

ВЛИЯНИЕ ОПЕРАЦИЙ ФОРМОВКИ ТРУБЫ НА ПАРАМЕТРЫ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ

М.С. Машенцева¹, mashentseva@rosniti.ru, <http://orcid.org/0000-0001-7856-3266>

В.В. Микуров², mikurov@rosniti.ru, <http://orcid.org/0000-0002-5730-3438>

¹ ООО «Исследовательский центр ТМК», Челябинск, Россия

² АО «Русский научно-исследовательский институт трубной промышленности»
(АО «РусНИТИ»), Челябинск, Россия

Аннотация. В работе представлен анализ влияния трубного передела на параметры трещиностойкости (СТОД). Трещиностойкость является важным показателем для оценки прочности материалов, особенно в случае металлических конструкций, подверженных длительным нагрузкам и воздействиям, таким как трубопровод высокого давления. Результаты анализа могут использоваться для разработки методов и технологий, направленных на повышение стойкости трубопроводов к трещиностойкости. Дальнейшие исследования в данной области могут быть направлены на оптимизацию формоизменяющих операций трубного передела с учетом параметров трещиностойкости.

Ключевые слова: трубный передел, трещиностойкость, раскрытие в вершине трещины, трубопровод, листовой прокат, СТОД

Для цитирования: Машенцева М.С., Микуров В.В. Влияние операций формовки трубы на параметры трещиностойкости // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2024. Т. 24, № 3. С. 34–40. DOI: 10.14529/met240304

Original article
DOI: 10.14529/met240304

INFLUENCE OF PIPE FORMING OPERATIONS ON FRACTURE RESISTANCE PARAMETERS

M.S. Mashentseva¹, mashentseva@rosniti.ru, <http://orcid.org/0000-0001-7856-3266>

V.V. Mikurov², mikurov@rosniti.ru, <http://orcid.org/0000-0002-5730-3438>

¹ TMK Research, LLC, Chelyabinsk, Russia

² The Russian Research Institute of the Tube & Pipe Industries, Joint Stock Company
(RusNITI JSC), Chelyabinsk, Russia

Abstract. The paper presents an analysis of the influence of pipe processing on fracture resistance (CTOD) parameters. Fracture resistance is an important indicator for assessing the strength of materials, especially in the case of metal structures subjected to long-term loads and impacts, such as high-pressure pipelines. The results of the analysis can be used to develop methods and technologies to improve the fracture resistance of pipelines. Further research in this area can be aimed at optimization of forming operations of pipe processing taking into account fracture resistance parameters.

Keywords: tube processing, fracture resistance, crack tip opening displacement, pipeline, plate, CTOD

For citation: Mashentseva M.S., Mikurov V.V. Influence of pipe forming operations on fracture resistance parameters. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*. 2024;24(3):34–40. (In Russ.) DOI: 10.14529/met240304

Современный магистральный трубопровод для нефти и газа высокого давления является сложным технологическим сооружением. Первостепенным требованием, предъявляемым к его конструкции, является обеспечение необходимого уровня безопасности, особенно с позиции предотвращения протяженных разрушений. Остановка разрушения, распространяющегося по магистральному трубопроводу для нефти и газа высокого давления, должна обеспечиваться выбором материала труб, который должен обладать необходимым уровнем трещиностойкости. Трещиностойкость трубных сталей определяется при помощи стандартных испытаний по ISO 12135 [1], а именно при помощи определения показателя раскрытия в вершине трещины (СТОД). Раскрытие в вершине трещины (СТОД) – это показатель, который характеризует способность материала готовой продукции сопротивляться образованию трещин и их распространению при воздействии внешних нагрузок. Подобные испы-

тания все чаще являются обязательными при контроле качества готовой продукции.

За несколько лет через испытательную лабораторию прошло множество образцов от листового проката разной толщины для будущих трубопроводов, а также образцы от самих трубопроводов разных назначений и типоразмеров для проведения испытания на вязкость разрушения, что позволило собрать статистику для анализа. Значения образцов СТОД листового проката значительно выше значений, полученных в результате испытания образцов трубопровода (рис. 1), и этому может быть множество причин.

