

Металловедение и термическая обработка

Physical metallurgy and heat treatment

Научная статья
УДК 621.785.369
DOI: 10.14529/met260103

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМА ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА МИКРОСТРУКТУРУ И ТВЕРДОСТЬ ТРУБ ИЗ ХРОМОНИКЕЛЬМОЛИБДЕНОВОЙ СТАЛИ С ВЫСОКОУСТОЙЧИВЫМ АУСТЕНИТОМ

М.Ю. Чубуков, mikhail.chubukov@tmk-group.com
А.А. Гусева, anna.guseva@tmk-group.com
И.В. Мякотина, irina.myakotina@tmk-group.com
А.И. Короткова, alena.korotkova@tmk-group.com
АО «Волжский трубный завод», Волжский, Россия

Аннотация. Представлены результаты по исследованию микроструктуры и твердости бесшовных горячедеформированных труб из хромоникельмолибденовой стали мартенситного класса. Конструкционные доэвтектоидные легированные стали, содержащие хром, никель и молибден, отличающиеся высокой прокаливаемостью, характеризуются повышенной твердостью в горячедеформированном состоянии. Образующийся после горячей деформации и охлаждения на спокойном воздухе мартенсит в металле бесшовных труб затрудняет операции их механической обработки и обуславливает необходимость проведения промежуточной термической обработки. Изучены структурные превращения, протекающие при проведении высокого отпуска и изотермического отжига трубных образцов. На базе экспериментальных данных получено уравнение регрессии, описывающее влияние времени выдержки в процессе высокого отпуска трубных образцов из исследуемой стали на их твердость. Установлено, что наиболее эффективная сфероидизация структуры стали и, как результат, снижение её твердости происходит при проведении изотермического отжига при температуре 710 °С с последующей выдержкой вблизи A_1 . Получено, что при проведении изотермического отжига общее время термической обработки снижается более чем в 5 раз относительно общего времени высокого отпуска, необходимого для снижения твердости до необходимых значений. Полученные экспериментальные данные показали, что снижение температуры отжига с 740 до 710 °С позволяет увеличить статистическую стабильность обеспечения твердости после термической обработки ввиду повышения однородности микроструктуры, что обусловлено более высокой долей нерастворившихся карбидов, оказывающих зародышевое влияние на образование зернистого перлита вблизи температуры A_1 . По результатам исследования даны некоторые рекомендации по выбору оптимальных температур нагрева и изотермической выдержки для термообработки изделий из хромоникельмолибденовых сталей.

Ключевые слова: горячедеформированная труба, сталь мартенситного класса, термическая обработка, твердость, микроструктура, мартенсит, зернистый перлит, изотермический отжиг

Для цитирования: Исследование влияния режима термической обработки на микроструктуру и твердость труб из хромоникельмолибденовой стали с высокоустойчивым аустенитом / М.Ю. Чубуков, А.А. Гусева, И.В. Мякотина, А.И. Короткова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2026. Т. 26, № 1. С. 20–26. DOI: 10.14529/met260103

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF HEAT TREATMENT MODE ON THE MICROSTRUCTURE AND HARDNESS OF PIPES MADE OF CHROME-NICKEL-MOLYBDENUM STEEL WITH HIGH-RESISTANT AUSTENITE

