



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Определение взаимосвязи фактора разнородности и скорости коррозии конструкционной стали

Роман Соколов ^{a,*}, Виталий Новиков ^b, Камилль Муратов ^c, Анатолий Венедиктов ^d

Тюменский индустриальный университет, ул. Володарского, 38, г. Тюмень, 625000, Россия

^a <https://orcid.org/0000-0001-5867-8170>, falcon.rs@mail.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0002-1987-351X>, vitaly.nowikov2017@yandex.ru,
^c <https://orcid.org/0000-0002-8079-2022>, muratows@mail.ru, ^d <https://orcid.org/0000-0002-6899-4297>, annattoliy@gmail.com

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 620.195

История статьи:

Поступила: 28 мая 2020
 Рецензирование: 18 июня 2020
 Принята к печати: 15 августа 2020
 Доступно онлайн: 15 сентября 2020

Ключевые слова:

РЭМ
 Температура отпуска
 Фактор разнородности
 Гравиметрический метод
 Границы зерен
 Размер зерна
 Скорость коррозии

АННОТАЦИЯ

Введение. Оборудование, эксплуатирующееся на опасных производственных объектах, в большинстве случаев изготавливается из конструкционных сталей, которые подвержены сильному коррозионному разрушению при контакте с агрессивными средами. В агрессивных средах процесс коррозионного разрушения материала имеет многосоставную природу. Многосоставность процессов коррозии до сих пор оставляет вопрос: какие факторы в большей степени оказывают влияние на данные процессы. В литературных источниках в качестве основного коррозионно-определяющего фактора указывают размеры зеренной структуры. Однако кроме размеров зерен на коррозию влияет и соответствующий им фактор разнородности, который характеризует дисперсность системы в целом. Поэтому дифференциация факторов, влияющих на протекание коррозионных процессов, остается актуальной проблемой. **Цель работы:** проанализировать возможность применения фактора разнородности в качестве диагностического параметра для определения скорости коррозионного разрушения конструкционной стали. **В работе исследованы** термообработанные образцы стали 15ХСНД, 09Г2С и Ст3, изготовленные из листового проката. **Методы исследования.** Для исследования сталей 15ХСНД, 09Г2С и Ст3 в работе применялись: растровый электронный и оптический микроскоп – для изучения зеренной структуры и межзеренных границ; программный пакет SIAMS 700 – для нахождения границ и среднестатистических данных зеренной структуры; портативный рентгенофлуоресцентный химический анализатор – для определения химического состава исследуемых образцов; лабораторные весы с погрешностью измерения 0,001 г – для измерения массы образцов. **Результаты и обсуждение.** Установлено, что для скорости коррозии конструкционных сталей и фактора разнородности наблюдается единая удовлетворительная линейная корреляционная зависимость, которая может быть использована для предсказания коррозионно-опасных состояний конструкций. Замечено, что выпадение некоторых значений из общей регрессионной кривой может быть связано с процессами уменьшения искажений в кристаллические решетки стали при определенной термической обработке. Выраженность этих процессов для рассматриваемых сталей может быть различной из-за наличия в их составе необходимого количества легирующих элементов.

Для цитирования: Определение взаимосвязи фактора разнородности и скорости коррозии конструкционной стали / Р.А. Соколов, В.Ф. Новиков, К.Р. Муратов, А.Н. Венедиктов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2020. – Т. 22, № 3. – С. 106–125. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.3-106-125.

Введение

Одним из основных факторов, определяющих работоспособность опасных производственных объектов, является наличие критических дефектов. При работе с агрессивными средами одной из главных причин появления

дефектов является процесс коррозионного разрушения материала [1].

Например, в практике эксплуатации стальных вертикальных резервуаров (РВС) нередки случаи, когда через некоторое время (менее расчетного периода эксплуатации) резервуар оказывается полупустым, а вокруг места его установки наблюдается разлив нефтепродукта [2]. Причиной подобной ситуации является сквозная коррозия, возникающая в одном или нескольких стальных листах. В результате разлива нефтепродукта создается неблагоприятная экологиче-

*Адрес для переписки

Соколов Роман Александрович, аспирант, ассистент
 Тюменский индустриальный университет
 ул. Володарского, 38,
 625000, г. Тюмень, Россия
 Тел.: +7-919-925-88-47, e-mail: falcon.rs@mail.ru

ская ситуация, требующая больших финансовых вложений для устранения, ремонта, компенсации экологического ущерба и потери нефтепродукта [3].

Уменьшить количество подобных ситуаций, возникающих на опасных производствах, возможно в том числе и за счет контроля металла [4].

Процесс коррозии сложен и многосоставен [1, 5]. Так, простое с виду коррозионное разрушение может включать в себя различные механизмы протекания данного процесса [5].

Существует большое разнообразие методов, позволяющих определять вид коррозии [6–11], степень ее опасности, скорость протекания данного процесса, влияние внешних и внутренних факторов [12, 13]. В современной методологии исследования коррозии известны как разрушающие, так и неразрушающие методы, позволяющие определить ее основные параметры и характеристики. Однако несмотря на наличие данных методов все еще остается открытым вопрос: какие факторы в большей степени оказывают влияние на процесс коррозии.

Основными методами контроля коррозионных свойств стали являются: гравиметрический, металлографический, методы определения электрохимического потенциала и др. [4, 5]. Недостатком названных методов является то, что они требуют много времени, а некоторые из них (метод определения химического потенциала), хотя и имеют более высокую скорость снятия интересующих параметров, однако определяют скорость коррозии с большой погрешностью. Существуют также методы контроля, основанные на мониторинге состояния датчиков – свидетелей коррозии [8, 10], и методы, основанные на регистрации ультразвуковых колебаний [7, 9]. Для увеличения скорости проведения испытаний нужны косвенные параметры, позволяющие быстро осуществлять неразрушающий контроль склонности металла к коррозии в конкретной коррозионной среде.

В литературе указывается [1, 5], что на процесс коррозионного разрушения металлов в электролитах влияют размеры зеренной структуры и дисперсность системы в целом. Однако кроме размеров зерен на коррозию влияет и соответствующий им фактор разнородности, который характеризует дисперсность системы в

целом. В соответствии с этим, на наш взгляд, исследование влияния фактора разнородности структуры (дисперсности системы) на протекание коррозионных процессов является актуальным.