Химический состав стали играет не последнюю роль в определении ее механических свойств, включая прочность и устойчивость к трещинообразованию. Особое влияние оказывают легирующие элементы, такие как марганец, кремний, никель, хром, молибден, ниобий и другие, которые могут влиять на процессы образования микротрещин и их распростране-

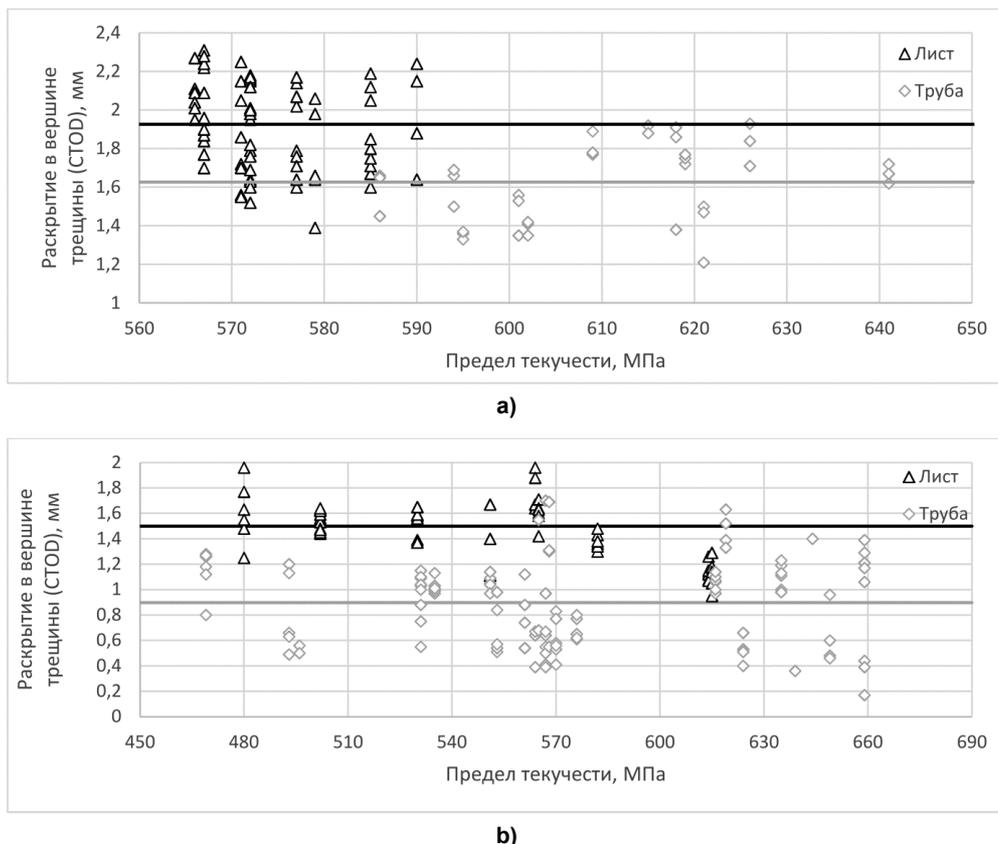
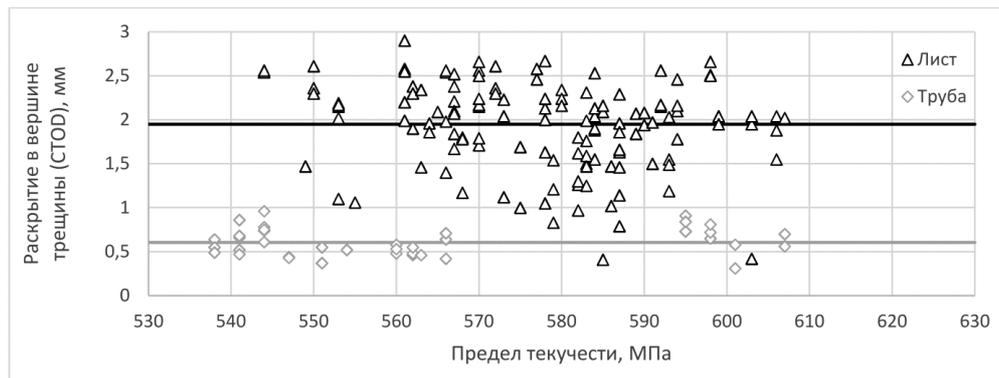


