

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-2-98-119>



Закономерности изменения физико-механических и коррозионных свойств арматурной стали марки 23Х2Г2Т

С. Н. Кутепов¹ ✉

¹ Тульский государственный педагогический университет имени Л. Н. Толстого
пр. Ленина, д. 125, г. Тула 300026, Российская Федерация

✉ e-mail: kutepovsn@yandex.ru

Резюме

Целью работы являлось изучение закономерностей изменения физико-механических и коррозионных свойств арматурной стали 23Х2Г2Т в горячекатаном и термообработанном (печной отпуск) состояниях.

Методы. Исследование физико-механических свойств и стойкости (длительной коррозионной прочности) стержневой арматуры к коррозионному растрескиванию под напряжением проводили на опытных плавках стали марки 23Х2Г2Т. Выбор плавок производили с таким расчетом, чтобы их химический состав соответствовал, по возможности, верхнему, среднему и нижнему уровню марочного состава. Для создания условий эксперимента, максимально приближенных к эксплуатационным, испытания проводили в кипящем растворе нитратов (60% Ca(NO₃)₂ + 5% NH₄NO₃ + 35% H₂O) при температуре 110°С и рабочих напряжениях $\sigma_3 = (0, 1 \dots 0, 8)\sigma_B$. Для выяснения особенностей превращений, происходящих в стали при отпуске, снимали температурные зависимости внутреннего трения с образцов, отпущенных при различных температурах. Обработку результатов временной зависимости амплитудно-независимого внутреннего трения проводили по теории Гранато, Хикато, Люкке, которая описывает кинетику возврата внутреннего трения за счет миграции точечных дефектов к дислокациям.

Результаты. Установлено, что, контролируя химический состав и технологические режимы получения стали 23Х2Г2Т, можно не только резко повысить сопротивляемость стали растрескиванию, но и получить гарантированный комплекс механических и коррозионных свойств. Выявлено, что арматуру из стали 23Х2Г2Т следует выпускать с обязательным проведением отпуска. Наибольшую устойчивость против коррозионного растрескивания под напряжением при практически неизменной прочности для арматуры из стали 23Х2Г2Т обеспечивает 2-часовой отпуск в интервале температур 350...400°С.

Заключение. Полученные результаты могут быть использованы при установлении закономерностей поведения различной природы слитковых, порошковых и композиционных материалов с высокой дисперсностью в фазовых и структурных составляющих в различных условиях и состояниях.

Ключевые слова: арматурная сталь; механические свойства; длительная коррозионная прочность; печной отпуск; внутреннее трение; металлографические исследования.

Конфликт интересов: Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Кутепов С. Н. Закономерности изменения физико-механических и коррозионных свойств арматурной стали марки 23Х2Г2Т // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2023. Т. 13, № 2. С. 98–119. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-2-98-119>

Поступила в редакцию 21.03.2023

Подписана в печать 25.04.2023

Опубликована 30.05.2023

© Кутепов С. Н., 2023

Regularities of Changes in the Physico-Mechanical and Corrosion Properties of Reinforcement Steel Grade 23Kh2G2T

Sergey N. Kutepov¹ ✉

¹ Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University
125 Lenin Ave., Tula 300026, Russian Federation

✉ e-mail: kutepovsn@yandex.ru

Abstract

The purpose of the work was to study of the regularities of changes in the physico-mechanical and corrosion properties of reinforcing steel 23Kh2G2T in hot-rolled and heat-treated (furnace tempering) states.

Methods. The study of the physical and mechanical properties and resistance (long-term corrosion resistance) of bar reinforcement to stress corrosion cracking (SCC) was carried out on experimental melts of steel grade 23Kh2G2T. The choice of melts was made in such a way that their chemical composition corresponded, if possible, to the upper, middle and lower levels of the grade composition. To create experimental conditions as close as possible to operational ones, the tests were carried out in a boiling solution of nitrates (60% $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ + 5% NH_4NO_3 + 35% H_2O) at a temperature of 110°C and operating voltages $\sigma_e = (0, 1-0, 8) \sigma_B$. To elucidate the features of transformations occurring in steel during tempering, the temperature dependences of internal friction were taken from samples tempered at different temperatures. Processing of the results of the time dependence of the amplitude-independent internal friction was carried out according to the theory of Granato, Hikata, Lucke, which describes the kinetics of the return of internal friction due to the migration of point defects to dislocations.

Results. It has been established that by controlling the chemical composition and technological regimes for the production of steel 23Kh2G2T, it is possible not only to sharply increase its resistance to cracking, but also to obtain a guaranteed complex of mechanical and corrosion properties. It was revealed that reinforcement made of 23Kh2G2T steel should be produced with mandatory tempering. The greatest resistance to stress corrosion cracking with practically unchanged strength for reinforcement made of steel 23Kh2G2T is provided by 2-hour tempering in the temperature range of 350...400°C.

Conclusion. The results obtained can be used to establish patterns of behavior of various types of ingot, powder and composite materials with high dispersion in phase and structural components in various conditions and states.

Keywords: reinforcing steel; mechanical properties; corrosion resistance; furnace tempering; internal friction; metallographic studies.

Conflict of interest: The author declare no apparent or potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Kutepov S. N. Regularities of Changes in the Physico-Mechanical and Corrosion Properties of Reinforcement Steel Grade 23Kh2G2T. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies.* 2023; 13(2): 102–119. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-2-98-119>

Received 21.03.2023

Accepted 25.04.2023

Published 30.05.2023

Введение

Арматурная сталь является составной частью железобетона и на всех стадиях изготовления и эксплуатации железобетонных конструкций должна удовлетворять следующим основным требованиям [1]: иметь необходимые прочностные свойства, пластичность при кратковременных

и длительных нагрузках, а также в условиях повышенных и пониженных температур, коррозионных воздействий и т. д. Кроме того, необходимо сцепление арматурной стали с бетоном за счет соответствующего периодического профиля или специальных анкеров.

Одним из основных факторов, способствовавших зарождению железобетона, явилась способность цементного бетона защищать сталь от коррозии. Если арматура помогает бетону воспринимать усилия растяжения, которым он сопротивлялся слабо, то бетон, кроме основной роли воспринимать в конструкции сжимающие усилия, обеспечивает длительную сохранность стальной арматуры в условиях действия сред, вызывающих коррозию незащищенной стали и требующих специальной защиты стальных конструкций (в очень многих средах бетон стоек и не нуждается ни в какой защите, более того, влажные среды, агрессивные к стали, в основном благоприятны для бетона, способствуя длительным процессам его твердения).

Однако в практике использования железобетонных конструкций известны случаи [2–8], когда арматура подвергалась коррозионному поражению, вследствие которого происходило значительное разрушение конструкции. В качестве примеров коррозии арматуры железобетонных конструкций можно привести случаи разрушения железобетонного ребристого перекрытия цеха фабрики искусственного волокна (г. Тамбов) с высокой относительной влажностью воздуха [6]. После нескольких лет эксплуатации перекрытие получило повреждения в виде трещин и отколов защитного слоя бетона под влиянием корродирующей арматуры. Аналогичные разрушения железобетонных балок наблюдались в перекрытии цеха и световом фонаре красильно-отбельной фабрики (г. Тамбов); случай разрушения опор мостовых переходов железобетонного моста через р. Волгу [9]. Практически во всех случаях в местах обнаружения серьезных коррозионных повреждений стальной арматуры происходило длитель-

ное увлажнение железобетонных конструкций. Когда влага не подступала к поверхностям конструкций, даже при наличии дефектов бетона и малой толщины защитного слоя коррозия арматуры отсутствовала или была незначительной.

Наряду с возникновением процессов общей коррозии арматуры в напрягаемых железобетонных конструкциях, армируемых высокопрочной преднапряженной арматурой, может развиваться процесс коррозионного растрескивания, которое реализуется в виде трещин, развивающихся вплоть до разрыва перпендикулярно направлению главных растягивающих напряжений, если растяжение стержня сопровождается агрессивным воздействием среды [10]. При этом общее коррозионное поражение может быть незначительным, но наиболее часто местом зарождения трещины являются коррозионные язвы, т. е. они являются концентраторами напряжений. Следовательно, наиболее опасными будут условия, способствующие локализации коррозионных поражений высокопрочной арматуры, в частности образованию язв.

Особая опасность таких обрушений заключается в том, что они происходят внезапно, без каких-либо заметных внешних признаков (увеличенных прогибов, раскрытия трещин, отслоения защитного слоя бетона), которые бы предупреждали о возможности разрушения [10]. Этот вид разрушения во многих случаях приносит значительный материальный ущерб (в России затраты на ремонт и восстановление отдельных промышленных сооружений составляют примерно 20–25% их стоимости [11]) и может быть причиной серьезных аварий.

Склонность к коррозионному растрескиванию арматуры возрастает с повышением ее прочности, в особенности при термическом и термомеханическом

упрочнении, поскольку при этом резко возрастает метастабильность фаз, составляющих структуру металла. Особую опасность при этом вызывает водородное растрескивание арматуры железобетона, поскольку водород из стали полностью не удаляется, а, скапливаясь в коллекторах (пустотах), остается там [12]. В этих случаях металл после вылеживания выдерживает стандартные испытания, но может разрушиться при статических нагрузках, особенно в зонах со значительным градиентом температур. Этот эффект наиболее опасен для высокопрочной термоупрочненной арматуры, т. к. арматурный прокат классов А800 и А1000 является предварительно напрягаемым.

Таким образом, при разработке мероприятий, обеспечивающих повышение коррозионной стойкости и длительной прочности преднапрягаемых арматурных сталей, необходимо особенно тщательно подходить к выбору режимов их термического упрочнения.