M.Yu. Chubukov, mikhail.chubukov@tmk-group.com

A.A. Guseva, anna.guseva@tmk-group.com

I.V. Myakotina, irina.myakotina@tmk-group.com

A.I. Korotkova, alena.korotkova@tmk-group.com

JSC "Volzhsky Pipe Plant", Volzhsky, Russia

Abstract. The results of a study of the microstructure and hardness of seamless hot-formed pipes made of martensitic chromium-nickel-molybdenum steel are presented. Structural hypoeutectoid alloy steels containing chromium, nickel, and molybdenum, while highly hardenable, exhibit increased hardness in the hot-formed state. Martensite formed in the seamless pipe metal after hot deformation and cooling in still air complicates machining operations and necessitates intermediate heat treatment. Structural transformations occurring during high-temperature tempering and isothermal annealing of pipe specimens are studied. Based on the experimental data, a regression equation is derived describing the effect of holding time during high-temperature tempering of pipe specimens made of the studied steel on their hardness. It was established that the most effective spheroidization of the steel structure and, as a result, a reduction in its hardness, occurs during isothermal annealing at a temperature of 710 °C, followed by holding near the A_1 temperature. It was found that during isothermal annealing, the total heat treatment time is reduced by more than 5 times, relative to the total high-temperature tempering time required to reduce the hardness to the required values. The obtained experimental data showed that reducing the annealing temperature from 740 °C to 710 °C allows for an increase in the statistical stability of hardness after heat treatment due to an increase in the homogeneity of the microstructure, which is caused by a higher proportion of undissolved carbides, which have a nucleating effect on the formation of granular pearlite near the A_1 temperature. Based on the results of the study, some recommendations are given for selecting optimal heating temperatures and isothermal holding for heat treatment of products made of chromium-nickel-molybdenum steels.

Keywords: hot-deformed pipe, martensitic steel, heat treatment, hardness, microstructure, martensite, granular pearlite, isothermal annealing

For citation: Chubukov M.Yu., Guseva A.A., Myakotina I.V., Korotkova A.I. Investigation of the effect of heat treatment mode on the microstructure and hardness of pipes made of chrome-nickel-molybdenum steel with high-resistant austenite. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy.* 2026;26(1):20–26. (In Russ.) DOI: 10.14529/met260103

Введение

Легированные стали, подвергаемые закалке с отпуском, применяются для изготовления ответственных тяжело нагружаемых деталей машин. Наиболее часто в машиностроении данные изделия подвергаются закалке с высоким отпуском (улучшение). Такая термическая обработка при рационально выбранном составе стали обеспечивает наиболее высокую прочность деталей и изделий в сочетании с высокой пластичностью, вязкостью и малой склонностью к хрупким разрушениям [1–3].

Легированные элементы в улучшаемых конструкционных сталях, имея многоцелевое

назначение, прежде всего обеспечивают необходимую прокаливаемость изделия, которая определяется устойчивостью переохлажденного аустенита [1, 4–6]. Влияние легирующих элементов на кинетику перлитного превращения связано с тем, что они, замедляя диффузию, позволяют значительно увеличить степень переохлаждения аустенита, т. е. понизить температуру превращения $A-P$. Кроме того, они снижают не только скорость превращения, но и скорость образования карбидов [7, 8]. Легирование никелем наряду с содержанием карбидообразующих элементов (молибден, хром и ванадий) обеспечивает образование однородного мелкоигльчатого



Рис. 1. Микроструктура образца от труб из стали 38ХН3МФА в горячедеформированном состоянии, $\times 1000$
Fig. 1. Microstructure of a sample of 38KhN3MFA steel pipes in a hot-deformed state, $\times 1000$

мартенсита в микроструктуре бесшовных горячедеформированных труб с толщиной стенки до 36 мм при охлаждении в широком интервале скоростей, в том числе на спокойном воздухе без использования дополнительных охлаждающих сред (рис. 1). При этом распад по диффузионному механизму существенно затруднен [9–11].

Высокая твердость образующегося мартенсита (до 415 НВ в горячедеформированном состоянии) осложняет отделку и механическую обработку бесшовных труб из хромоникельмолибденовых сталей с высокоустойчивым аустенитом как полуфабрикатов для дальнейшего производства тяжелонагружаемых деталей. Данный факт делает необходимым проведение промежуточной термической обработки труб, основной целью которой является снижение твердости до значений, обеспечивающих их механическую обработку (в соответствии с НД на продукцию – не более 269 НВ).

В настоящей работе представлены результаты металлографического исследования хромоникельмолибденовой стали 38ХН3МФА при различных вариантах термической обработки, направленных на снижение ее твердости.

Материал и методы исследования

Материалами для исследования послужили образцы бесшовных труб, полученных методом горячей прокатки, из среднеуглеродистой хромоникельмолибденовой стали 38ХН3МФА с химическим составом в соответствии с ГОСТ 4543–2016 [12]. Образцы от горячедеформированных труб подвергались

термической обработке в лабораторных муфельных электропечах SNOL 6,7/1300.

Образцы размером $36 \times 30 \times 25$ мм подвергались нагреву до температуры 680°C при различных выдержках с последующим охлаждением на спокойном воздухе. Также был реализован нагрев образцов до температур 740 и 710°C продолжительностью 1,5 ч с изотермической выдержкой 6,5 и 11,5 ч при температуре 680°C . Охлаждение до температуры изотермической выдержки во всех случаях производилось со скоростью $20\text{--}35^\circ\text{C}/\text{мин}$ с помощью переноса в другую печь.