Рис. 1. Результаты определения показателя раскрытия в вершине трещины (СТОД): а – лист толщиной 18 мм, труба типоразмером 1020 × 18 мм; б – лист толщиной 25,8 мм, труба типоразмером 1420 × 25,8 мм; в – лист толщиной 30,9 мм, труба типоразмером 1420 × 30,9 мм (см. также с. 36)

Fig. 1. Results of determining the crack tip opening displacement (CTOD): а – plate 18 mm thick, pipe size 1020 × 18 mm; б – plate 25,8 mm thick, pipe size 1420 × 25,8 mm; в – plate 30,9 mm thick, pipe size 1420 × 30,9 mm (see also p. 36)



с)

Рис. 1. Окончание
Fig. 1. End

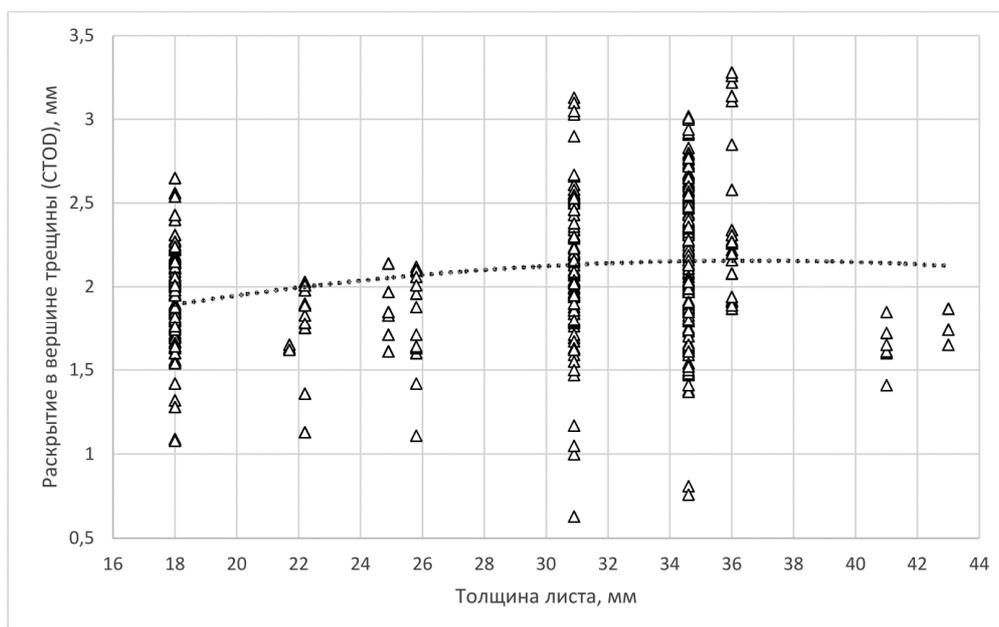


Рис. 2. Результаты определения показателя раскрытия в вершине трещины (CTOD) листового проката в зависимости от его толщины

Fig. 2. Results of determining the crack tip opening displacement (CTOD) of flat product depending on its thickness

ние [2]. Микроструктура стали также оказывает значительное влияние на трещиностойкость материала. Размер и форма зерен, наличие включений, структура фаз и дефекты поверхности могут существенно влиять на поведение стали в условиях механического нагружения [3].