Целью работы являлось изучение закономерностей изменения физико-меха-

нических и коррозионных свойств арматурной стали 23Х2Г2Т в горячекатаном и термообработанном (печной отпуск) состояниях.

Материалы и методы

Исследование физико-механических свойств и стойкости (длительной коррозионной прочности) стержневой арматуры к коррозионному растрескиванию под напряжением (КРН) проводили на опытных плавках стали марки 23Х2Г2Т. Химический состав и механические свойства приведены в таблицах 1 и 2. Механические свойства определяли по ГОСТ 12004-81 на универсальной испытательной машине Instron 5882. За среднее значение принимали результаты, полученные по испытаниям трех образцов. Выбор плавок производили с таким расчетом, чтобы их химический состав (в основном содержание углерода) соответствовал, по возможности, верхнему, среднему и нижнему уровню марочного состава согласно ГОСТ 5781-82.

Таблица 1. Химический состав исследованных плавок стали марки 23Х2Г2Т

Table 1. The chemical composition of the investigated melts of steel grade 23Kh2G2T

Номер плавки	Химический состав, мас. %								
	C	Mn	Si	Cr	Ti	Ni	S	P	Cu
1	0,22	1,36	0,56	1,31	0,08	–	0,018	0,026	–
2	0,23	1,35	0,59	1,44	0,15	0,10	0,024	0,031	0,10
3	0,25	1,35	0,53	1,57	0,06	–	0,028	0,033	–

Таблица 2. Механические свойства исследованных плавок стали марки 23Х2Г2Т

Table 2. Mechanical properties of the investigated melts of steel grade 23Kh2G2T

Номер плавки	Механические свойства				
	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	δ_P , %	HRC
1	1030	760	13,00	4,00	29
2	1085	840	11,50	5,00	34
3	1220	915	12,00	3,50	38

Исследование стойкости против КРН проводили на натуральных образцах ($l = 300$ мм; $\varnothing 12$ мм) стержневой арматуры периодического профиля в состоянии поставки (горячекатаном) и прошедших термическую обработку (печной отпуск). Продолжительность печного отпуска изменяли в интервале 2...24 часа. Рабочая часть образца составляла 100 мм. Стойкость стали против КРН оценивали временем до разрушения по результатам испытаний 4–6 образцов на каждую экспериментальную точку графика. Для создания условий эксперимента, максимально приближенных к эксплуатационным, испытания проводили в кипящем растворе нитратов (60% $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ + 5% NH_4NO_3 + 35% H_2O)

при температуре 110°C и рабочих напряжениях $\sigma_{\text{э}} = (0,1 \dots 0,8)\sigma_{\text{в}}$.

Дополнительно исследовали влияние углерода и хрома на механические свойства и стойкость к КРН арматурной стали 23Х2Г2Т, выплавленной в лабораторных условиях на 50 кг индукционной печи. С целью приближения состава лабораторных плавок к промышленным в сталь вводили фосфор и серу в виде феррофосфора и сернистого железа и раскисляли Al (0,5 кг на тонну) и Ti (0,5 кг на тонну). Содержание углерода и хрома изменяли в пределах марочного состава для стали 23Х2Г2Т согласно ГОСТ 5781-82. Химический состав и механические свойства приведены в таблице 3.

Таблица 3. Химический состав и механические свойства исследованных плавок стали марки 23Х2Г2Т

Table 3. Chemical composition and mechanical properties of the investigated melts of steel grade 23Kh2G2T

Номер плавки	Содержание элементов, %						Механические свойства					
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ti	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_{5d} , %	$\delta_{\text{Р}}$, %	HRC
1	0,17	0,40	1,60	0,009	0,011	1,30	0,5 кг на 1 т	1025	685	10,5	4,0	30
2	0,28	0,45	1,65	0,010	0,010	1,30		1210	835	15,0	4,5	37
3	0,18	0,42	1,70	0,011	0,011	1,80		1120	865	14,0	3,0	35
4	0,25	0,42	1,75	0,011	0,010	1,70		1610	1250	11,5	1,1	45

Для выяснения особенностей превращений, происходящих в стали при отпуске, снимали температурные зависимости внутреннего трения (ТЗВТ) с образцов, отпущенных при различных температурах по методике, изложенной в ГОСТ 25156-82.

Обработку результатов измерений временной зависимости амплитудно-независимого внутреннего трения (АНВТ) проводили по теории Гранато, Хикато, Люкке [13; 14], которая описывает кинетику возврата ВТ за счет миграции точечных дефектов к дислокациям. Из теории следует как изменение фона затухания δ_0 , так и амплитудно-зависимой части затухания $\delta_{\text{Н}}$:

$$\delta_0 = \frac{A_1}{(1 + \beta t^{2/3})^4}; \quad (1)$$

$$\delta_{\text{Н}} = A_2 \exp \left[-A_3 (C_1 + C_2) \cdot (1 + \beta^{2/3}) \right]; \quad (2)$$

где A_1, A_2, A_3 – величины, практически не изменяющиеся в процессе возврата; t – время возврата; C_1 – концентрация вакансий; C_2 – концентрация точечных дефектов; β – параметр возврата при данной температуре T ;

$$\beta = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \left(\frac{A_4 D}{T} \right)^{2/3}, \quad (3)$$

D – коэффициент диффузии дефектов, мигрирующих к дислокациям.

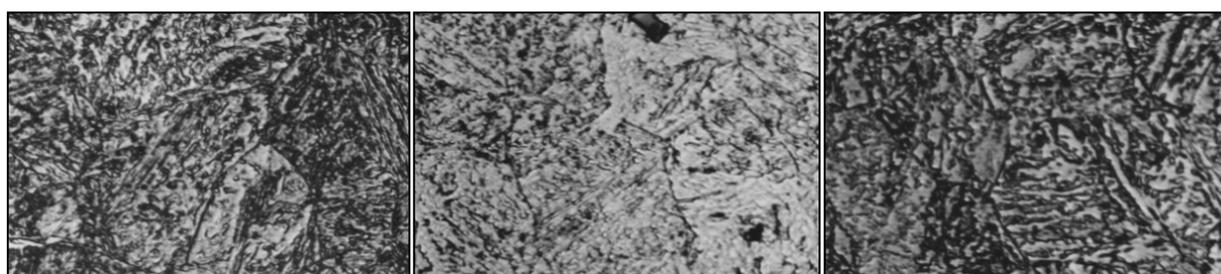
Результаты и их обсуждение

Влияние химического состава стали и температуры отпуска на физико-механические свойства и стойкость против коррозионного растрескивания

Результаты коррозионных испытаний и металлографических исследований стали марки 23Х2Г2Т в состоянии поставки приведены на рисунках 1 и 2.

Анализ результатов коррозионных испытаний стали марки 23Х2Г2Т в состо-

янии поставки (рис. 2) показал, что при изменении химического состава (в основном углерода, см. табл. 1) в пределах марочного резко изменяются механические и коррозионные свойства. Из анализа графических зависимостей следует, что наибольшей стойкостью против КРН обладает плавка № 1, а наименьшей – плавка № 2, что, вероятно, обусловлено высоким содержанием Ti, который в некоторых случаях стимулирует процессы межзеренного хрупкого разрушения [10].



а

б

в

Рис. 1. Микроструктура арматурной стали марки 23Х2Г2Т в исходном (горячекатаном) состоянии, $\times 1000$: а – плавка № 1; б – плавка № 2; в – плавка № 3

Fig. 1. Microstructure of reinforcing steel grade 23Kh2G2T in the initial (hot-rolled) state, $\times 1000$: а – melting No 1; б – melting No 2; в – melting No 3

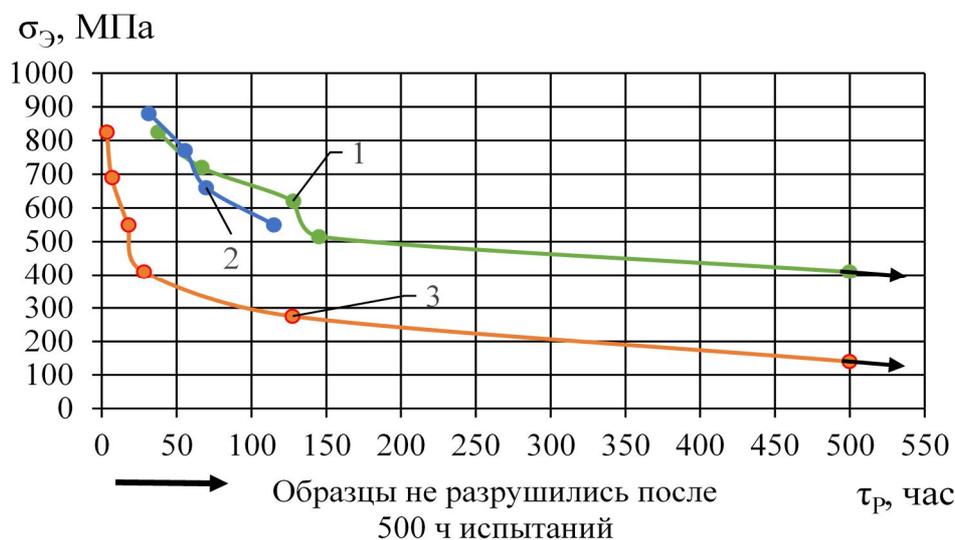


Рис. 2. Длительная коррозионная прочность стали марки 23Х2Г2Т в состоянии поставки в растворе нитратов (цифры 1; 2; 3 соответствуют номерам плавки)

Fig. 2. Long-term corrosion resistance of steel grade 23Kh2G2T in the state of delivery in a solution of nitrates (numbers 1; 2; 3 correspond to the numbers of melting)

На основе полученных результатов для дальнейших исследований влияния температуры и продолжительности отпуска на длительную коррозионную прочность стали была выбрана плавка № 2 со структурой бейнита. Натурные образцы стержневой арматуры подвергали двухчасовому печному отпуску в интервале температур 150...400°C с интервалом в 50°C.