В настоящей работе была поставлена цель: проанализировать возможность применения фактора разнородности в качестве диагностического параметра для определения скорости коррозионного разрушения конструкционных сталей в морской воде.

Для этого необходимо решить ряд возникающих задач: проанализировать, каким образом происходит влияние термообработки на размеры зерен; определить величину фактора разнородности, а также попробовать найти корреляционную зависимость между ним и скоростью коррозии конструкционных сталей в морской воде; объяснить изменения, происходящие с фактором разнородности при термообработке.

Методика исследований

Исследования производились на образцах, изготовленных из широко распространенных конструкционных сталей 09Г2С, Ст3, 15ХСНД, которые широко применяются при изготовлении различных металлоконструкций, труб и оборудования.

Образцы для проведения исследований были изготовлены из листового проката. Размеры образцов, участвующих в лабораторных исследованиях: $4,0 \times 70,0 \times 25,0$ мм.

Образцы были термообработаны для получения различной структуры и фазового состава, были выдержаны при температуре 930 ± 20 °С в течение 15 мин, а затем подвергнуты закалке с охлаждением в воде. Закаленные образцы были отпущены в течение одного часа с охлаждением на воздухе при температурах: 200, 350, 500, 650 °С.

Структура исследуемой стали была изучена при помощи растрового электронного микроскопа JEOL 6008А и оптического микроскопа Olympus GX53 при тысячекратном увеличении. Для выявления микроструктуры образцы были обработаны 3 %-м раствором азотной кислоты.

Определение химического состава исследуемых образцов производилось с помощью рентгенофлуорисцентного химического анализатора

производства OXFORD INSTRUMENTS X – MET 5100.

В табл. 1 приведен химический состав стали в процентном соотношении. Показатели содержания углерода, серы и фосфора в табл. 1 приведены согласно информации, указанной в сертификатах качества на стали Ст3, 09Г2С, 15ХСНД, из которых изготавливались образцы.

В исследованиях [4, 14–15] приведены отличающиеся друг от друга данные относительно влияния размера зерна на скорость коррозии. По всей видимости, подобные противоречивые результаты связаны прежде всего с тем, что исследования, представленные в работах, проводились на модельных образцах сплавов, имеющих однородную структуру.

Однако авторами в работе [12] рассмотрено влияние неоднородности структуры в стали 20, возникающее в процессе ее эксплуатации, на скорость коррозии. Возникновение неоднородности связано с различными факторами [14]:

- неравновесные условия кристаллизации металла;
- наличие легирующих и примесных элементов;

• деформация кристаллической решетки вследствие механических, термических и других факторов.

Авторы А.В. Помазова, Т.В. Панова, Г.И. Геринг предположили, что не размер зерна, а одновременное наличие в структуре мелких и крупных зерен (разнозернистость, дисперсность системы) должно приводить к значительному снижению коррозионной стойкости стали.

Основным методом для оценки зерна является метод, описанный в ГОСТ 5639–82 [16]. Он имеет свои недостатки, среди них то, что оценка величины зерна сводится к определению средних значений площади сечения зерна и его диаметра. В статье [17] подробно рассмотрено ограничение методов, описанных в ГОСТ 5639–82 [16] при определении степени дисперсности системы.

Однако на сегодняшний день разработано большое количество методов оценки зеренной структуры металлов [17–19]. Все представленные методы имеют свои положительные и отрицательные стороны.

В настоящей работе для морфологического анализа структурных компонентов и определе-

Таблица 1

Table 1

Содержание химических элементов для термообработанных образцов стали Ст3, 09Г2С, 15ХСНД
The content of chemical elements in heat-treated samples of St3, 09G2S and 15KhSND steels

15ХСНД 15KhSND												
Содержание хим. элемента, % The contents of the chemical. element, %												
Si	P	Si	V	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Nb	Mo	W	C
0,71	0,06	0	0	0,84	0,79	97,33	0,34	0,2	0	0,01	0	0,16
Ст3 St3												
Содержание хим. элемента, % The contents of the chemical. element, %												
Si	P	Si	V	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Nb	Mo	W	C
0,15	0,05	0	0	0,03	0,45	98,54	0,03	0,04	0	0,01	0	0,16
09Г2С 09G2S												
Содержание хим. элемента, % The contents of the chemical. element, %												
Si	P	Si	V	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Nb	Mo	W	C
0,59	0,06	0	0	0,07	1,91	97,84	0,11	0,22	0	0,01	0	0,11

ния фактора разнородности воспользуемся методикой расчета, которая описана в работе [18]. Для этого необходимо было проанализировать снимки микроструктуры исследуемых сталей с помощью металлографического анализатора фрагментов микроструктуры твердых тел «SIAMS 700» и произвести расчет фактора разнородности по формуле

$$F_z = \frac{f_{\max} Z_{\max}}{\sum f_i Z_i}, \quad (1)$$

где f_i – доля зерна с определенным баллом, %; f_{\max} – доля зерна, занимающего максимальную площадь на шлифе, %; Z_i – балл зерна; Z_{\max} – балл зерна, занимающего максимальную площадь на шлифе.

Изготовленные образцы подвергались травлению 3 %-м раствором азотной кислоты и были исследованы на оптическом и растровом электронном микроскопе, на которых были сделаны снимки микроструктуры. Полученные снимки микроструктуры были обработаны в программе «SIAMS 700».

Коррозия сталей проводилась в лабораторных условиях. В качестве агрессивной среды использовалась морская вода с содержанием соли 34 г на литр. Для приготовления коррозионной среды использовалась природная морская соль Верхнекамского месторождения с микроэлементами. Исследование проводилось в течение 31 дня.

Измерение массы образцов осуществлялось на лабораторных весах SHIMADZU UW620h с погрешностью измерения 0,001 г. Масса образца рассчитывалась как среднее значение по трем измерениям. Определение геометрических размеров образцов производилось при помощи штангенциркуля.

