений приведены на рис. 3, а.

Для сравнения геометрических параметров аналогичным способом проведены исследования образцов труб поставщика из дальнего зарубежья (рис. 3, б).

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

По итогам исследований и испытаний разработанная технология профилирования утверждена в качестве базовой для получения труб размером 10,0×3,8×0,9 мм на профилировочном стане.

Результаты измерений геометрических параметров труб, произведенных на российском и зарубежном предприятиях, сведены в табл. 2.

Таблица 2. Геометрические параметры образцов труб

Table 2. Geometric parameters of pipe samples

Производитель	Габаритные размеры, мм		Радиус углов наружного контура, мм				Выпуклость/вогнутость полок, мм
	A	B					
Российское предприятие	10,07	3,72 – 3,77	0,98	1,08	1,13	1,29	(–0,022) – (–0,030)
Зарубежное предприятие	10,05	3,74 – 3,81	1,26	1,56	1,40	1,47	(+0,037) – (+0,046)
Требования к качеству	10,00 ± 0,10	3,80 ± 0,10	0,90 – 1,20				0,10

Выводы

Разработанная технология профилирования обеспечила получение профильных труб, значительно превосходящих по геометрическим характеристикам (радиусу углов наружного контура) зарубежные аналоги.

Реализация разработанной технологии позволила обеспечить технологический суверенитет экономики Российской Федерации по направлению № 13.1.3 Постановления правительства РФ № 603 от 15.04.2023.

Применение разработанной непрерывной схемы производства профилей с термообработкой и профилированием в линии трубоэлектросварочного стана позволит достичь всех требований к профильным трубам для обмоток статоров турбогенераторов в виду значительно меньшей разницы толщины стенки у труб-заготовок, полученных методом сварки из рулонного проката.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Березовский С.Ф., Кропылев Ф.М. Производство гнутых профилей. Москва: Металлургия; 1978:152.
2. ASTM A554 Standard Specification for Welded Stainless Steel Mechanical Tubing. Copyright © ASTM International, West Conshohocken, PA, United States.
3. Akopyan K.E., Yusupov V.S., Koryakovskii E.D., Kontievskii I.L., Bolobanova N.L. Concerning the profiling of electrowelded steel pipes with a triangular cross section. *Steel in Translation*. 2023;53(11):1050–1055. <https://doi.org/10.3103/S0967091223110037>
4. Благодарцев И.В., Шемшурова Н.Г. О моделировании процесса формовки трубы треугольного поперечного сечения из круглой. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2014;(2):65–66. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2014-2-65-66>
Blagodartsev I.V., Shemshurova N.G. About process modeling of molding of triangular cross-section pipes from the round ones. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2014; 57(2):65–66. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2014-2-65-66>
5. Паршин С.В. Процессы и машины для изготовления профильных труб: научно-практическое издание. Екатеринбург: УГТУ–УПИ; 2006:356.
6. Пат. 2568804 RU. Способ изготовления прямошовных труб прямоугольного и квадратного сечения / Суворов В.И.; заявлено 30.04.2014; опубликовано 20.11.2015. Бюллетень № 32.
7. Suvorov V.I., Mozzhegorov M.N., Pyatkov V.L., Pluzhnikov N.S. Optimizing the continuous production of electrowelded pipe. *Steel in Translation*. 2011;(2):135–139. <https://doi.org/10.3103/S0967091211020173>
8. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., Zhu J.Z. Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals. Seventh Edition. Elsevier Ltd; 2013:756. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-24909-9>
9. Fleissner F., Gaugele T., Eberhard P. Applications of the discrete element method in mechanical engineering. *Multibody System Dynamics*. 2007;18:81–94. <https://doi.org/10.1007/s11044-007-9066-2>
10. Окулов Р.А., Семенова Н.В. Моделирование влияния отклонений диаметра заготовки на точность размеров при изготовлении профильных труб с целью совершенствования процесса. *Инженерный вестник Дона*. 2019;(5(56)):21–29.
Okulov R.A., Semenova N.V. Modeling the effect of billet diameter deviations on dimensional accuracy when profiling shaped tubes to improve the process. *Inzhenernyi vestnik Dona*. 2019;(5(56)):21–29. (In Russ.).
11. Шатров Б.В. Теоретические основы анализа конструкций с применением метода конечных элементов. МАИ; 1998:101.
12. Жарков А.В. Моделирование в системе Marc обработки материалов в машиностроении. Часть 1. Одноугловая гибка. *Вестник машиностроения*. 2012;(8):67–72.
Zharkov A.V. Modeling in the Marc system of processing the materials in mechanical engineering. Part 1. One-angular bending. *Vestnik mashinostroeniya*. 2012;(8):67–72. (In Russ.).
13. Жарков А.В. Моделирование в системе Marc обработки материалов в машиностроении. Часть 2. Двухугловая гибка без прижима заготовки. *Вестник машиностроения*. 2012;(9):61–67.
Zharkov A.V. Marc (CAD/CAE) system model analysis of materials processing. Part 2. Double-angle bending in absence of blank holder. *Vestnik mashinostroeniya*. 2012;(9):61–67. (In Russ.).
14. Жарков А.В. Моделирование в системе Marc обработки материалов в машиностроении. Часть 3. Двухугловая гибка с прижимом заготовки. *Вестник машиностроения*. 2012;(10):60–65.
Zharkov A.V. Marc (CAD/CAE) system model analysis of materials processing. Part 3. Double-angle bending with blank holding. *Vestnik mashinostroeniya*. 2012;(10):60–65. (In Russ.).
15. Жарков А.В. Моделирование в системе Marc обработки материалов в машиностроении. Часть 4. Вытяжка осесимметричной детали без утонения стенки. *Вестник машиностроения*. 2012;(11):58–64.
Zharkov A.V. Marc system modeling materials processing in engineering. Part 4. Extension of axisymmetric part without wall necking. *Vestnik mashinostroeniya*. 2012;(11):58–64. (In Russ.).
16. Жарков А.В. Моделирование в системе Marc обработки материалов в машиностроении. Часть 5. Вытяжка осесимметричной детали с утонением стенки. *Вестник машиностроения*. 2012;(12):54–61.
Zharkov A.V. Marc system modeling materials processing in engineering. Part 5. Extension of axisymmetric part with wall necking. *Vestnik mashinostroeniya*. 2012;(12):54–61. (In Russ.).
17. Жарков А.В. Моделирование в системе Marc обработки материалов в машиностроении. Часть 6. Вытяжка детали сложной формы. *Вестник машиностроения*. 2013;(2):67–73.
Zharkov A.V. Material processing model analysis in Marc system in engineering. Part 6. Draw-forming complex part. *Vestnik mashinostroeniya*. 2013;(2):67–73. (In Russ.).
18. Жарков А.В. Моделирование в системе Marc обработки материалов в машиностроении. Часть 7. Испыта-