Анализ изменения механических свойств стали марки 23Х2Г2Т (табл. 4) при указанных режимах отпуска показывает, что прочность и пластичность стали изменяются незначительно. Такой характер изменения механических свойств позволил проводить коррозионные испытания при одинаковых уровнях напряжений

(880; 770 и 660 МПа) и оценивать влияние температуры отпуска на стойкость против КРН практически у равнопрочных материалов.

Анализ коррозионных кривых (рис. 3) показывает, что стойкость стали марки 23Х2Г2Т к растрескиванию возрастает с увеличением температуры отпуска. Металлографические исследования разрушенных образцов показали, что макроскопические коррозионные трещины распространяются перпендикулярно оси действия растягивающих напряжений, а микроскопические – по границам зерен (рис. 4). При увеличении температуры отпуска заметно более сильное ветвление трещин.

Таблица 4. Механические свойства стали марки 23Х2Г2Т (плавка № 2) после отпуска при различных температурах

Table 4. Mechanical properties of steel grade 23Kh2G2T (melt No. 2) after tempering at different temperatures

Механические характеристики	Температура отпуска, °С					
	150	200	250	300	350	400
σ_B , МПа	1100	1100	1085	1080	1110	1115
$\sigma_{0,2}$, МПа	740	840	840	800	893	840
δ_{5d} , %	10,5	11,0	11,5	13,0	11,5	13,5
δ_P , %	8,0	5,0	5,0	4,0	6,0	6,5

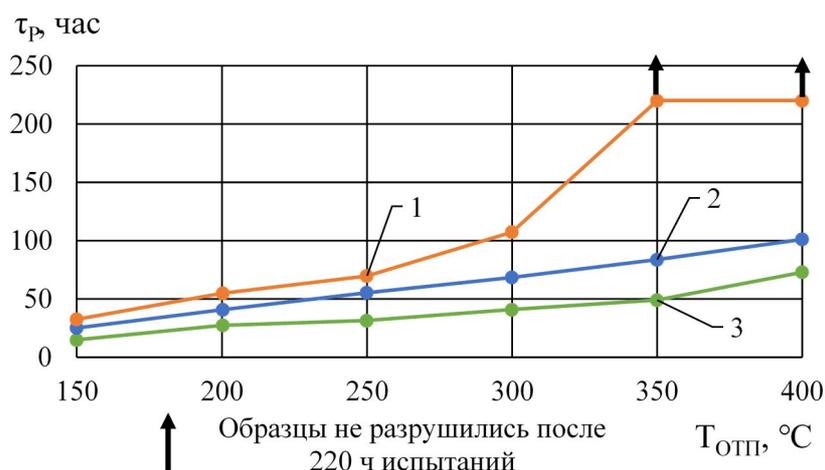


Рис. 3. Длительная коррозионная прочность стали марки 23Х2Г2Т (плавка № 2) после отпуска при различных температурах в растворе нитратов: 1 – при $\sigma_э = 660$ МПа; 2 – при $\sigma_э = 770$ МПа; 3 – при $\sigma_э = 880$ МПа

Fig. 3. Long-term corrosion resistance of steel grade 23Kh2G2T (melting No. 2) after tempering at various temperatures in a solution of nitrates: 1 – at $\sigma_e = 660$ МПа; 2 – at $\sigma_e = 770$ МПа; 3 – at $\sigma_e = 880$ МПа

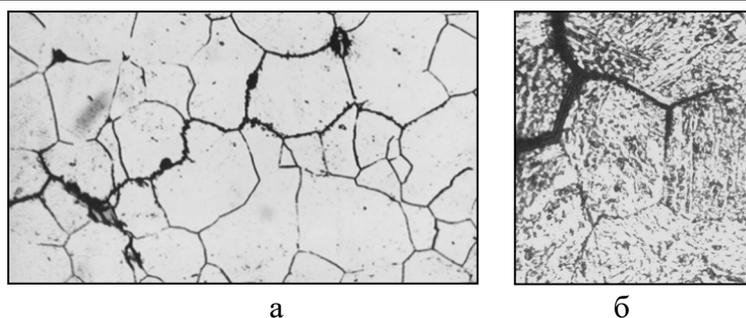


Рис. 4. Распространение коррозионных трещин в арматурной стали марки 23Х2Г2Т после испытания в кипящем растворе нитратов: а – $\times 600$; б – $\times 1000$

Fig. 4. Propagation of corrosion cracks in reinforcing steel grade 23Kh2G2T after testing in a boiling solution of nitrates: а – $\times 600$; б – $\times 1000$

Исследования ТЗВТ (рис. 5, а) показали, что в районе 350°C при частоте 870 Гц наблюдается сильно выраженный максимум, соответствующий 200-градусному пику при частоте ~ 1 Гц. С увеличением температуры отпуска наблюдали

значительное уменьшение высоты максимума и заметное его смещение в область более высоких температур. Наиболее резко выраженное уменьшение высоты пика наблюдается начиная с температуры отпуска 300°C (рис. 5, б).

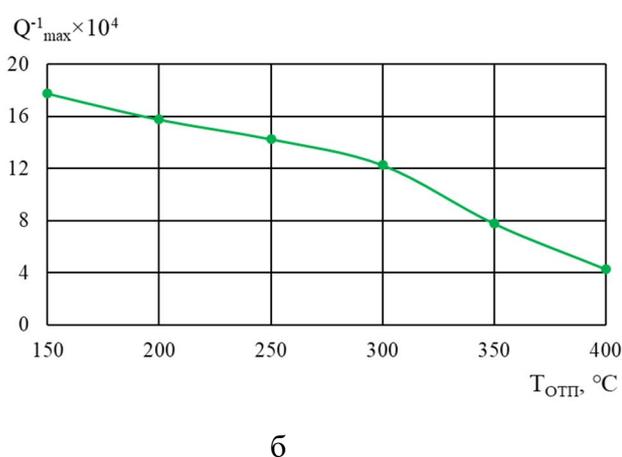
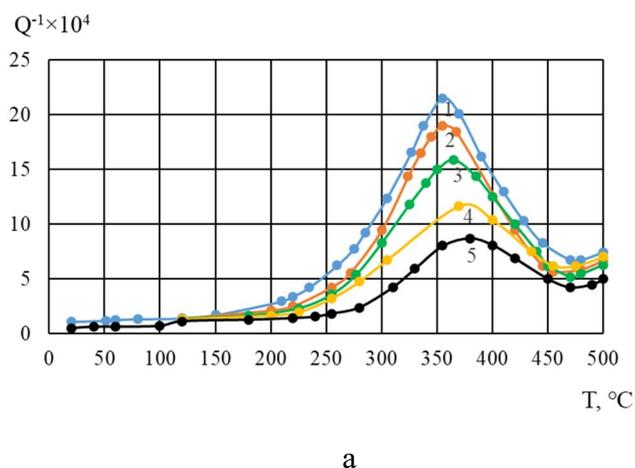


Рис. 5. Температурные зависимости внутреннего трения стали марки 23Х2Г2Т (плавка № 2) после отпуска при различных температурах (а) и зависимость высоты 200°C максимума внутреннего трения от температуры отпуска (б): 1 – отпуск при 150°C ; 2 – отпуск при 200°C ; 3 – отпуск при 300°C ; 4 – отпуск при 350°C ; 5 – отпуск при 400°C

Fig. 5. Temperature dependences of internal friction of steel grade 23Kh2G2T (melting No 2) after tempering at different temperatures (а) and the dependence of the height of 200°C of the maximum internal friction on the tempering temperature (б): 1 – tempering at 150°C ; 2 – tempering at 200°C ; 3 – tempering at 300°C ; 4 – tempering at 350°C ; 5 – tempering at 400°C

Полученные результаты находятся в хорошем соответствии с кривыми длительной коррозионной прочности (см. рис. 3), из анализа которых видно, что с увеличением температуры отпуска свыше

300°C чувствительность стали к растрескиванию резко уменьшается.

Влияние продолжительности отпуска на стойкость к КРН исследовали на образцах, изготовленных из плавки № 2 после отпуска при двух температурах – 300 и

450°C. Анализ изменения механических характеристик (табл. 5) показал, что в целом увеличение продолжительности отпуска в интервале 2...24 часа при темпе-

ратурах 300 и 450°C существенно не отражается на изменении пределов прочности и текучести, а пластичность стали возрастает пропорционально увеличению длительности отпуска.

Таблица 5. Механические свойства стали марки 23Х2Г2Т (плавка № 2) после отпуска при температурах 300 и 450°C

Table 5. Mechanical properties of steel grade 23Kh2G2T (melting No. 2) after tempering at temperatures of 300 and 450°C

Температура отпуска, °С	Механические характеристики	Продолжительность отпуска, час				
		2	4	8	16	24
300	σ_B , МПа	1080	1075	1080	1085	1085
	$\sigma_{0,2}$, МПа	840	850	850	855	865
	δ_5 %	13,0	13,0	13,5	14,5	16,0
450	σ_B , МПа	1010	1015	1010	1010	1010
	$\sigma_{0,2}$, МПа	780	785	770	765	765
	δ_5 %	18,5	18,0	19,0	21,0	23,0

Результаты коррозионных испытаний (рис. 6) показали, что длительная прочность сталей, подвергнутых отпуску при 450°C, ниже, чем у сталей, отпущенных при 300°C. Причем с уменьшением величины растягивающих напряжений и увеличением продолжительности отпуска эта разница существенно возрастает. На ТЗВТ

для образцов стали марки 23Х2Г2Т, отпущенной при 300 и 450°C в интервале 2...24 часа при частоте 870 Гц в районе 350°C, наблюдали сильно выраженный максимум (рис. 7), причем с увеличением длительности отпуска до 24 часов происходит значительное уменьшение высоты максимума.