Образцы не находились в прямом контакте друг с другом. Исследование велось согласно ГОСТ 9.008–85.ЕСЗКС «Методы коррозионных испытаний. Общие требования» [20]. Критерием, по которому производилась оценка коррозионного разрушения, была относительная убыль массы с единицы поверхности. Затем осуществлялся пересчет данного параметра в скорость коррозии (необходимо относительную убыль массы поделить на время пребывания образцов в агрессивной среде). Скорость коррозии рассчитывалась по формуле

$$v = \frac{\Delta m}{St}, \quad (2)$$

где Δm – относительная убыль массы, г; S – площадь поверхности, контактируемой с агрессивной средой, m^2 ; t – время контакта образца с агрессивной средой в сутках.

Для определения погрешности результатов эксперимента, уменьшения возникающих погрешностей и исключения влияния термической и механической обработки поверхности на конечные результаты эксперимент в морской воде проводился три раза.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1, 2 и 3 представлены полученные после обработки в программе «SIAMS 700» снимки микроструктуры с построенными границами зеренной структуры термообработанных образцов, изготовленных из стали Ст3, 09Г2С, 15ХСНД.

Далее снимки микроструктуры с построенными границами зеренной структуры термообработанных образцов, изготовленных из стали Ст3, 09Г2С, 15ХСНД, были подвергнуты детальному анализу в программе «SIAMS 700» с целью получения информации о геометрических размерах зерен. Полученные данные представлены в табл. 2.

Наблюдаемое уменьшение средней величины зерна для стали 09Г2С при увеличении температуры отпуска, по всей видимости, связано с тем, что с увеличением температуры отпуска наблюдается увеличение количества обнаруженных при анализе микрофотографий зерен. Стоит отметить, что в литературных источниках приводятся данные, по которым при увеличении температуры отпуска должен наблюдаться рост размеров зерен. Однако подобный рост возможен только при поглощении одними зернами площади других. Это приводит к появлению в структуре более высокой дисперсности по сравнению с другими состояниями. Кроме того, вследствие процессов диффузии углерода и других химических элементов может наблюдаться образование на границах и в теле крупных зерен более мелких фрагментов. Наличие данных факторов приводит к тому, что при неизменном объеме исследуемой области в шлифе, где наблюдается более сильный разброс в размерах зерна, сред-

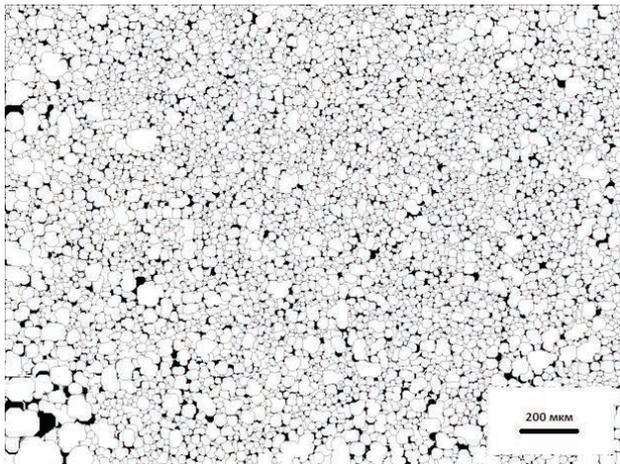
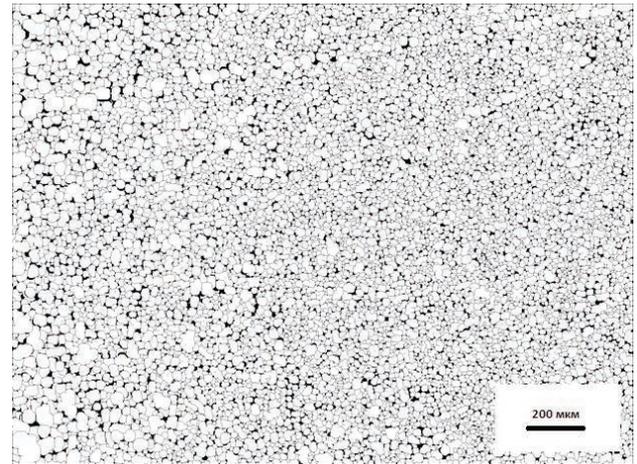

a

б

Рис. 1. Обработанная в программе SIAMS 700 микроструктура образцов стали 15XCHD при различной термообработке:

a – нагрев до 930 °С, закалка в воду; *б* – закалка + отпуск 650 °С

Fig. 1. The microstructures of 15KhSND steel samples under various heat treatments, processed in the SIAMS 700 program:

a – heating up to 930 °С with quenching in water; *б* – quenching + tempering at 650 °С

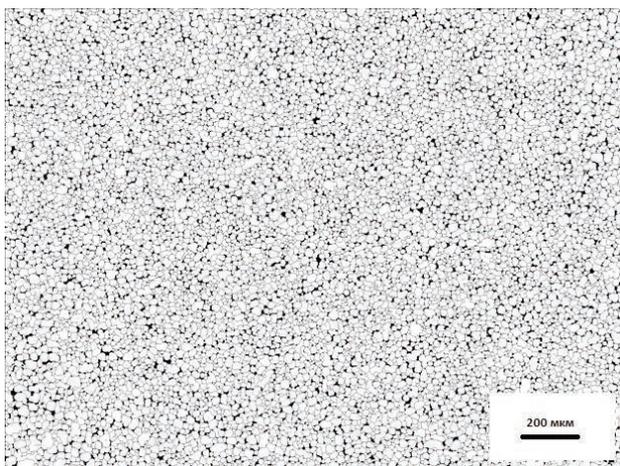
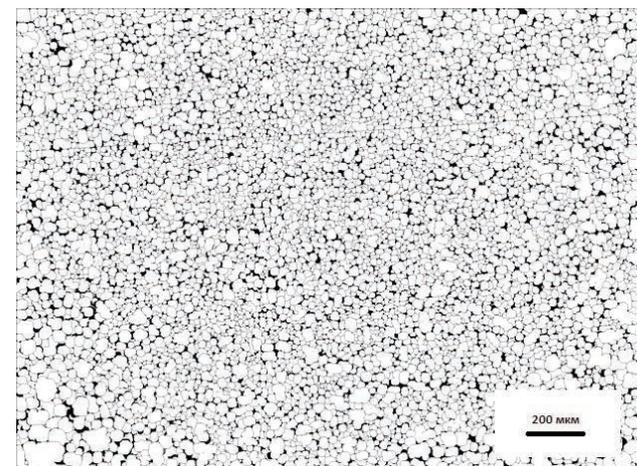

a

б

Рис. 2. Обработанная в программе SIAMS 700 микроструктура образцов стали Ст3 при различной термообработке:

a – нагрев до 930 °С, закалка в воду; *б* – закалка + отпуск 650 °С

Fig. 2. The microstructures of St3 steel samples under various heat treatments, processed in the SIAMS 700 program:

a – heating up to 930 °С with quenching in water; *б* – quenching + tempering at 650 °С