Для исследования микроструктурных составляющих применялся оптический микроскоп Zeiss Axiovert 40 MAT. Для травления образцов использовали 4%-ный раствор азотной кислоты в спирте.

Измерение твердости термообработанных образцов проводилось по методу Бринелля при нагрузке 3000 кгс шариком диаметром 10 мм согласно ГОСТ 9012–59 с использованием твердомера Affri LD3000.

Результаты, их анализ и обсуждение

Традиционным видом термической обработки для снижения твердости проката из сталей мартенситного класса является высокий отпуск («низкий отжиг») при температурах несколько ниже точки A_1 [1, 13–15]. С использованием экспериментальных данных было получено уравнение регрессии, описывающее влияние времени выдержки (τ) в процессе высокого отпуска трубных образцов из исследуемой стали на ее твердость (НВ):

$$\text{НВ} = 303,74 - 0,8442 \tau. \quad (1)$$

Оптимальный результат при данном варианте термообработки был достигнут в процессе выдержки продолжительностью 58 ч (табл. 1, опытный режим № 1). По результатам металлографического исследования установлено, что процессы распада мартенсита полностью завершены, микроструктура представлена однородным зернистым перлитом со сфероидизированными карбидами (рис. 2а).

Далее было рассмотрено влияние термической обработки по режиму изотермического отжига на сфероидизацию структуры стали мартенситного класса. Установлено, что нагрев до температуры выше точки A_1 с последующим регламентированным охлаждением и изотермической выдержкой при температуре 680 °С более эффективно снижает твердость образцов горячедеформированных труб. Так,