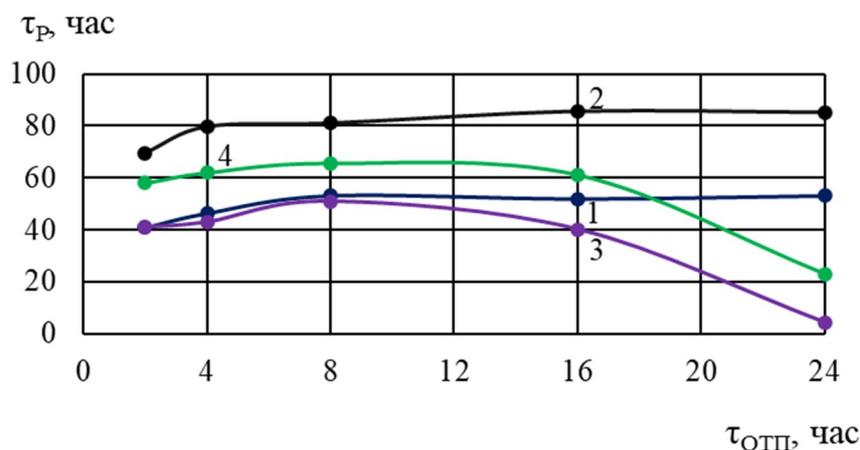


Рис. 6. Зависимость времени до разрушения стали марки 23Х2Г2Т от длительности отпуска:
1, 2 – отпуск при 300°C (1 – 0,7 σ_B ; 2 – 0,8 σ_B); 3, 4 – отпуск при 450°C (3 – 0,7 σ_B ; 4 – 0,8 σ_B)

Fig. 6. Dependence of the time to failure of steel grade 23Kh2G2T on the duration of tempering:
1, 2 – tempering at 300°C (1 – 0,7 σ_B ; 2 – 0,8 σ_B); 3, 4 – tempering at 450°C (3 – 0,7 σ_B ; 4 – 0,8 σ_B)

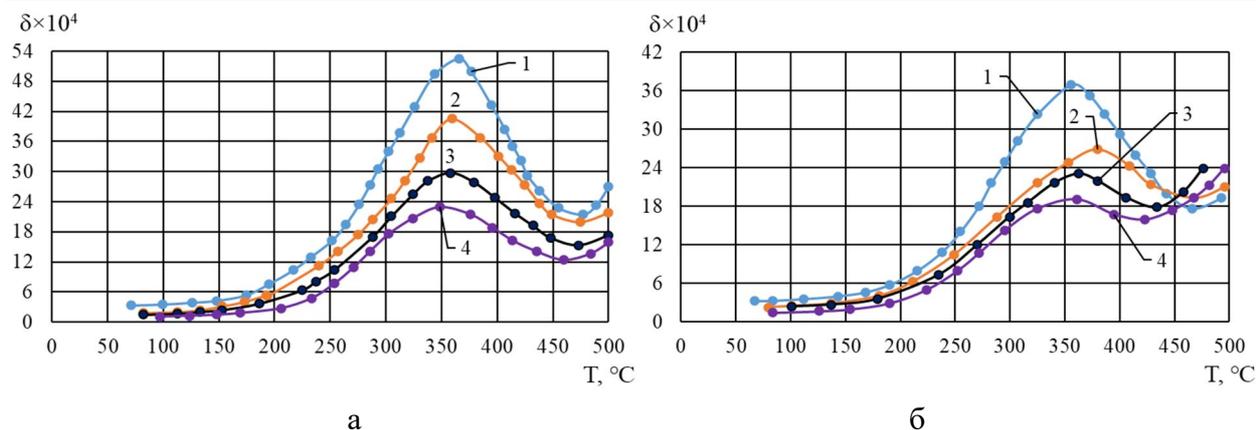


Рис. 7. Температурные зависимости внутреннего трения для стали марки 23Х2Г2Т после отпуска при 300°С (а) и 450°С (б) с различной выдержкой: 1 – 2 часа; 2 – 8 часов; 3 – 16 часов; 4 – 24 часа

Fig. 7. Temperature dependences of internal friction for steel grade 23Kh2G2T after tempering at 300°С (а) and 450°С (б) with different holding times: 1 – 2 hours; 2 – 8 hours; 3 – 16 hours; 4 – 24 hours

В случае отпуска при 300°С интенсивное уменьшение высоты максимума наблюдается во всем интервале исследованных времен отпуска (рис. 7, а). При температуре отпуска 450°С наиболее интенсивное уменьшение высоты максимума наблюдается при увеличении времени отпуска до 8 часов, а начиная с 16 часов высота максимума практически не меняется, т. е. увеличение продолжительности отпуска свыше 16 часов при данной температуре не влияет на высоту 200-градусного максимума.

Следует также отметить, что с увеличением продолжительности отпуска до 8 часов при данной температуре наблюдается смещение температурного положения максимума $\sim 20^{\circ}\text{C}$ в сторону высоких температур, а при дальнейшем увеличении времени выдержки до 24 часов – постепенный возврат температуры пика (см. рис. 7, б).

Из приведенных данных следует, что в случае отпуска в течение 24 часов при температуре 300°С не удается достичь равновесного состояния структуры, а в случае отпуска при температуре 450°С равновесное состояние наступает через 16 часов.

Тот факт, что прочность стали в исследуемом интервале времен отпуска практически не изменяется, приводит к выводу о том, что уменьшение высоты максимума на ТЗВТ и связанное с этим снижение чувствительности термоупрочненной стали к КРН обусловлено релаксацией остаточных напряжений и стабилизацией структуры стали. При этом, вероятно, основной вклад в снижение чувствительности стали к растрескиванию вносит релаксация пиковых микронапряжений у границ зерен и субзерен, а также перераспределение напряжений по объему зерен [15].

Однако релаксация остаточных микронапряжений не является единственным фактором, определяющим длительную коррозионную прочность стали марки 23Х2Г2Т после отпуска при 450°С. Из рисунка б видно, что длительная прочность в этих условиях падает, хотя параметры 300-градусного максимума (см. рис. 7, б и рис. 8) стабилизируются. В этих условиях можно ожидать влияния других структурных превращений: перестройки дислокационной структуры, перераспределения примесных атомов внедрения (С и N), стабилизации размеров выделившихся карбидных частиц.

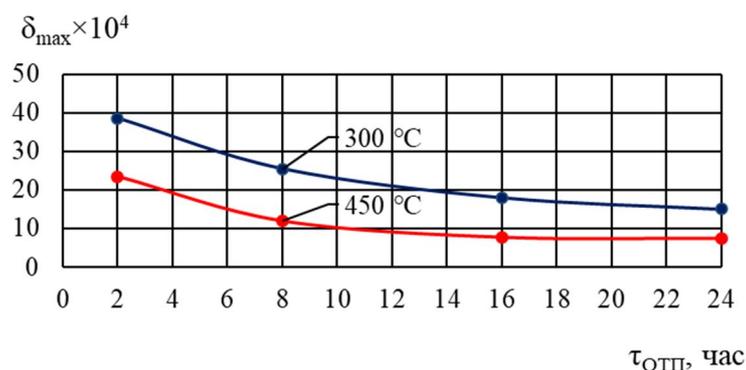


Рис. 8. Зависимость высоты пика Кестера от температуры и продолжительности отпуска для стали марки 23Х2Г2Т

Fig. 8. Dependence of the height of the Kester peak on temperature and duration of tempering for steel grade 23Kh2G2T

В работах авторов [15–17] показано, что при наличии примесей-конкурентов (С и N) взаимодействие водорода с дислокациями усложняется. Поскольку энергия связи углерода и азота с дислокациями больше, чем у водорода, подвижность которого в твердом растворе намного выше, многие авторы предполагают, что водород первым «оккупирует» свежие дислокации и дислокации, оторвавшиеся от углеродных и азотных атмосфер. Дальнейшее же движение дислокаций при пластической деформации осуществляется с легкоподвижными водородными атмосферами, что может привести к образованию локальных дислокационных скоплений [17].

С учетом повышения плотности дислокационных скоплений и других дефектов на границах зерен следует при определенных условиях ожидать преимущественной миграции примесей внедрения к границам зерен. Свободная энергия границы зерна в значительной мере зависит от таких факторов, как температура, давление, химический состав, а также является функцией кристаллической структуры границы: чем более совершенна упаковка атомов на границе и чем меньше она отличается от упаковки атомов в зерне, тем ниже значение этой энергии. Все про-

цессы, которые способствуют уменьшению свободной энергии (например, адсорбция примесных атомов), будут протекать спонтанно со скоростью, определяемой условиями диффузии, которая в этом случае будет контролироваться полем напряжений от дислокационных скоплений [18].

В случае отпуска исследуемой стали в течение 16 часов и более при 450°C реализуется, по-видимому, подобный случай. Примеси внедрения (С и N), выделившиеся на дислокациях, могут закреплять их и тем самым упрочнять материал [19]. Упрочнение стали, особенно в приграничных областях зерен, при приложении внешней нагрузки вызовет увеличение пиков напряжений на границах зерен и будет способствовать увеличению скорости растрескивания.

Подтверждением приведенных рассуждений может служить изменение микротвердости в области границ зерен для исследованной стали (рис. 9). С увеличением времени выдержки до 24 часов при 450°C наблюдается повышение микротвердости в области границ зерен. Причем наиболее существенное повышение микротвердости наблюдается с увеличением времени выдержки с 16 до 24 часов.