Большое влияние на механические свойства, в том числе показатель раскрытия в вершине трещины (CTOD), оказывают деформации формоизменяющих операций трубного передела, исследование влияния на механические свойства представлено в ряде работ [4–6]. По результатам исследований этих авторов свойства металлов имеют тенденцию к снижению показателей, определяемых при испытаниях на растяжение и ударный изгиб. Помимо

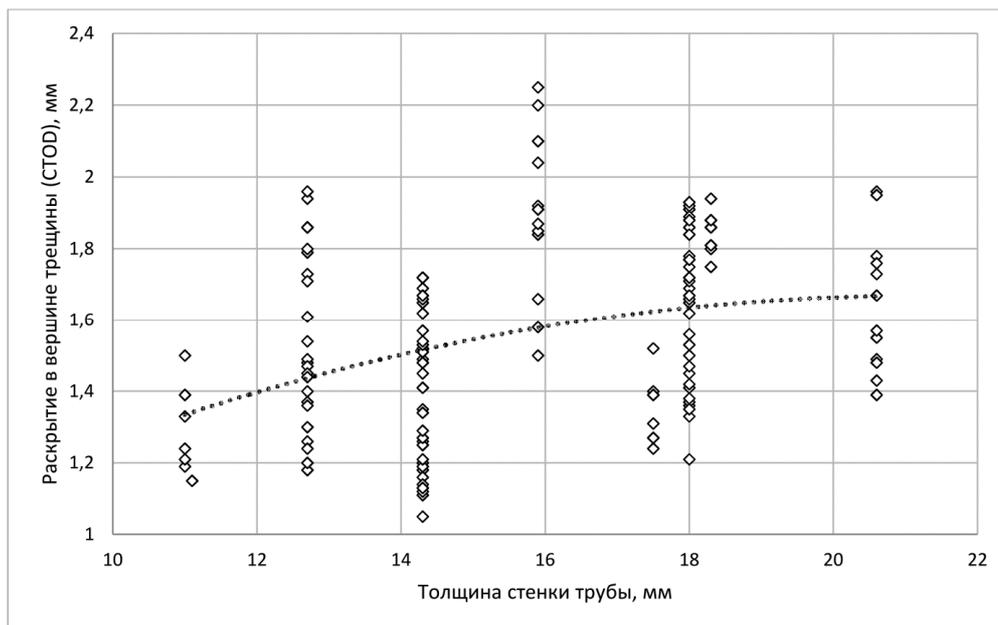
общего снижения механических свойств готового трубопровода, в отличие от листового проката, пластическая деформация при формообразовании влечет за собой микродефекты и неоднородность напряженно-деформированного состояния металла [7].

Также на конечное значение показателя трещиностойкости готовой продукции значительное влияние оказывают ее геометрические параметры. Например, для листового проката основным геометрическим параметром является его толщина. На рис. 2 представлены результаты испытаний на определение раскрытия в вершине трещины (CTOD) листового проката в зависимости от его номинальной толщины. Можно заметить, что чем

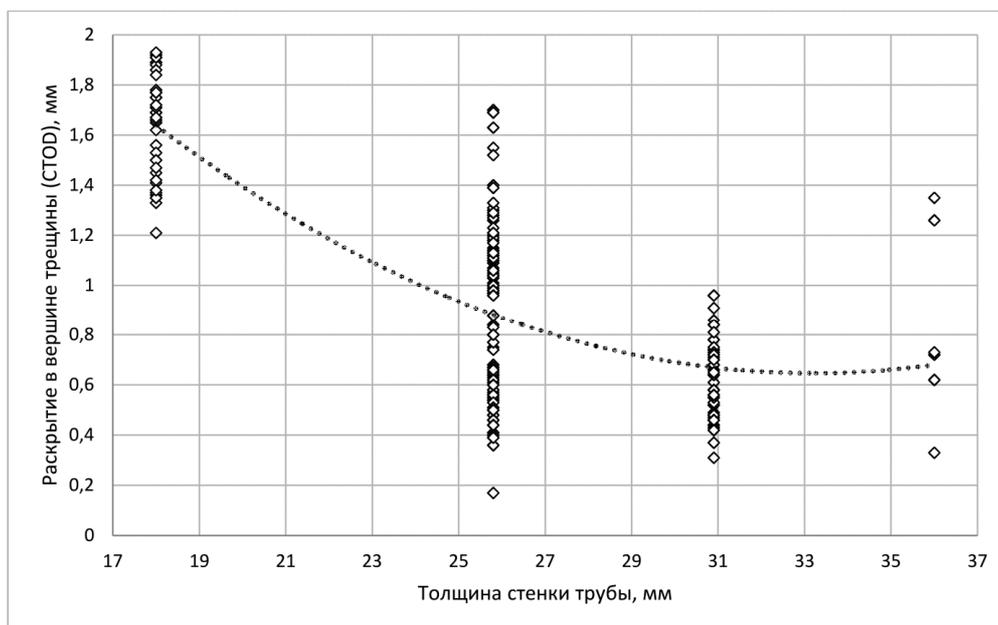
больше толщина листового проката, тем выше значение CTOD, следовательно, меньше вероятность появления трещин при механических нагрузках. Однако слишком большая толщина также может снизить общую прочность материала из-за возможного образования внутренних напряжений.