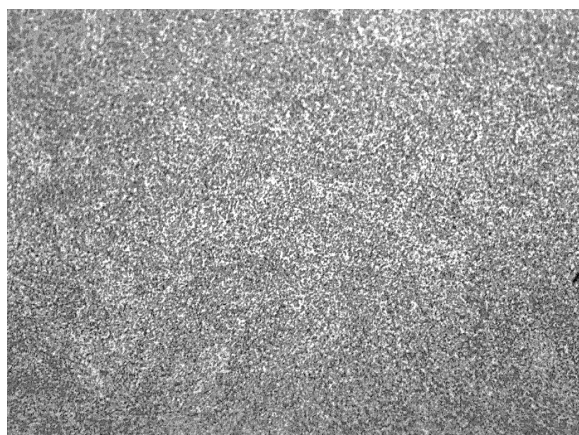
Таблица 1

Параметры отжига и твердость трубных образцов из стали 38ХН3МФА

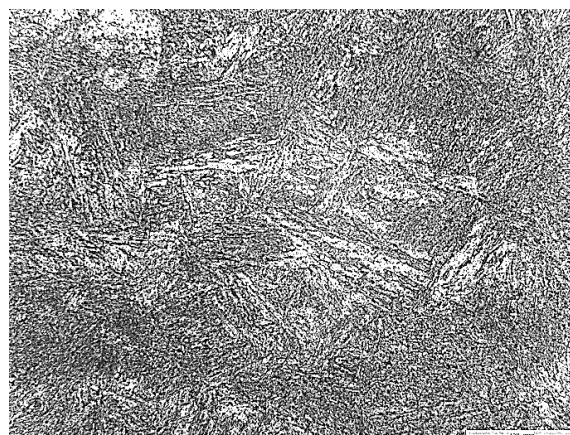
Table 1

Annealing parameters and hardness of pipe samples made of 38KhN3MFA steel

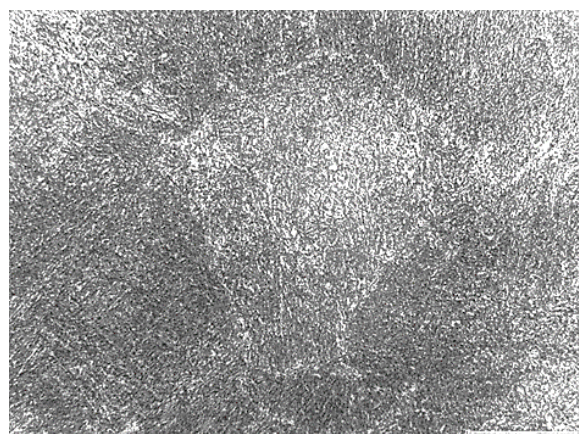
Номер опытного режима ТО	Параметры термической обработки					HV _{10/3000}		
	Первая ступень нагрева		Изотермическая выдержка		$\tau_{\text{общ}}, \text{ч}$	1	2	3
	$T_{\text{ст1}}, \text{°C}$	$\tau_{\text{ст1}}, \text{ч}$	$T_{\text{ст2}}, \text{°C}$	$\tau_{\text{ст2}}, \text{ч}$				
1	680	58	–	–	58	255	252	255
2	740	1,5	680	5	6,5	313	321	317
3	740	1,5	680	10	11,5	260	260	269
4	710	1,5	680	10	11,5	255	255	260



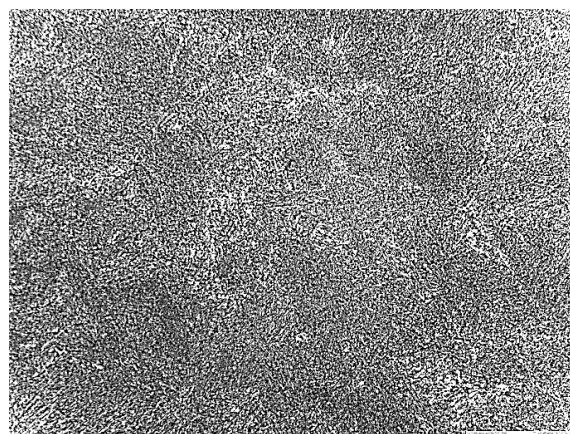
а)



б)



с)



д)

Рис. 2. Микроструктура образцов от труб из стали 38ХН3МФА после термической обработки:
а – режим № 1; б – режим № 2; с – режим № 3; д – режим № 4, $\times 500$

Fig. 2. Microstructure of samples from 38KhN3MFA steel pipes after heat treatment:
а – mode No. 1; б – mode No. 2; с – mode No. 3; д – mode No. 4, $\times 500$

по результатам проведения пятичасовой изотермической выдержки твердость снижается на 94–102 НВ (табл. 1, опытный режим № 2), а с увеличением выдержки до 10 ч – на 146–155 НВ и составляет 260–269 НВ (табл. 1, опытный режим № 3).

В микроструктуре стали после термообработки по режиму № 2 матрица представлена сфероидизированным перлитом, при этом сохраняется выраженная направленность карбидов вдоль рядов бывших мартенситных игл (рис. 2b).

Полученные изображения микроструктуры исследуемой стали после изотермического отжига общей продолжительностью 11,5 ч (опытный режим № 3) свидетельствуют о полном распаде в перлитной области с образованием зернистого перлита (рис. 2c).

Экспериментальные данные, полученные после изотермического отжига по режиму № 4, показали, что снижение температуры выдержки с 740 до 710 °С позволяет увеличить статистическую стабильность обеспечения твердости после термической обработки (табл. 1, опытный режим № 4). При прочих равных с режимом № 3 условиях термообработки корректировка температуры позволяет добиться большей однородности микроструктуры, что может быть объяснено более высокой долей нерастворившихся карбидов, оказывающих зародышевое влияние на образование

зернистого перлита вблизи температуры A_1 (рис. 2d).

Выводы

1. Проведены исследования влияния температурно-временных параметров высокого отпуска и изотермического отжига трубных образцов из среднеуглеродистой хромоникельмолибденовой стали мартенситного класса на их твердость и микроструктуру.

2. Определено, что оптимальным режимом термообработки, позволяющим снижать твердость исследованного материала до значений, обеспечивающих его механическую обработку, является изотермический отжиг при температуре 710 °С с последующим регламентированным переохлаждением и выдержкой вблизи A_1 (680 °С). Установлено, что в случае реализации данного способа ТО общее время отжига трубных образцов сокращается на 80 % относительно термообработки по режиму высокого отпуска при температуре выдержки ниже критической точки A_1 .

3. По результатам металлографических исследований определено, что микроструктура трубных образцов после изотермического отжига, а также высокого отпуска имеет вид зернистого перлита. При этом на ее однородность влияет не только время выдержки в подкритической области, но и температура нагрева выше критической точки A_1 .