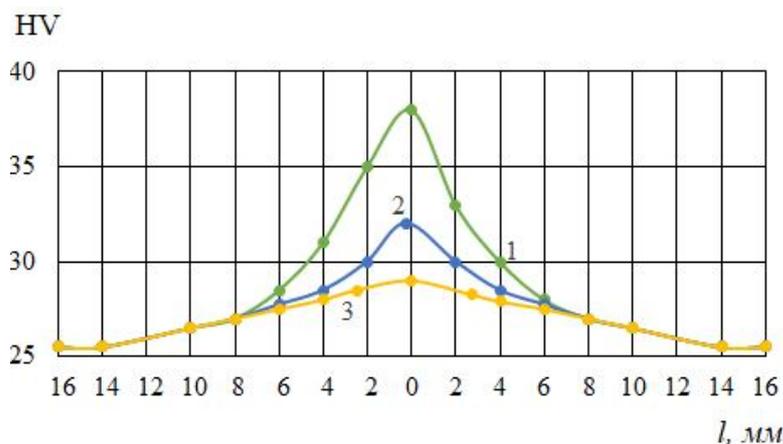


Рис. 9. Изменение микротвердости в области границ зерен для стали марки 23Х2Г2Т в зависимости от продолжительности отпуска при 450°C: 1 – отпуск в течение 24 часов; 2 – отпуск в течение 16 часов; 3 – отпуск в течение 8 часов; l – расстояние от поверхности при измерении микротвердости, мм

Fig. 9. Change in microhardness in the grain boundary region for steel grade 23Kh2G2T depending on the duration of tempering at 450°C: 1 – tempering for 24 hours; 2 – tempering for 16 hours; 3 – tempering for 8 hours; l is the distance from the surface when measuring microhardness, mm

Таким образом, из полученных данных следует, что снижение длительной коррозионной прочности стали марки 23Х2Г2Т при температуре отпуска 450°C и выдержке более 8 часов связано с перераспределением примесей внедрения (С и N) между дислокациями и границами зерен, что приводит к упрочнению приграничной области ферритной матрицы и появлению в поле внешней нагрузки больших пиков напряжений на границах зерен,

способствующих быстрому растрескиванию.

Для получения дополнительных данных о превращениях, протекающих в стали в интервале температур максимума (300...400°C), наблюдаемого на ТЗВТ, проводили измерение временной зависимости АНВТ. Результаты исследований представлены на рисунке 10. Обработку результатов проводили по методике, изложенной в настоящей работе.

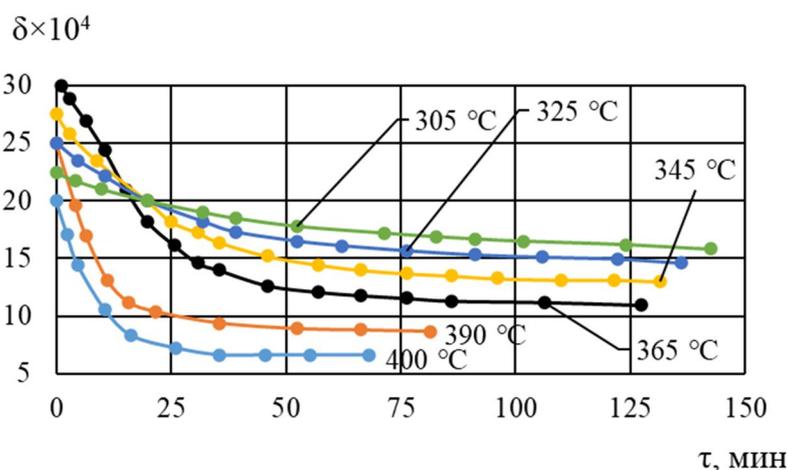


Рис. 10. Зависимости внутреннего трения от времени для стали марки 23Х2Г2Т

Fig. 10. Dependences of internal friction on time for steel grade 23Kh2G2T

Из уравнений (1)–(3) следует, что зависимости $\delta^{-1/4}-t^{2/3}$ и $\ln \delta_n-t^{2/3}$ при данной температуре возврата должны иметь линейный вид с тангенсами угла наклона равными β_1 и β_2 соответственно. При наличии температурной зависимости параметра возврата β согласно формуле (3) можно определить энергию активации

диффузии точечного дефекта в упругом поле дислокаций.

Используя временные зависимости ВТ, можно определить как стадийность процесса, так и тип дефекта, взаимодействующего с дислокациями. В настоящей работе использовали изменение фона затухания. Данные обработки временной зависимости δ_0 представлены на рисунке 11.

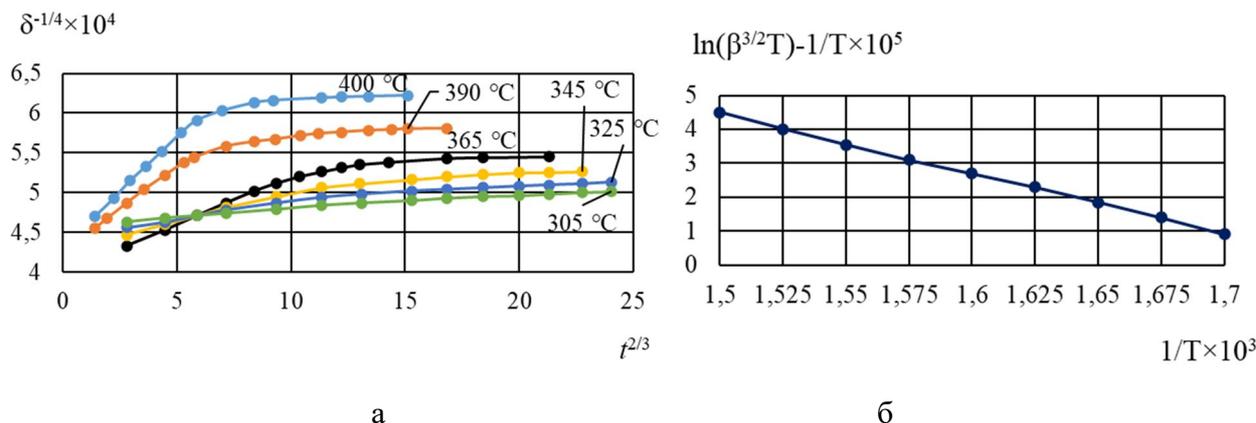


Рис. 11. Зависимости внутреннего трения от времени (а) и определение энергии активации процессов старения (б) для стали марки 23Х2Г2Т в координатах Гранато, Хикато, Люкке

Fig. 11. Dependences of internal friction on time (a) and determination of the activation energy of aging processes (b) for steel grade 23Kh2G2T in the coordinates of Granato, Hikata, Lucke

Из приведенных рисунков следует, что процесс возврата ВТ δ_0 при исследуемых температурах для стали марки 23Х2Г2Т имеет стадийный характер. Определение энергии активации начальной стадии процесса старения по углу наклона прямой в координатах $(\ln \beta^{3/2}T) - 1/T \cdot 10^5$ дало значение 30,5 ккал/моль. В соответствии с данными, представленными в работе [20], это указывает на то обстоятельство, что начальные стадии процесса возврата в исследуемой стали контролируются диффузией атомов внедрения (углерода) в поле дислокаций и взаимодействием с ними.

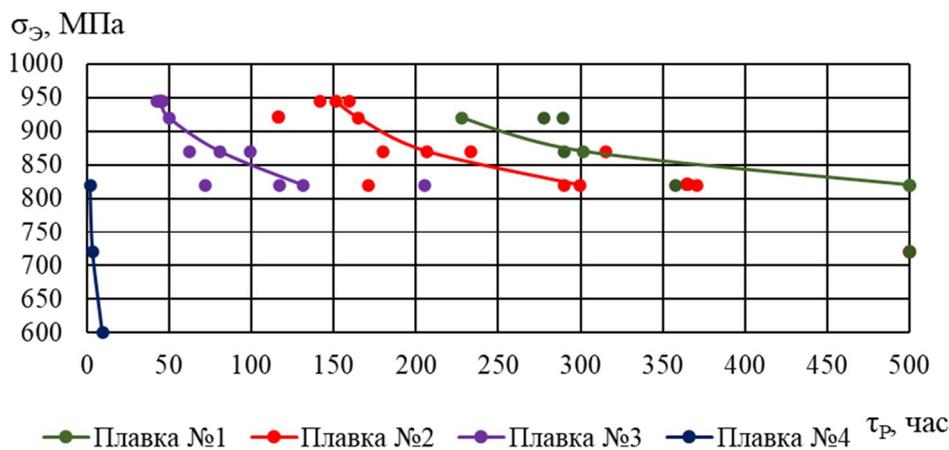
Полученные в работах [10; 15] данные об изменении высоты двухсотградусного пика на температурной зависимости внутреннего трения при отпуске стали марки 23Х2Г2Т в интервале температур

150...400 °С позволяют предполагать, что увеличение длительной коррозионной прочности стали марки 23Х2Г2Т к КРН при отпуске обусловлено протеканием релаксационных процессов. Кинетика релаксационного процесса связана с атомной перестройкой и контролируется диффузионной подвижностью атомов углерода (азота).

Для подтверждения полученных результатов были проведены дополнительные исследования, в которых изучали влияние С и Cr на механические свойства и стойкость к коррозионному растрескиванию арматурной стали марки 23Х2Г2Т, выплавленной в лабораторных условиях. Химический состав, механические и коррозионные свойства приведены в таблицах 3 и 6.