- ния и правка растяжением. *Вестник машиностроения*. 2013;(3):43–47.
- Zharkov A.V. Material processing model analysis in Marc system in engineering. Part 7. Test and editing by stretching. *Vestnik mashinostroeniya*. 2013;(3):43–47. (In Russ.).
19. Лепестов А.Е., Соколова О.В., Скрипкин А.Ю. Исследование влияния деформации клетки с открытым профилем калибра на точность непрерывной формовки труб. *Производство проката*. 2011;(5):32–34.
 20. Ji-ying L.I.U., Seldmair A. Computer aided design for roll-forming shaped tube. In: *Proceedings of the 5th Tube Tech China*. Wuzhen, Jiaxing city, Zhejiang province: *Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2022:87–92.
 21. Шевакин Ю.В. Машины и агрегаты для производства стальных труб. Москва: Интермет Инжиниринг; 2007:388.
 22. Матвеев Ю.М., Ваткин Я.Л. Калибровка инструмента трубных станов. Москва: Металлургия; 1970:480.
 23. Vydrin A.V., Shirokov V.V. Speed simulation of continuous pipe rolling. *Steel in Translation*. 2011;41:140–142. <https://doi.org/10.3103/S0967091211020215>
 24. Суворов В.И., Варнак А.Г., Мозжегоров М.Н. Расчет периметра и веса профильных труб текущего производства. В кн.: *Трубы – 2011: Труды Международной научно-практической конференции 27–28 сентября 2011, Челябинск. Том 2*. Челябинск: Издательство «Трубы-2011»; 2011:77–89.
 25. Farahmad H.R., Abrinia K. An upper bound analysis for reshaping thick tubes to polygonal cross section tubes through multistage roll forming process. *International Journal of Mechanical Science*. 2015;100:90–98. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2015.06.012>

Сведения об авторах

Information about the Authors

Михаил Николаевич Мозжегоров, старший научный сотрудник лаборатории прочности и сварки труб, ООО «Исследовательский центр ТМК» в г. Челябинск
ORCID: 0009-0007-6400-1634
E-mail: mozzhegorov@rosniti.ru

Мария Сергеевна Машенцева, научный сотрудник сектора формовки труб, ООО «Исследовательский центр ТМК» в г. Челябинск
ORCID: 0000-0001-7856-3266
E-mail: mashentseva@rosniti.ru

Mikhail N. Mozzhegorov, Senior Researcher of the Laboratory of Pipe Strength and Welding, LLC “TMK Research Center”, Chelyabinsk
ORCID: 0009-0007-6400-1634
E-mail: mozzhegorov@rosniti.ru

Mariya S. Mashentseva, Research Associate in the Pipe Forming Sector, LLC “TMK Research Center”, Chelyabinsk
ORCID: 0000-0001-7856-3266
E-mail: mashentseva@rosniti.ru

Поступила в редакцию 08.05.2024
 После доработки 23.09.2024
 Принята к публикации 12.11.2024

Received 08.05.2024
 Revised 23.09.2024
 Accepted 12.11.2024