нее значение размеров зерна будет уменьшаться по сравнению с микрошлифом, на поверхности которого количество зерен и разброс в их величине имеет меньшее значение.

Так как фактор разнотерности рассчитывается исходя из процентного отношения разнотерных зерен, то возникает необходимость

в определении процентного содержания зерна определенного балла в микрошлифе образца с определенной термической обработкой. Однако при таком разграничении встает вопрос о выполнении классификации зерна по баллам, которое возможно произвести исходя из различных геометрических параметров (размера и площади).

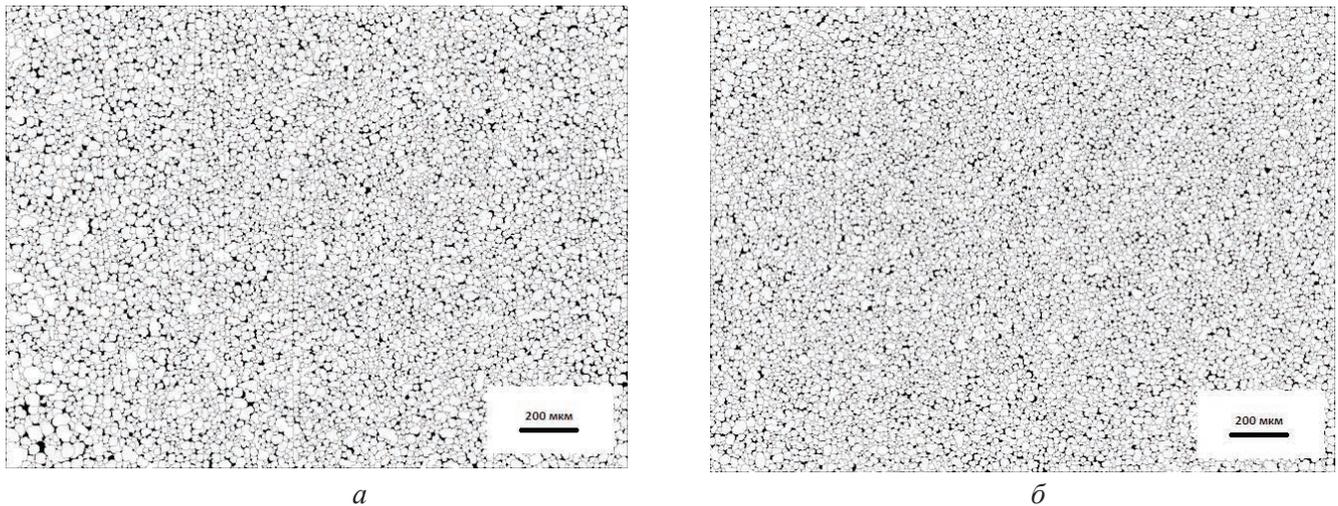


Рис. 3. Обработанная в программе SIAMS 700 микроструктура образцов стали 09Г2С при различной термообработке:

a – нагрев до 930 °С, закалка в воду; *б* – закалка + отпуск 650 °С

Fig. 3. The microstructures of 09G2S steel samples under various heat treatments, processed in the SIAMS 700 program:

a – heating up to 930 °С with quenching in water; *б* – quenching + tempering at 650 °С

Таблица 2

Table 2

Данные по параметрам зерен микрошлифов термообработанных образцов, изготовленных из стали Ст3, 09Г2С, 15ХСНД, полученные в программе «SIAMS 700»

Data on the grain parameters of microsections of heat-treated samples made of St3, 09G2S and 15KhSND steels obtained in the program “SIAMS 700”

09Г2С 09G2S					
Температура обработки, °С Processing temperature, °С	0	200	350	500	650
Число зерен Number of grain	5349	6131	3082	4891	6095
Средняя величина зерна, мкм The average value of grain, μm	13.61	12.28	18.23	14.16	12.13
Среднее значение площади зерна, мкм ² The average value of the square of grain, μm ²	92.44	71.66	157.34	103.05	75.04
15ХСНД 15KhSND					
Температура обработки, °С Processing temperature, °С	0	200	350	500	650
Число зерен Number of grain	3719	5681	5552	5075	5040
Средняя величина зерна, мкм The average value of grain, μm	15.03	12.66	12.18	12.83	13.15
Среднее значение площади зерна, мкм ² The average value of the square of grain, μm ²	107.95	84.14	74.37	82.56	91.53

Ст3 St3					
Температура обработки, °С Processing temperature, °С	0	200	350	500	650
Число зерен Number of grain	5584	5762	5569	5663	4540
Средняя величина зерна, мкм The average value of grain, μm	12.14	11.24	13.12	13.03	15.22
Среднее значение площади зерна, μm^2 The average value of the square of grain, μm^2	75.77	64.72	83.43	88.26	104.75

Для понимания процентного содержания зерен определенного балла в микрошлифе построим гистограммы распределения зерен по размерам и по площади и сравним полученные результаты между собой. Определение балла зерна осуществлялось согласно табл. 1, представленной в ГОСТ 5639-82 «Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна» [16]. Так, на рис. 4–9 представлены гистограммы процентного распределения зерен по баллам для микрошлифов термообработанных образцов, изготовленных из стали Ст3, 09Г2С, 15ХСНД.