Таблица 6. Результаты коррозионных испытаний плавок стали марки 23Х2Г2Т**Table 6.** Results of corrosion tests of melts of steel grade 23Kh2G2T

Номер плавки	Время до разрушения (τ_p), ч, при напряжениях (σ_ε), МПа					
	600	720	820	870	920	945
1	–	500*	361,5	301,75	227,83	–
2	–	–	292,32	206,63	–	151,08
3	–	–	131,33	80,84	–	44,5
4	9,5	3,55	2,08	–	–	–

**Рис. 12.** Длительная коррозионная прочность в растворах нитратов стали марки 23Х2Г2Т с различным содержанием хрома и углерода**Fig. 12.** Long-term corrosion resistance in solutions of nitrates of steel grade 23Kh2G2T with different chromium and carbon content

Анализ результатов механических и коррозионно-механических испытаний (см. табл. 3 и 6, рис. 12) позволил установить, что увеличение содержания С в стали с 0,17 до 0,28% (плавки № 1, 2), существенно повышая прочность стали, одновременно снижает ее пластичность и стойкость к коррозионному растрескиванию.

Увеличение содержания Сг с 1,3 до 1,8% (плавки № 1 и 3) при поддержании С на нижнем пределе марочного состава способствует изменению свойств в том же направлении. При этом стойкость стали к коррозионному растрескиванию еще ниже, чем при увеличении содержания С. Наиболее ярко выраженное влияние на изменение свойств стали (повышение пре-

дела прочности и уменьшение длительной коррозионной прочности) оказывает одновременное увеличение содержания С и Сг до верхнего предела марочного состава (плавка № 4).

Металлографические исследования подтверждают характер межкристаллитного растрескивания, а также показывают, что при одновременном увеличении содержания С и Сг в стали наблюдается измельчение зерна от 4–5 балла (плавка № 1) до 8-го (плавка № 4) и увеличение количества карбидных частиц в объеме зерен (рис. 13). При переходе от плавки № 1 к плавке № 4 дисперсность частиц постепенно возрастает, а их распределение по объему становится более равномерным.

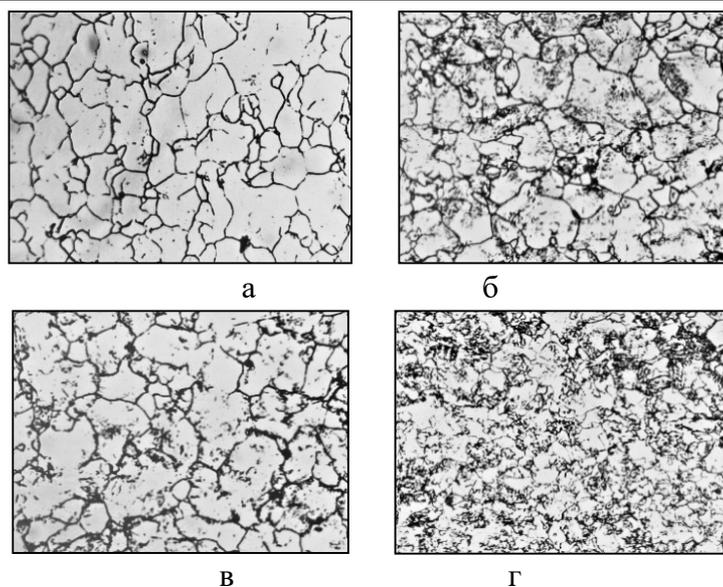


Рис. 13. Микроструктура плавков стали марки 23Х2Г2Т, $\times 400$ (а, б, в, г соответствуют номерам плавков, приведенным в таблице 3)

Fig. 13. The microstructure of the smelts of steel grade 23Kh2G2T, $\times 400$ (а, б, в, г correspond to the numbers of the smelts given in Table 3)

Для оценки распределения углерода между твердым раствором и карбидами при различных соотношениях (содержаниях) углерода и хрома исследовали температурную зависимость АНВТ. В качестве основного критерия оценки распределения углерода использовали деформационный максимум (пик Кестера), природа которого связана с наличием в α -железе атомов углерода и его взаимодействием с дислокациями.

На температурных зависимостях внутреннего трения при температуре 350...370°C наблюдали деформационные максимумы: для плавки № 1 – при 350°C; для плавки № 2 – при 370°C; для плавки № 3 – максимума не обнаружено (это обусловлено тем фактом, что в исследуемых образцах весь углерод связан в карбиды); для плавки № 4 – максимум проявляется при 370°C, причем его высота несколько меньше, чем для плавков № 1 и № 2 (рис. 14) из-за частичной связи углерода в карбиды. Обнаружено, что высота максимума для плавков № 1 и № 2 неодинакова. Анализ полученных результатов показал,

что полное связывание углерода в карбиды (плавка № 3) не только не снижает склонность к коррозионному растрескиванию, но даже повышает ее.

С целью выяснения механизма КРН исследуемой стали и проверки взаимосвязи между прочностью и склонностью к КРН проводили испытания образцов всех плавков после отпуска при различных температурах на равную прочность ($\sigma_B = 1010$ МПа и $\sigma_{0,2} = 770$ МПа).

После отпуска на равную прочность фон внутреннего трения значительно изменился (рис. 15). Для всех исследуемых плавков (за исключением плавки № 1) деформационный максимум не наблюдается, что свидетельствует об уходе атомов углерода из позиций внедрения. В высоколегированной стали пик при 350°C является мерой релаксации остаточных напряжений [10]. За время отпуска, вероятно, избыточный углерод успевает перераспределиться между карбидами и дислокациями в соответствии с температурно-временными условиями, и пики остаточных напряжений сглаживаются [10; 21].

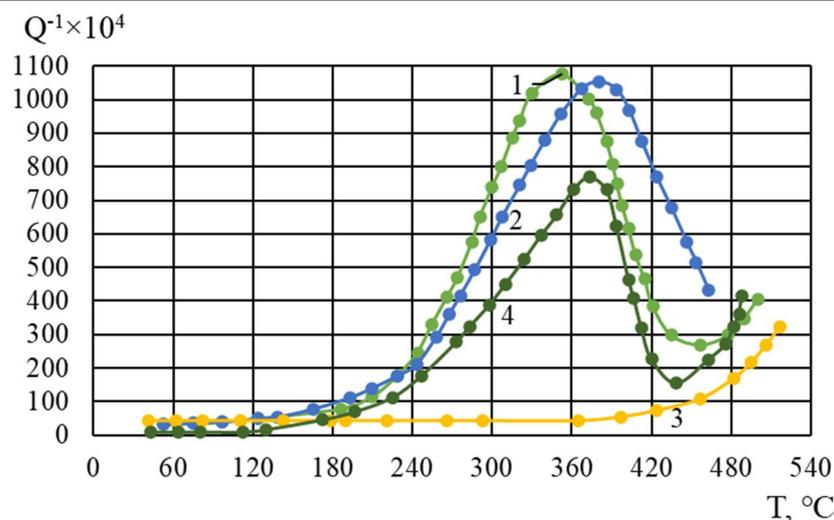


Рис. 14. Температурные зависимости внутреннего трения стали марки 23X2Г2Т после прокатки и 2-часового отпуска при температуре 250°C

Fig. 14. Temperature dependences of internal friction of steel grade 23Kh2G2T after rolling and 2-hour tempering at a temperature of 250°C

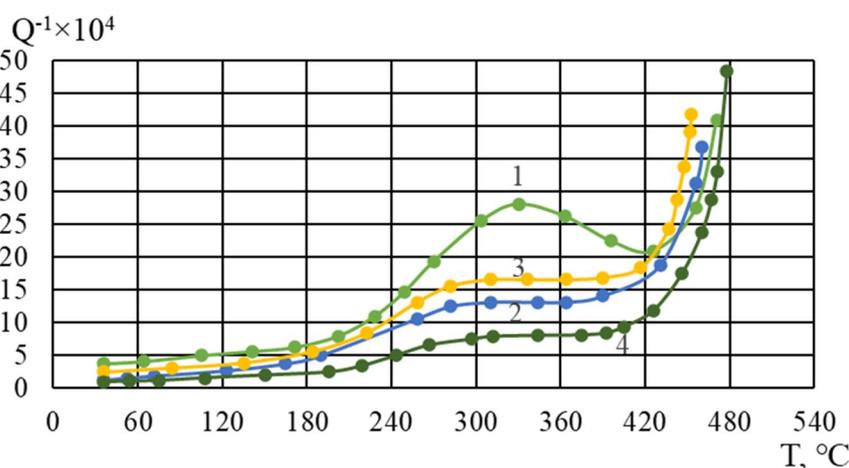


Рис. 15. Температурные зависимости внутреннего трения для плавок стали марки 23X2Г2Т с различным содержанием углерода и хрома после отпуска на равную прочность ($\sigma_B = 1010$ МПа и $\sigma_{0,2} = 770$ МПа). Цифры на кривых соответствуют номерам плавок

Fig. 15. Temperature dependences of internal friction for melting steel grade 23Kh2G2T with different carbon and chromium content after tempering for equal strength ($\sigma_B = 1010$ MPa and $\sigma_{0,2} = 770$ MPa). The numbers on the curves correspond to the numbers of the melts

Из полученных данных следует, что для сложнлегированной стали кинетика КРН связана с релаксацией напряжений на границах зерен, вызванной перераспределением атомов углерода в поле напряжений, о чем, в частности, свидетельствует уменьшение (рис. 15, плавка № 4) и исчезновение при отпуске (250°C – 2 часа)

200-градусного пика ВТ (рис. 15, плавка № 3).

Наличие в стали не связанных с дислокациями атомов внедрения, как и незакрепленных дислокаций, являются непрерывным условием релаксации напряжений, а следовательно, и увеличения ее стойкости против коррозионного растрескивания. Это объясняется прежде всего

уменьшением пиков остаточных напряжений на границах зерен, способных суммироваться с внешними приложенными напряжениями, что, в свою очередь, способствует снижению скорости зарождения и распространения коррозионных трещин. Указанный механизм неприменим при связывании углерода в карбиды и их выделении (плавка № 3). В рассматриваемом случае повышенная скорость коррозионного растрескивания обусловлена, вероятно, высокой хрупкостью стали, проявляющейся в результате выделения хрупкой карбидной составляющей по границам зерен [21; 22].