Список литературы

1. Гольдштейн М.И., Грачев С.В., Векслер Ю.Г. Специальные стали: учеб. для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: МИСИС, 1999. 408 с.
2. Naylor J.P. The influence of the lath morphology on the yield stress and transition temperature of martensitic-bainitic steels // Metall. Trans. A. 1979. Vol. 10, no. 7. P. 861–873. DOI: 10.1007/BF02658305
3. Norstrom L.A. On the yield strength of quenched low-alloy lath martensite // Scandinavian Journal of Metallurgy. 1976. Vol. 5, no. 4. P. 159–165.
4. Металловедение в машиностроении: учеб. для бакалавров / А.М. Адашкин и [др.]. М.: Юрайт, 2013. 535 с. (Сер. Бакалавр. Углубленный курс).
5. Новиков И.И. Теория термической обработки металлов. 4-е изд. М.: Металлургия, 1986. 480 с.
6. Металловедение и термическая обработка стали: справочник. В 3 т. Т. 1: Методы испытаний и исследования / под ред. М.Л. Бернштейна и А.Г. Рахштадта. 3-е изд. перераб и доп. М.: Металлургия, 1983. 352 с.
7. Основы металловедения и технологии производства труб из коррозионно-стойких сталей / Д.А. Пумпянский, И.Ю. Пышминцев, А.В. Выдрин и др. М.: Металлургиздат, 2023. 681 с.
8. Легирование машиностроительной стали / Б.Б. Винокур, Б.Н. Бейнисович, А.Л. Геллер, М.Э. Натансон. М.: Металлургия, 1977. 199 с.
9. Harisha S.R., Sharma S.S., Kini U.A. Influence of spheroidizing heat treatment on mechanical properties of EN47 steel // Materials Science Forum. 2017. Vol. 880. P. 136–139.

10. Karadeniz E. Influence of different initial microstructure on the process of spheroidization in cold forging // *Materials and Design*. 2008. Vol. 29, iss. 1. P. 251–256. DOI: 10.1016/j.matdes.2006.11.015
11. Влияние циклической обработки на образование фрагментированной структуры в экономно-легированной мартенситной стали / Т.И. Табатчикова, И.Л. Яковлева, С.Ю. Дельгадо Рейна, А.И. Плохих // *Физика металлов и металловедение*. 2016. Т. 117, № 11. С. 1164–1170. DOI: 10.7868/S0015323016110139
12. ГОСТ 4543–2016. Металлопродукция из конструкционной и легированной стали. Технические условия: дата введения 01.11.2017. М.: Стандартинформ, 2019. 55 с.
13. Луценко В.А., Голубенко Т.Н., Луценко О.В. Особенности отжига легированных сталей со смешанной структурой // *Черные металлы*. 2021. № 4. С. 39–42. DOI: 10.17580/chm.2021.04.07
14. Лахтин Ю.М. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Metallurgia, 1983. 359 с.
15. Гуляев А.П. *Металловедение: учеб. для вузов*. 6-е изд., перераб. и доп. М.: Metallurgia, 1986. 544 с.