Сравнивая полученные гистограммы между собой, заметим, что гистограммы, полученные по размеру и по площади для одной стали, отличаются друг от друга по виду распределения. Так, для гистограммы, полученной по размеру зерна, наибольший процент зерен приходится на зерна с 11-м баллом, а для гистограммы, полученной по площади зерна, – с 12-м. Однако стоит отметить, что гистограммы, полученные по размеру и по площади для исследуемых сталей, похожи между собой по виду распределения.

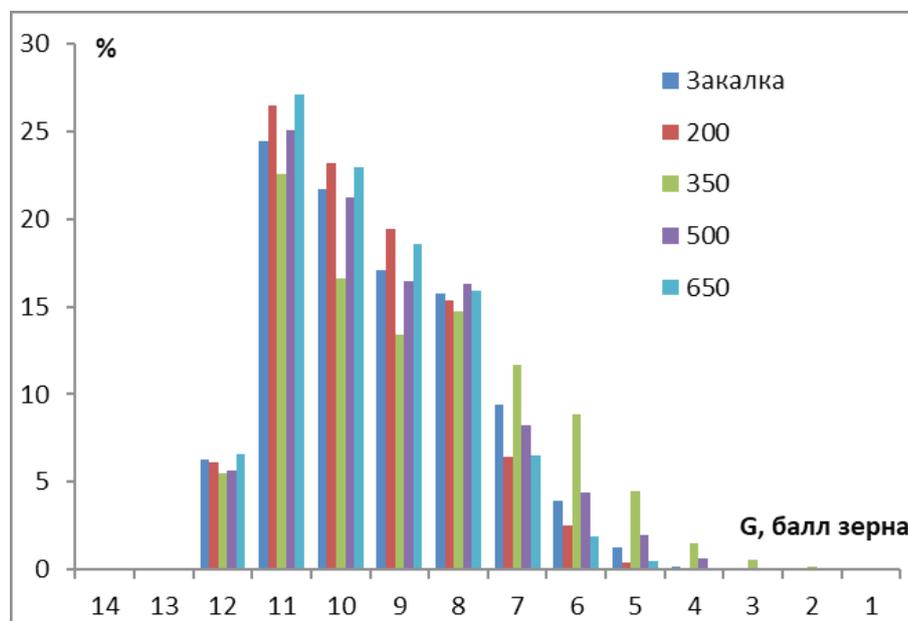


Рис. 4. Гистограмма процентного распределения зерен по баллам для микрошлифов термообработанных образцов, изготовленных из стали 09Г2С, по размеру зерна

Fig. 4. Histogram of the percentage distribution of grains by the rating number for microsections of heat-treated samples made of 09G2S steel (calculated by grain size)

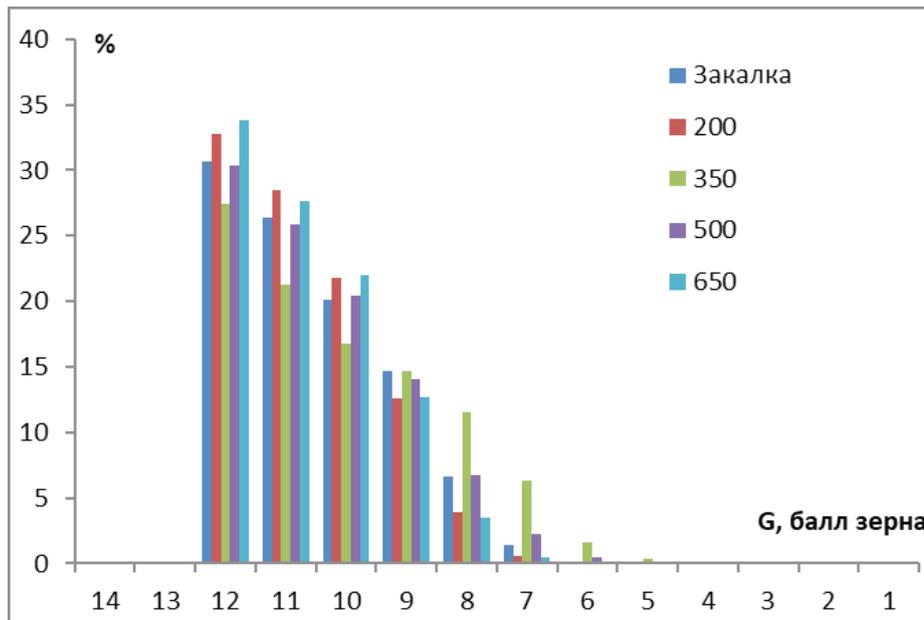


Рис. 5. Гистограмма процентного распределения зерен по баллам для микрошлифов термообработанных образцов, изготовленных из стали 09Г2С, по площади зерна

Fig. 5. Histogram of the percentage distribution of grains by the rating number for microsections of heat-treated samples made of 09G2S steel (calculated by grain area)

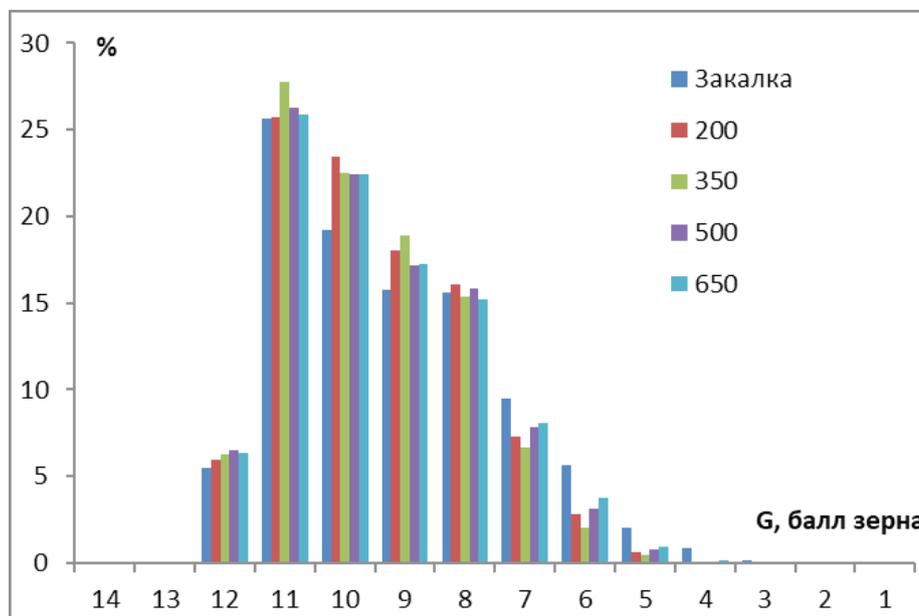


Рис. 6. Гистограмма процентного распределения зерен по баллам для микрошлифов термообработанных образцов, изготовленных из стали 15XСНД, по размеру зерна