Таким образом, на основании проведенных исследований можно утверждать, что увеличение содержания углерода и хрома в стали марки 23Х2Г2Т до верхнего предела марочного химического состава при сложившейся технологии производства, повышая прочность стали, резко снижает ее стойкость против КРН. Из полученных данных также следует и то, что, контролируя химический состав (и прежде всего содержание углерода и хрома) и технологические режимы получения, можно не только резко повысить сопротивляемость стали марки 23Х2Г2Т растрескиванию, но и получить гарантированный комплекс высоких эксплуатационных характеристик – механических и коррозионных.

Влияние примесей внедрения и остаточных напряжений на механизм коррозионного растрескивания

Межкристаллитное распространение коррозионных трещин (см. рис. 4) в исследованной арматурной стали марки 23Х2Г2Т, а также резкое снижение ДКП при выделении примесей внедрения по границам зерен хорошо согласуются с сегрегационными представлениями об электрохимической природе КРН в растворах нитратов.

Согласно этим представлениям необходимым условием для растрескивания

являются сегрегации примесей внедрения (С, N) по границам ферритной матрицы. Отсутствие их, как показано Лонгом и Локингом, делает растрескивание невозможным. Троманс и Наттинг на примере медных сплавов показали, что сегрегации примесных атомов на дислокациях повышают химическую активность зон и являются необходимым условием для коррозионного растрескивания (чистая медь даже при большой локальной концентрации дислокацией не растрескивается в отсутствие сегрегации на них примесей). Подобная ситуация реализуется и для железоуглеродистых сплавов, особенно если учесть, что чистое железо не растрескивается в нитратных растворах. По-видимому, наличие примесей (С и N) на границах зерен является необходимым условием для возникновения коррозионного процесса, а его скорость определяется напряженным состоянием, способностью структуры к релаксации напряжений и концентрацией агрессивной среды. Механизм влияния остаточных напряжений при этом заключается, очевидно, в образовании на границах зерен больших локальных пиков напряжений, которые при наложении внешней нагрузки ускоряют распространения трещин как за счет активирования коррозионного процесса, так и за счет чисто механического воздействия на структуру.

Влияние остаточных напряжений на стойкость высокопрочных сталей к КРН ранее было подтверждено Ф. Ф. Ажогиным [23]. Эти данные и результаты, полученные в настоящей работе, показывают, что высокий уровень напряжений в структуре стали, достигнутый предшествующей обработкой (термической, термомеханической и др.), является стимулом КРН. Поэтому все факторы, способствующие релаксации остаточных напряжений (наличие свободных атомов внедрения и незакрепленных дислокаций и вакансий, обладающих повышенной диффузионной

подвижностью), а также все факторы (термическая обработка, легирование и пр.), препятствующие прежде выделению примесей и, прежде всего, примесей внедрения (С, N) по границам зерен, способствуют повышению высокопрочных арматурных сталей против растрескивания. С этих позиций более однородные и равновесные перлитные и бейнитные структуры являются более перспективными для получения комплекса высоких эксплуатационных свойств – механических и коррозионных, а отпуск сталей следует рассматривать как необходимую операцию с целью стабилизации структуры против КРН.

Механизм влияния примесных атомов и, в особенности, примесей внедрения и их распространения по объему зерен заключается, очевидно, в их влиянии прежде всего на механические свойства сплава и его релаксационную способность. Диффузионная подвижность атомов внедрения и их взаимодействие с дислокациями определяют релаксационную способность сплава и, следовательно, должны влиять на процесс растрескивания. Закрепление дислокаций примесными атомами, особенно в области границ зерен, может привести к упрочнению сплава в этих местах и, как следствие этого, к увеличению пиков напряжений на границах зерен от внешней нагрузки, что ускоряет процесс растрескивания. Таким образом, для высокопрочных арматурных сталей повышенную устойчивость против КРН будет обеспечивать такой состав и условия термической обработки, в результате которых примеси внедрения (С и N) будут удерживаться преимущественно в объеме зерен, а структура стали будет отличаться однородностью и повышенной способностью к релаксации напряжений. Для исследованной арматурной стали марки 23Х2Г2Т такой структурой будет структура однородного бейнита.

Полученные результаты могут быть использованы при установлении закономерностей поведения слитковых, порошковых и композиционных материалов различной природы с высокой дисперсностью фазовых и структурных составляющих в различных условиях и состояниях [10; 15; 16; 21].

Выводы

1. Установлено, что, контролируя химический состав (и прежде всего содержание углерода и хрома) и технологические режимы получения стали 23Х2Г2Т, можно не только резко повысить ее сопротивляемость растрескиванию, но и получить гарантированный комплекс высоких эксплуатационных свойств – механических и коррозионных.

2. Выявлено, что арматуру из стали 23Х2Г2Т следует выпускать с обязательным проведением отпуска. Наибольшую устойчивость против КРН при практически неизменной прочности для арматуры из стали 23Х2Г2Т обеспечивает 2-часовой отпуск в интервале температур 350...400°С.

3. Полученные данные об изменении высоты 200° пика на ТЗВТ при отпуске исследуемой стали в интервале температур 150...400°С позволяют предполагать, что снижение чувствительности стали 23Х2Г2Т к КРН при отпуске обусловлено протеканием релаксационных процессов.

4. Проведенные исследования показывают, что влияние микроструктуры и термической обработки на чувствительность арматурной стали 23Х2Г2Т к коррозионному растрескиванию под напряжением в растворах нитратов сводится к изменению уровня и распределения остаточных напряжений в структуре стали и особенностям распределения примесей внедрения (С и N) по объему зерен.

5. Показано, что факторы, способствующие релаксации остаточных напря-

жений (наличие свободных атомов внедрения, незакрепленных дислокаций, вакансий и других дефектов кристаллического строения, обладающих повышенной

диффузионной подвижностью) способствуют повышению устойчивости высокопрочных сталей против коррозионного растрескивания под напряжением.

Список литературы

1. Высокопрочная арматурная сталь / А. А. Кугушин, И. Г. Узлов, В. В. Калмыков, С. А. Мадатян, И. В. Ивченко. М.: Metallurgy, 1986. 272 с.
2. Аксенов С. Е., Никитин А. В., Заручевных А. В. Эксплуатация железобетонных конструкций на целлюлозно-бумажных комбинатах // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. 2015. № 2. С. 161–173.
3. Опыт обследования железобетонных конструкций, эксплуатируемых в агрессивной среде / А. В. Вешняков, А. В. Заручевных, С. Е. Аксенов, А. В. Никитин // Проблемы современного бетона и железобетона: сборник трудов: 2 ч. Ч. 1. Бетонные и железобетонные конструкции / под ред. М. Ф. Марковского. Минск: Стринко, 2007. С. 130–140.
4. Гедвилло И. А., Жмакина А. С. Коррозия стальной арматуры на ранних стадиях твердения бетона // Коррозия: материалы, защита. 2014. № 5. С. 19–24.
5. Дронов А. В. Особенности развития питтинговой коррозии стальной арматуры железобетонных изгибаемых элементов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. 2017. № 3. С. 32–36.
6. Леденев В. В., Скрылев В. И. Аварии, разрушения и повреждения. Причины, последствия и предупреждения: монография. Тамбов: ТГТУ, 2017. 440 с.
7. Мусин В. Г. Поведение железобетонных конструкций, подверженных коррозионному разрушению, в условиях высоких температур // Пожаровзрывобезопасность. 2003. № 3. С. 22–26.
8. Экспертиза промышленной безопасности здания цеха ВЖС Шебекинского химического завода с целью оценки технического состояния конструкций / И. Р. Серых, Е. В. Чернышева, А. Н. Дегтярь, Е. С. Черноситова, А. С. Чернышева // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. 2018. № 9. С. 55–61.
9. Овчинникова Т. С., Маринин А. Н., Овчинников И. Г. Коррозия и антикоррозионная защита железобетонных мостовых конструкций // Наукоедение. 2014. № 5 (24). С. 1–25.
10. Извольский В. В., Сергеев Н. Н. Коррозионное растрескивание и водородное охрупчивание арматурных сталей железобетона повышенной и высокой прочности. Тула: Изд-во ТГПУ им. Л. Н. Толстого, 2001. 163 с.
11. Шилин А. А. Эффективность ремонта железобетонных конструкций инженерных сооружений // Проблемы долговечности зданий и сооружений в современном строительстве. СПб.: РИФ «Роза мира», 2007. С. 29–34.
12. О природе разрушений высокопрочной термически упрочненной арматурной стали / Б. А. Кустов, Н. В. Пушница, Е. Д. Демченко, А. Г. Клепиков, И. Л. Федорова // Сталь. 1994. № 6. С. 69–74.
13. Granato A., Nikata A., Lucke K. Recovery of damping and modulus changes following plastic deformation? // Acta Metall. 1958. Vol. 6. P. 470–480.
14. Метод внутреннего трения в металловедческих исследованиях / М. С. Блантер, Ю. В. Пигузов, Г. М. Ашмарин [и др.]. М.: Metallurgy, 1991. 248 с.

15. Влияние условий отпуска на механические и коррозионные свойства стали 23Х2Г2Т / Н. Н. Сергеев, В. В. Извольский, А. Н. Сергеев, С. Н. Кутепов, А. Е. Гвоздев // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П. А. Соловьева. 2018. № 2(45). С. 128–135.