References

1. Goldstein M.I., Grachev S.V., Veksler Yu.G. *Spetsialnie stali: uchebnik dlya vuzov* [Special steels: Textbook for universities]. 2nd ed. Moscow: MISIS, 1999. 408 p. (In Russ.)
2. Naylor J.P. The influence of the lath morphology on the yield stress and transition temperature of martensitic-bainitic steels. *Metallurgical Transactions A*. 1979;10(7):861–873. DOI: 10.1007/BF02658305
3. Norstrom L.A. On the yield strength of quenched low-alloy lath martensite. *Scandinavian Journal of Metallurgy*. 1976;5(4):159–165.
4. Adaskin A.M. et al. *Materialovedenie v mashinostroenii: uchebnik dlya bakalavrov* [Material science in engineering: notebook for bachelors]. Moscow: Yurayt, 2013. 535 p. (In Russ.)
5. Novikov I.I. *Teoriya termicheskoy obrabotki metallov* [The theory of heat treatment of metals]. 4th ed. Moscow: Metallurgiya, 1986. 480 p. (In Russ.)
6. Bernshteyn M.L., Rakhshadt A.G. (Eds.) *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka stali: spravochnik. V 3 t. T. 1: Metody ispytaniy i issledovaniya* [Metallurgy and heat treatment of steel: Handbook. In 3 volumes. Vol. 1: Testing and research methods]. Moscow: Metallurgiya, 1983. 352 p. (In Russ.)
7. Pumpyanskiy D.A., Pyshmintsev I.Yu., Vydrin A.V. et al. *Osnovy metallovedeniya i tekhnologii proizvodstva trub iz korroziionno-stoykikh staley* [Fundamentals of Metal Science and Technology for the Production of Pipes from Corrosion-Resistant Steels]. Moscow: Metallurgizdat, 2023. 681 p. (In Russ.)
8. Vinokur B.B., Beynisovich B.N., Geller A.L., Natanson M.E. *Legirovanie mashinostroitel'noy stali* [Alloying of machine-building steel]. Moscow: Metallurgiya, 1977. 199 p. (In Russ.)
9. Harisha S.R., Sharma S.S., Kini U.A. Influence of spheroidizing heat treatment on mechanical properties of EN47 steel. *Materials Science Forum*. 2017;880:136–139.
10. Karadeniz E. Influence of different initial microstructure on the process of spheroidization in cold forging. *Materials and Design*. 2008;29(1):251–256. DOI: 10.1016/j.matdes.2006.11.015
11. Tabatchikova T.I., Yakovleva I.L., Delgado Reina S.Y., Plokhikh A.I. Effect of cyclic treatment on the formation of a fragmented structure in a sparingly alloyed martensitic steel. *Physics of Metals and Metallography*. 2016;117(11):1123–1128. DOI: 10.1134/S0031918X16110132
12. *GOST 4543–2016. Metalloproduksiya iz konstruksionnoy i legirovannoy stali. Tekhnicheskie usloviya* [State standard 4543–2016. Structural alloy steel production. Specifications]. Moscow: Standartinform Publ., 2016. 55 p. (In Russ.)
13. Lutsenko V.A., Golubenko T.N., Lutsenko O.V. Annealing features of alloyed steels with a mixed structure. *Chernye metally*. 2021;(4):39–42. (In Russ.) DOI: 10.17580/chm.2021.04.07
14. Lakhtin Yu.M. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metal science and heat treatment of metals]. Moscow: Metallurgiya, 1983. 359 p. (In Russ.)
15. Gulyaev A.P. *Metallovedenie: uchebnik dlya vtuzov* [Metal science: textbook for universities]. Moscow: Metallurgiya, 1986. 544 p. (In Russ.)

Информация об авторах

Чубуков Михаил Юрьевич, канд. техн. наук, начальник центральной заводской лаборатории, АО «Волжский трубный завод», Волжский, Россия; mikhail.chubukov@tmk-group.com.

Гусева Анна Александровна, ведущий инженер-технолог центральной заводской лаборатории, АО «Волжский трубный завод», Волжский, Россия; anna.guseva@tmk-group.com.

Мякотина Ирина Васильевна, заместитель начальника центральной заводской лаборатории, АО «Волжский трубный завод», Волжский, Россия; irina.myakotina@tmk-group.com.

Короткова Алена Ивановна, начальник лаборатории металлостроения и термообработки труб, АО «Волжский трубный завод», Волжский, Россия; alena.korotkova@tmk-group.com

Information about the authors

Michail Yu. Chubukov, Cand. Sci. (Eng.), Head of Central Plant Laboratory, JSC “Volzhsky Pipe Plant”, Volzhsky, Russia; mikhail.chubukov@tmk-group.com.

Anna A. Guseva, Lead Engineer of Central Plant Laboratory, JSC “Volzhsky Pipe Plant”, Volzhsky, Russia; anna.guseva@tmk-group.com.

Irina V. Myakotina, Deputy Head of the Central Plant Laboratory, JSC “Volzhsky Pipe Plant”, Volzhsky, Russia; irina.myakotina@tmk-group.com.

Alena I. Korotkova, Head of the Metallurgy and Heat Treatment Laboratory for Pipes, JSC “Volzhsky Pipe Plant”, Volzhsky, Russia; alena.korotkova@tmk-group.com.

Статья поступила в редакцию 20.10.2025

The article was submitted 20.10.2025