Fig. 6. Histogram of the percentage distribution of grains by the rating number for microsections of heat-treated samples made of 15KhSND steel (calculated by grain size)

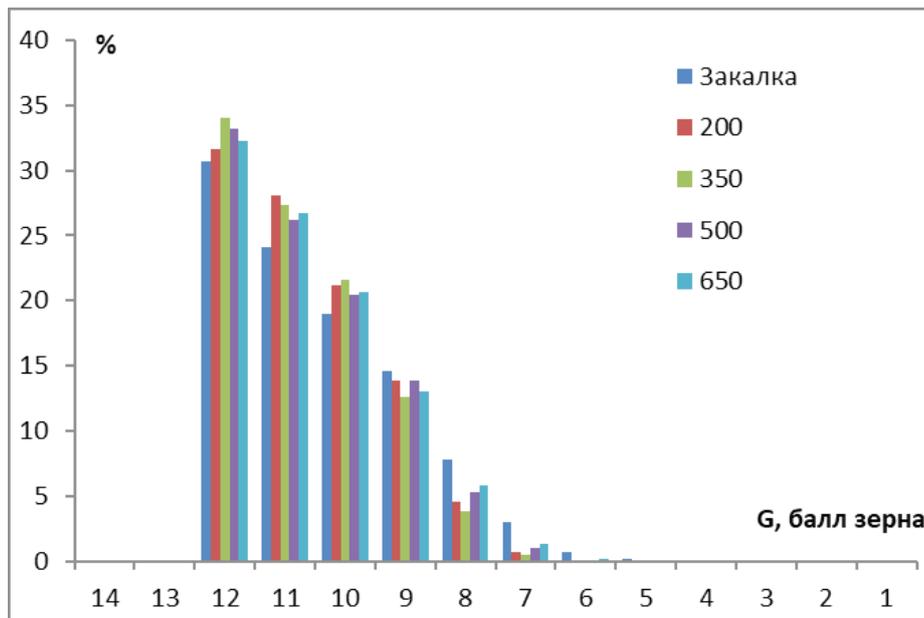


Рис. 7. Гистограмма процентного распределения зерен по баллам для микрошлифов термообработанных образцов, изготовленных из стали 15ХСНД, по площади зерна

Fig. 7. Histogram of the percentage distribution of grains by the rating number for microsections of heat-treated samples made of 15KhSND steel (calculated by grain area)

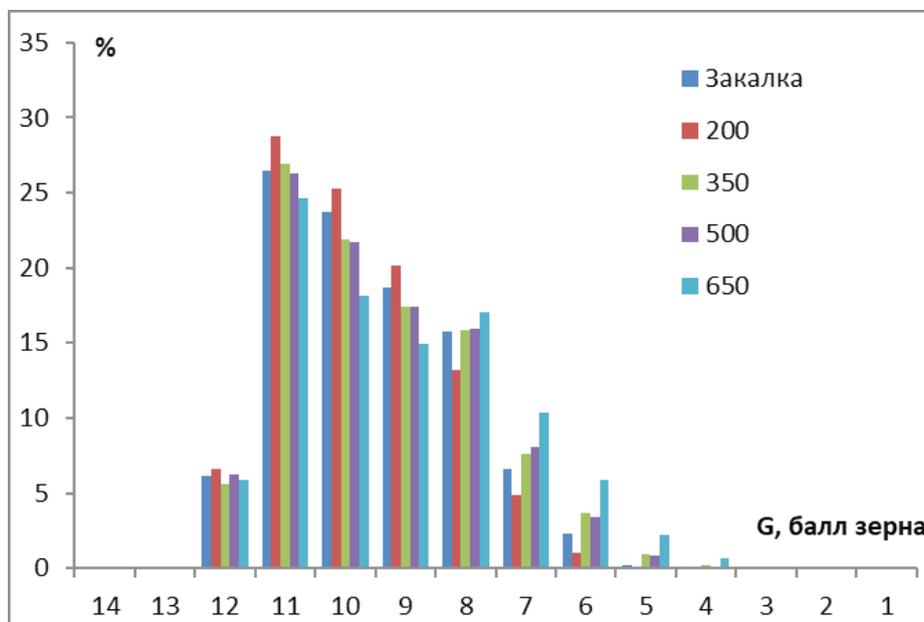


Рис. 8. Гистограмма процентного распределения зерен по баллам для микрошлифов термообработанных образцов, изготовленных из стали Ст3, по размеру зерна

Fig. 8. Histogram of the percentage distribution of grains by the rating number for microsections of heat-treated samples made of St3 steel (calculated by grain size)