Для трубопровода помимо толщины стенки важен его диаметр. Увеличение диаметра трубы может повысить ее трещиностойкость

за счет увеличения площади распределения механических напряжений, трещине будет труднее распространяться, поскольку давление и напряжение будут распределяться по большей поверхности. Если труба имеет меньший диаметр, то ее радиус кривизны будет меньше, что может привести к повышенным напряжениям в области изгиба. Это может способствовать образованию и распространению трещин. На рис. 3 представлены



a)



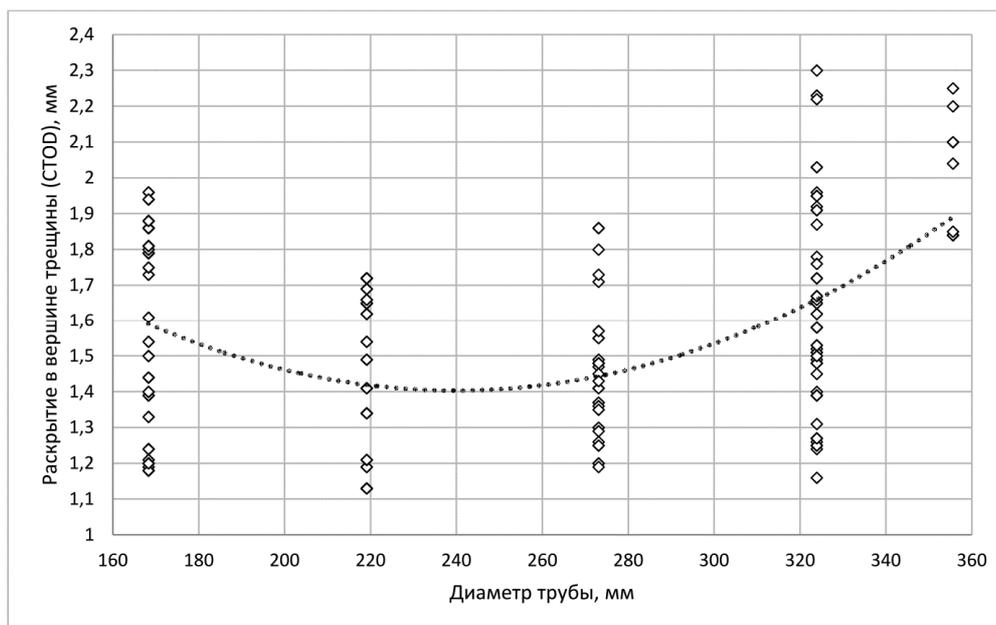
b)

Рис. 3. Результаты определения показателя раскрытия в вершине трещины (CTOD) трубы в зависимости от толщины ее стенки: а – бесшовные трубы; б – сварные трубы