16. Влияние химического состава стали 23Х2Г2Т на механические и коррозионные свойства / Н. Н. Сергеев, В. В. Извольский, А. Н. Сергеев, С. Н. Кутепов, А. Е. Гвоздев // Деформация и разрушение материалов и наноматериалов: сборник материалов VIII Международной конференции. М.: ИМЕТ РАН, 2019. С. 579–581.

17. Шаповалов В. И. Легирование водородом. Днепропетровск: Журфонд, 2013. 385 с.

18. Грабский М. В. Структура границ зерен в металлах: [пер. с польского]. М.: Металлургия, 1972. 160 с.

19. Cottrell A. H. Dislocations and plastic flow in crystals. Oxford: Oxford University Press, New York, 1953. 223 p.

20. Криштал М. А., Извольский В. В. Влияние температуры отпуска на стойкость стали 23Х2Г2Т против коррозионного растрескивания // Физико-химическая механика материалов. 1972. Т. 8, № 2. С. 13–15.

21. Сергеев Н. Н., Сергеев А. Н. Механические свойства и внутреннее трение высокопрочных сталей в коррозионных средах: монография. Тула: Изд-во ТулГУ, 2018. 430 с.

22. Влияние химического состава стали 23Х2Г2Т на стойкость против коррозионного растрескивания / Н. Н. Сергеев, В. В. Извольский, А. Н. Сергеев, С. Н. Кутепов, А. Е. Гвоздев, А. Н. Чуканов, О. В. Пантюхин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. Вып. 9. С. 409–420.

23. Ажогин Ф. Ф. Коррозионное растрескивание и защита высокопрочных сталей. М.: Металлургия, 1974. 256 с.

References

1. Kugushin A. A., Uzov I. G., Kalmykov V. V., Madatyan S. A., Ivchenko I. V. *Vysokoprochnaya armaturnaya stal'* [High-strength reinforcing steel]. Moscow, Metallurgy Publ., 1986. 272 p.

2. Aksenov S. E., Nikitin A. V., Zaruchevnykh A. V. *Ekspluatatsiya zhelezobetonnykh konstruksii na tsellyulozno-bumazhnykh kombinatakh* [Exploitation of reinforced concrete structures at pulp and paper mills]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura = Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Construction and architecture*, 2015, no. 2, pp. 161–173.

3. Veshnyakov A. V., Zaruchevnykh A. V., Aksenov S. E., Nikitin A. V. [Experience of inspection of reinforced concrete structures operated in an aggressive environment]. *Problemy sovremennogo betona i zhelezobetona. Sbornik trudov. Ch. 1. Betonnye i zhelezobetonnye konstruksii* [Problems of modern concrete and reinforced concrete. Collection of works. Pt. 1. Concrete and reinforced concrete structures]; ed. by M. F. Markovsky. Minsk, Strinko Publ., 2007, pp. 130–140. (In Russ.)

4. Gedvillo I. A., Zhmakina A. S. *Korroziya stal'noi armatury na rannikh stadiyakh tverdeniya betona* [Corrosion of steel reinforcement at the early stages of concrete hardening]. *Korroziya: materialy, zashchita = Corrosion: materials, protection*, 2014, no. 5, pp. 19–24.

5. Dronov A. V. *Osobennosti razvitiya pittingovoi korrozii stal'noi armatury zhelezobetonnykh izgibaemykh elementov* [Features of the development of pitting corrosion of steel reinforcement of reinforced concrete bendable elements]. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo*

tehnologicheskogo universiteta im. V. G. Shukhova = Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, 2017, no. 3, pp. 32–36.

6. Ledenev V. V., Skrylev V. I. Avarii, razrusheniya i povrezhdeniya. Prichiny, posledstviya i preduprezhdeniya [Accidents, destruction and damage. Causes, consequences and warnings]. Tambov, TSTU Publ., 2017. 440 p.

7. Musin V. G. Povedenie zhelezobetonnykh konstruksii, podverzhennykh korrozionnomu razrusheniyu, v usloviyakh vysokikh temperatur [Behavior of reinforced concrete structures subject to corrosion destruction at high temperatures]. *Pozharovzryvobezopasnost' = Fire and explosion safety*, 2003, no. 3, pp. 22–26.

8. Serykh I. R., Chernysheva E. V., Degtyar A. N., Chernositova E. S., Chernysheva A. S. Ekspertiza promyshlennoi bezopasnosti zdaniya tsekha VZhS Shebekinskogo khimicheskogo zavoda s tsel'yu otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya konstruksii [Examination of industrial safety of the building of the VZhS workshop of the Shebekinsky Chemical Plant in order to assess the technical condition of structures]. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V. G. Shukhova = Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov*, 2018, no. 9, pp. 55–61.

9. Ovchinnikova T. S., Marinin A. N., Ovchinnikov I. G. Korroziya i antikorroziyannaya zashchita zhelezobetonnykh mostovykh konstruksii [Corrosion and anticorrosive protection of reinforced concrete bridge structures]. *Naukovedenie = Science studies*, 2014, no. 5 (24), pp. 1–25.

10. Izvolskij V. V., Sergeev N. N. Korrozionnoe rastreskivanie i vodorodnoe okhrupchivanie armaturnykh staley zhelezobetona povyshennoi i vysokoi prochnosti [Corrosion cracking and hydrogen embrittlement of reinforced concrete reinforcing steels of increased and high strength]. Tula, TSPU named after L. N. Tolstoy Publ., 2001. 163 p.

11. Shilin A. A. Effektivnost' remonta zhelezobetonnykh konstruksii inzhenernykh sooruzhenii [Efficiency of repair of reinforced concrete structures of engineering structures]. *Problemy dolgovечности zdanii i sooruzhenii v sovremennom stroitel'stve* [Problems of durability of buildings and structures in modern construction]. St. Petersburg, RIF "Rose of the World", 2007, pp. 29–34.

12. Kustov B. A., Pushnitsa N. V., Demchenko E. D., Klepikov A. G., Fedorova I. L. O prirode razrushenii vysokoprochnoi termicheski uprochnennoi armaturnoi stali [On the nature of destruction of high-strength thermally hardened reinforcing steel]. *Stal' = Steel*, 1994, no 6, pp. 69–74.

13. Granato A., Hikata A., Lucke K. Recovery of damping and modulus changes following plastic deformation? *Acta Metall.*, 1958, vol. 6, pp. 470–480.

14. Blanter M. S., Piguzov Yu. V., Ashmarin G. M., eds. Metod vnutrennego treniya v metallovedcheskikh issledovaniyakh [The method of internal friction in metal studies]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1991. 248 p.

15. Sergeev N. N., Izvolskij V. V., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Gvozdev A. E. Vliyanie uslovii otpuska na mekhanicheskie i korrozionnye svoystva stali 23Kh2G2T [Influence of tempering conditions on mechanical and corrosion properties of steel 23Kh2G2T]. *Vestnik Rybinskoi gosudarstvennoi aviatsionnoi tekhnologicheskoi akademii im. P. A. Solov'eva = Bulletin of the Rybinsk State Aviation Technological Academy named after P. A. Solovyov*, 2018, no. 2(45), pp. 128–135.

16. Sergeev N. N., Izvolskij V. V., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Gvozdev A. E. [The influence of the chemical composition of steel 23Kh2G2T on mechanical and corrosion properties]. Deformatsiya i razrushenie materialov i nanomaterialov. Sbornik materialov VIII Mezhdunarodnoi konferentsii [Deformation and Destruction of Materials and Nanomaterials. Collection of materials VIII International Conference]. Moscow, IMET RAS Publ., 2019, pp. 579–581. (In Russ.)

17. Shapovalov V. I. Legirovanie vodorodom [Doping with hydrogen]. Dnepropetrovsk, Zhurfond Publ., 2013. 385 p.
18. Grabskij M. V. Struktura granits zeren v metallakh [Structure of grain boundaries in metals]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1972. 160 p.
19. Cottrell A. H. Dislocations and plastic flow in crystals. Oxford, Oxford University Press, 1953. 223 p.
20. Krishtal M. A., Izvolskij V. V. Vliyanie temperatury otpuska na stoikost' stali 23Kh2G2T protiv korrozionnogo rastreskivaniya [Influence of tempering temperature on the resistance of steel 23Kh2G2T against corrosion cracking]. *Fiziko-khimicheskaya mekhanika materialov = Physico-chemical mechanics of materials*, 1972, vol. 8, no. 2, pp. 13–15.
21. Sergeev N. N., Sergeev A. N. Mekhanicheskie svoistva i vnutrennee trenie vysokoprochnykh staley v korrozionnykh sredakh [Mechanical properties and internal friction of high-strength steels in corrosive environments]. Tula, Tula St. Univ. Publ., 2018. 430 p.
22. Sergeev N. N., Izvolskij V. V., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Gvozdev A. E., Chukanov A. N., Pantyukhin O. V. Vliyanie khimicheskogo sostava stali 23Kh2G2T na stoikost' protiv korrozionnogo rastreskivaniya [The influence of the chemical composition of steel 23Kh2G2T on resistance against corrosion cracking]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Izvestiya Tula State University. Technical sciences*, 2018, is. 9, pp. 409–420.
23. Azhogin F. F. Korrozionnoe rastreskivanie i zashchita vysokoprochnykh staley [Corrosion cracking and protection of high-strength steels]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1974. 256 p.

Информация об авторе / Information about the Author

Кутепов Сергей Николаевич, кандидат педагогических наук, доцент, доцент кафедры Технологии и сервиса, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого, г. Тула, Российская Федерация,
e-mail: kutepovsn@yandex.ru

Sergey N. Kutepov, Cand. of Sci. (Pedagogical), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Technology and Service, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University, Tula, Russian Federation,
e-mail: kutepovsn@yandex.ru