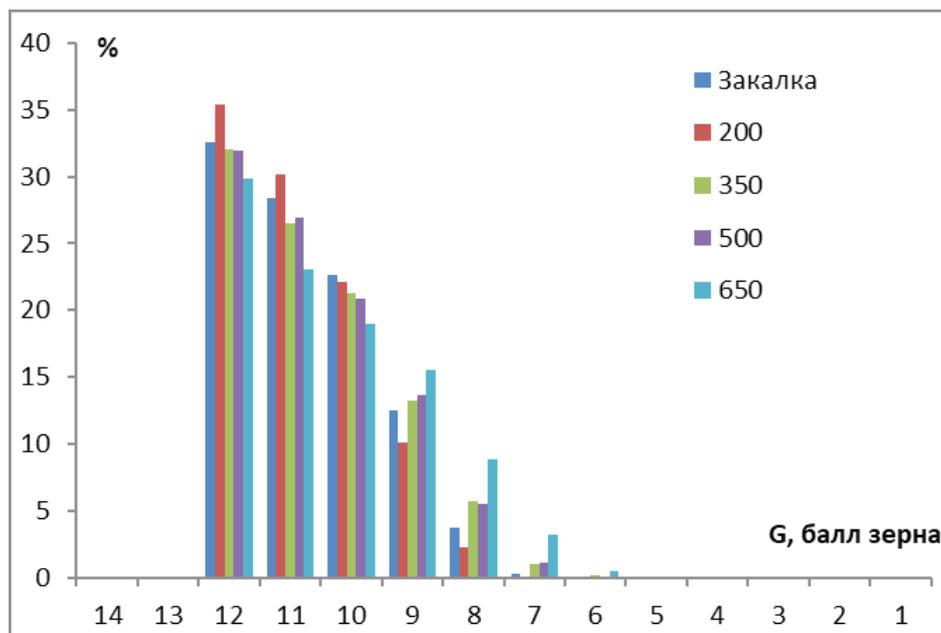


Рис. 9. Гистограмма процентного распределения зерен по баллам для микрошлифов термообработанных образцов, изготовленных из стали Ст3, по площади зерна

Fig. 9. Histogram of the percentage distribution of grains by the rating number for microsections of heat-treated samples made of St3 steel (calculated by grain area)

Рассчитанные значения фактора разноразности для исследуемых образцов приведены в табл. 3.

Значения величины фактора разноразности для одних и тех же образцов, полученных по двум разным распределениям, отличаются друг от друга. Сравнивая величину фактора разноразности, полученную при классификации зерна по размеру (рис. 10), с величиной, полученной при классификации зерна по площади (рис. 11), можно заметить, что хотя факторы разноразности для одной и той же стали отличаются друг от друга по величине, они имеют схожий характер изменения, что наталкивает на мысль об использовании в конечном варианте оценки коррозии фактора разноразности, рассчитанного как среднее значение между фактором разноразности, полученным при распределении зерен по размеру, и фактором разноразности, полученным при распределении зерен по площади (рис. 12).

На рис. 13–15 представлены при лабораторном исследовании результаты скорости коррозии образцов, изготовленных из стали 09Г2С, Ст3, 15ХСНД, в морской воде.

Из рис. 13–15 видно, что наиболее отличающиеся значения скорости коррозии относительно всех экспериментов наблюдаются у первого эксперимента. Отличие в величинах скорости коррозии для него можно объяснить тем, что значения скорости коррозии в нем получены на образцах после механической шлифовки поверхности образцов, которая приводит к деформации поверхностного слоя и изменениям величин внутренних напряжений на глубину порядка 70 мкм, о чем можно прочитать в работе [21]. Изменения в величине внутренних напряжений существенно сказываются на протекании коррозионного процесса. Величины во втором и третьем эксперименте получены на образцах после электрохимической полировки, после которой не возникают искажения кристаллической решетки металла в результате механических воздействий и, как следствие, не происходит изменение величины внутренних напряжений.

Сравнивая между собой полученные зависимости, можно заметить, что для стали 09Г2С и Ст3 наблюдается увеличение скорости коррозии на 350 °С, у стали 15ХСНД на этой температуре наблюдается уменьшение скорости коррозии,

Изменение фактора разноразмерности для термообработанных образцов, изготовленных из стали Ст3, 09Г2С, 15ХСНД
Changing the factor of heterogeneity for heat-treated samples made of St3, 09G2S, 15KhSND steels

Температура обработки, °С Processing temperature, °С		0	200	350	500	650
Сталь Steel						
09Г2С 09G2S	Fz (по размеру частиц) Fz (by particle size)	0,337	0,356	0,255	0,326	0,352
	Fz (по площади частиц) Fz (by particle area)	0,380	0,412	0,301	0,371	0,395
	Fz (ср. значение) Fz (average value)	0,359	0,384	0,278	0,348	0,373
15ХСНД 15KhSND	Fz (по размеру частиц) Fz (by particle size)	0,289	0,364	0,341	0,346	0,347
	Fz (по площади частиц) Fz (by particle area)	0,341	0,408	0,389	0,371	0,384
	Fz (ср. значение) Fz (average value)	0,315	0,386	0,365	0,358	0,365
Ст3 St3	Fz (по размеру частиц) Fz (by particle size)	0,367	0,392	0,332	0,331	0,273
	Fz (по площади частиц) Fz (by particle area)	0,412	0,439	0,378	0,386	0,324
	Fz (ср. значение) Fz (average value)	0,389	0,415	0,355	0,359	0,299