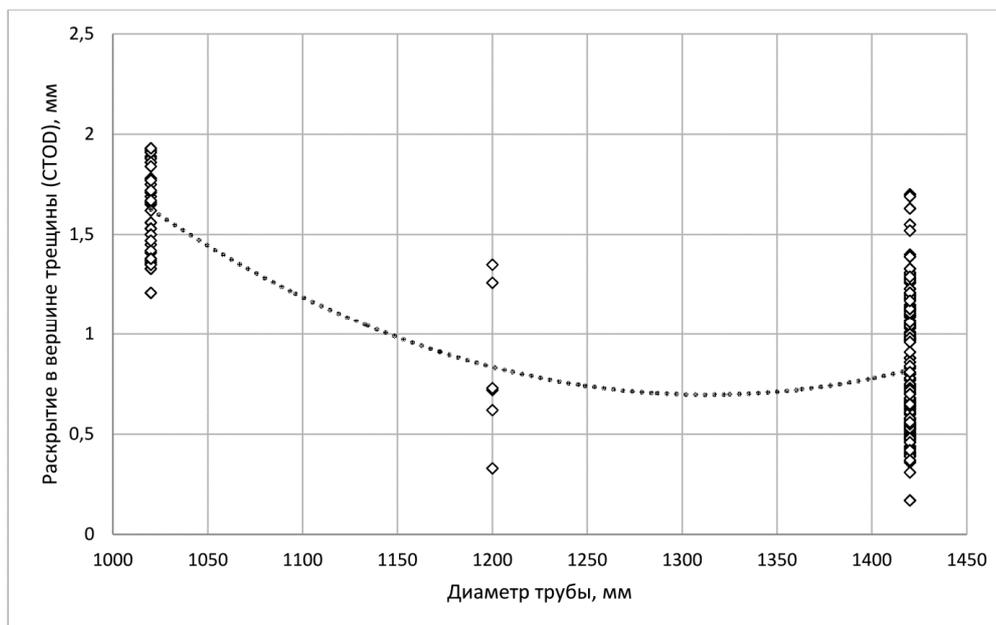
Fig. 3. Results of determining the crack tip opening displacement (CTOD) of pipe depending on its wall thickness: а – seamless pipe; б – welded pipe

зависимости значения раскрытия в вершине трещины (СТОД) трубопроводов от толщины стенки, на рис. 4 – зависимости значения раскрытия в вершине трещины (СТОД) трубопроводов от диаметра трубы. Значения труб в бесшовном исполнении приведены исключительно для определения характера поведения показателя раскрытия в вершине трещины с увеличением диаметра и толщины стенки трубы.

Анализируя результаты испытаний на вязкость разрушения образцов, отобранных от труб, можно заметить, что у бесшовных труб с увеличением толщины стенки и диаметра происходит и рост значений показателя раскрытия в вершине трещины (СТОД). И ровно обратная тенденция наблюдается у сварных труб: при увеличении толщины стенки и диаметра значения СТОД становятся ниже. У трубопроводов в бесшовном исполнении самые высокие зна-



a)



b)

Рис. 4. Результаты определения показателя раскрытия в вершине трещины (СТОД) трубы в зависимости от ее диаметра: а – бесшовные трубы; б – сварные трубы

Fig. 4. Results of determining the crack tip opening displacement (CTOD) of pipe depending on its diameter: а – seamless pipe; б – welded pipe

чения у типоразмера 355,6 × 15,9 мм, у сварных труб – 1020 × 20 мм.

Вероятно, существует некоторая «золотая середина», оптимальное сочетание толщины стенки и диаметра трубы для обеспечения прочности и эффективности конструкции. Правильно подобранные геометрические параметры трубы позволят улучшить равномерность

распределения нагрузок и повысить стойкость трубопровода к воздействию внешних факторов. Для более точной оценки влияния трубного передела на значения раскрытия в вершине трещины (CTOD) следует прибегнуть к другим методам исследования, в частности, построить математическую модель, а также провести конечно-элементное моделирование.

Список литературы

1. ISO 12135:2021 (E) Metallic materials – Unified method of test for the determination of quasi-static fracture toughness.
2. Влияние легирующих элементов на трещиностойкость конструкционных сталей низкотемпературного назначения / Б.С. Ермаков, А.В. Васильев, В.В. Каргинова, А.К. Андреев // *Металлы*. 2010. № 3. С. 50–55.
3. Исследование причин снижения вязких характеристик образцов трубной стали при испытаниях на CTOD / О.Г. Зотов, Р.В. Сулягин, А.А. Кононов, А.И. Шамшуринов // *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*. 2014. № 4 (207). С. 156–165.
4. Хадеев Г.Е., Рингинен Д.А. Влияние многостадийной знакопеременной деформации в ходе трубного передела на изменение механических свойств сталей различных классов прочности // *Трубы – 2018: тр. XXIII Междунар. науч.-практ. конф. Сб. докл. ОАО «РосНИТИ»* / под ред. И.Ю. Пышминцева. Челябинск: Изд-во ОАО «РосНИТИ», 2018. Т. 1. С. 88–94.
5. Нестеров Г.В., Студенов Е.П., Гаврилов Д.А. Оценка влияния трубного типа передела на свойство металла трубного типа большого диаметра класса прочности K56 // *Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов*. 2017. Т. 7, № 3. С. 48–57.
6. Изменение механических свойств листового проката в процессе изготовления труб большого диаметра для магистральных нефтепроводов / Г.В. Нестеров, Д.А. Гаврилов, П.В. Пошибаев, А.И. Азарин // *Механика машин, механизмов и материалов*. 2017. № 4 (41). С. 56–65.
7. Ильичев В.Г., Залавин Я.Е. Технологические возможности улучшения качества геометрических характеристик труб большого диаметра вальцевой формовки при догибке прикромочных полок // *Черные металлы*. 2013. № 12 (984). С. 13–18.

References

1. ISO 12135:2021 (E) Metallic materials – Unified method of test for the determination of quasi-static fracture toughness.
2. Ermakov B.S., Vasil'ev A.V., Karginova V.V., Andreev A.K. Effect of alloying elements on the cracking resistance of structural steels intended for low-temperature application. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2010;2010(5):412–417. DOI: 10.1134/S0036029510050101
3. Zotov O.G., Sulyagin R.V., Kononov A.A., Shamshurin A.I. On researching the reasons of a decrease of ductile characteristics of pipeline steel specimens during CTOD test. *St. Petersburg state polytechnical university journal*. 2014;4(207):156–165. (In Russ.)
4. Khadeev G., Ringinen D. [Influence of multistage sign-variable deformation on mechanical properties of different strength grades during pipe production]. In: *Pipe – 2018: Proceedings of the XXIII International scientific-practical conference. Collection of reports of OJSC “RosNITI”*. Chelyabinsk: OJSC “RosNITI”; 2018. Vol. 1. P. 88–94. (In Russ.)
5. Nesterov G.V., Studenov E.P., Gavrilov D.A. Evaluation of the pipe processing effect on the properties of large diameter metal pipes of strength class K56. *Science & technologies: oil and oil products pipeline transportation*. 2017;7(3):48–57. (In Russ.)
6. Nesterov G.V., Gavrilov D.A., Poshibaev P.V., Azarin A.I. Changes in mechanical properties of sheet metal in the manufacturing process of large diameter pipes for oil pipelines. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*. 2017;4(41):56–65. (In Russ.)

7. Ilyichev V.G., Zalavin Ya.E. Technological possibilities for improvement of geometrical parameters of large diameter tubes after roll forming in the conditions of bending of marginal flanges. *Chernye metally*. 2013;12(984):13–18. (In Russ.)

Информация об авторах

Машенцева Мария Сергеевна, научный сотрудник сектора технологии формовки труб, ООО «Исследовательский центр ТМК», Челябинск, Россия; mashentseva@rosniti.ru.

Микуров Виталий Валерьевич, начальник сектора механических испытаний, АО «Русский научно-исследовательский институт трубной промышленности» (АО «РусНИТИ»), Челябинск, Россия; mikurov@rosniti.ru.

Information about the authors

Maria S. Mashentseva, Researcher in the Pipe Forming Sector, TMK Research, LLC, Chelyabinsk, Russia; mashentseva@rosniti.ru.

Vitaliy V. Mikurov, Head of Section Mechanical Test Section, The Russian Research Institute of the Tube & Pipe Industries, Joint Stock Company (RusNITI JSC), Chelyabinsk, Russia; mikurov@rosniti.ru.

Статья поступила в редакцию 13.07.2024

The article was submitted 13.07.2024