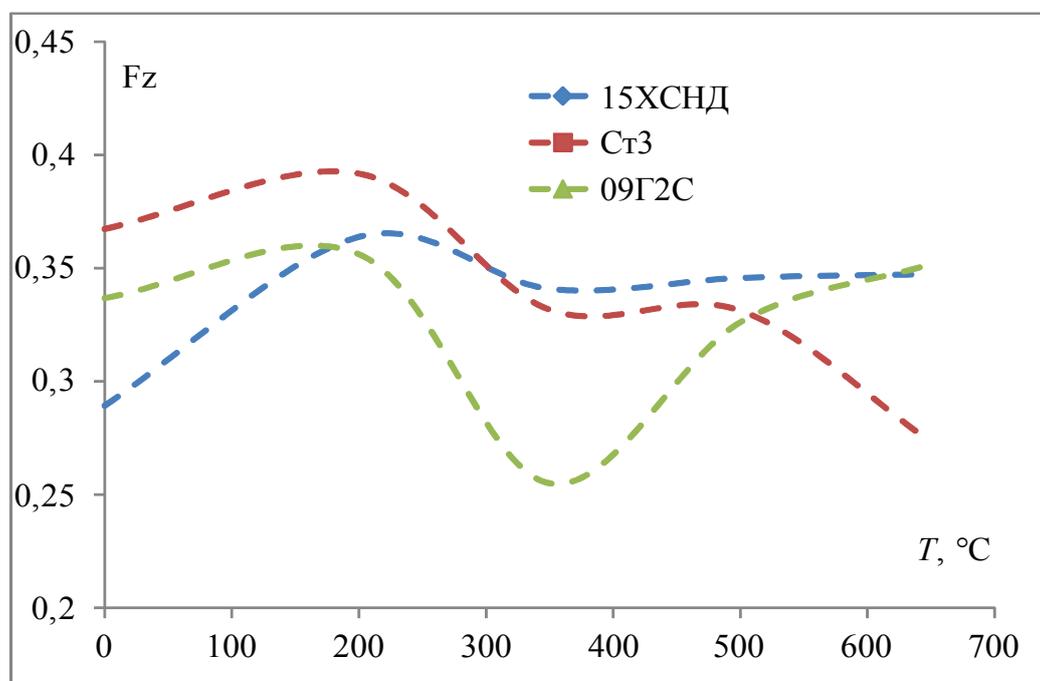


Рис. 10. Изменение фактора разноразмерности Fz для термообработанных образцов, изготовленных из стали Ст3, 09Г2С, 15ХСНД, рассчитанного по размеру зерна

Fig. 10. Change in the grain size variation factor Fz for heat-treated samples made of St3, 09G2S and 15KhSND steels, calculated by grain size

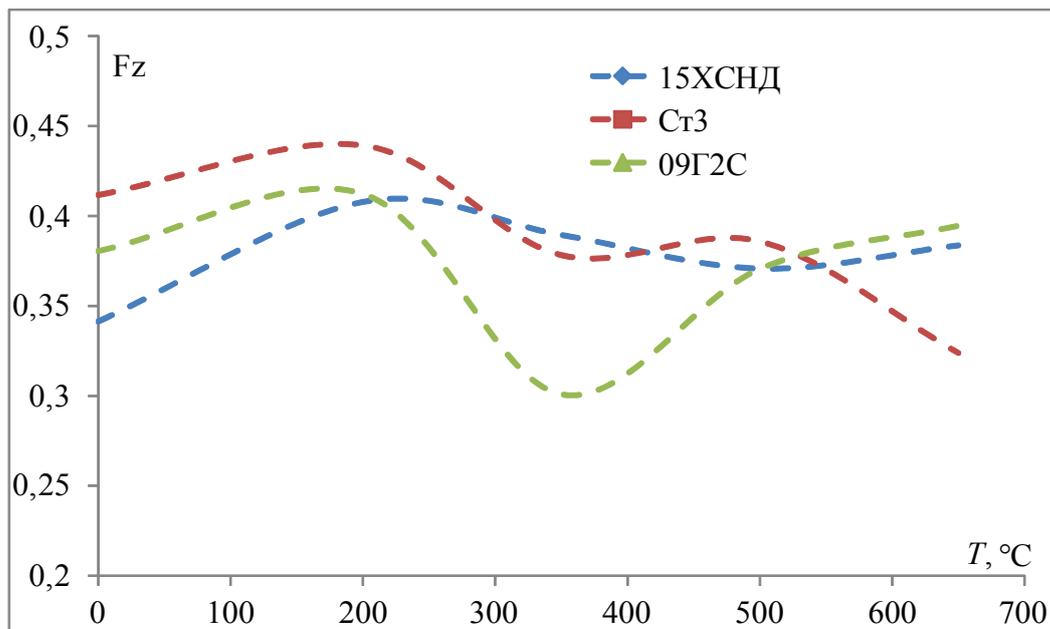


Рис. 11. Изменение фактора разноразности F_z для термообработанных образцов, изготовленных из стали Ст3, 09Г2С, 15ХСНД, рассчитанного по площади зерна

Fig. 11. Change in the grain size variation factor F_z for heat-treated samples made of St3, 09G2S and 15KhSND steels, calculated by grain area

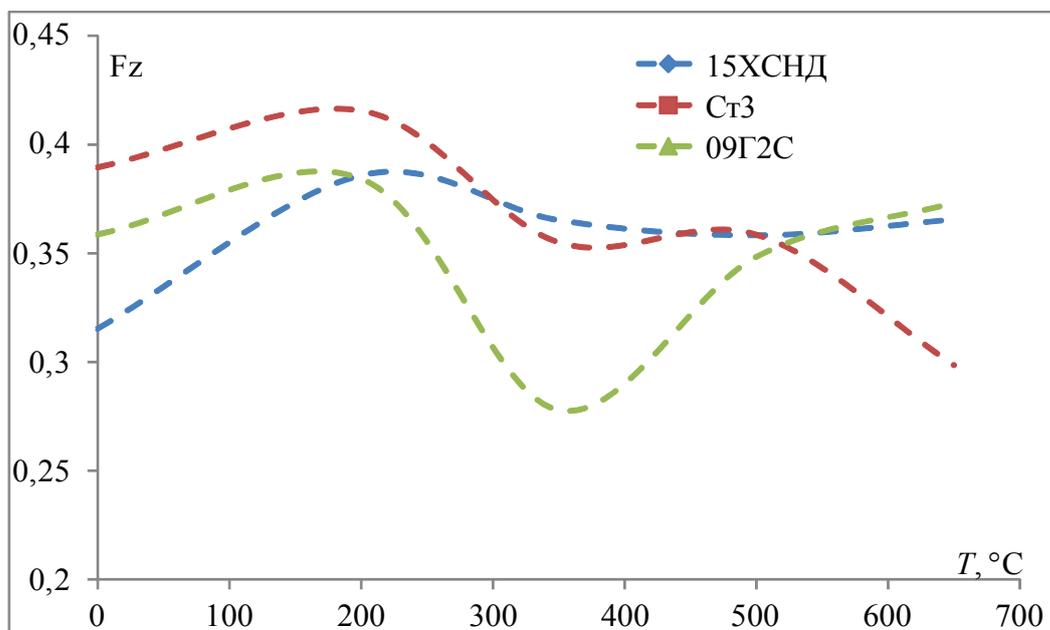


Рис. 12. Изменение среднего значения фактора разноразности F_z для термообработанных образцов, изготовленных из стали Ст3, 09Г2С, 15ХСНД

Fig. 12. Change in the average value of the grain size variation factor F_z for heat-treated samples made of St3, 09G2S and 15KhSND steels

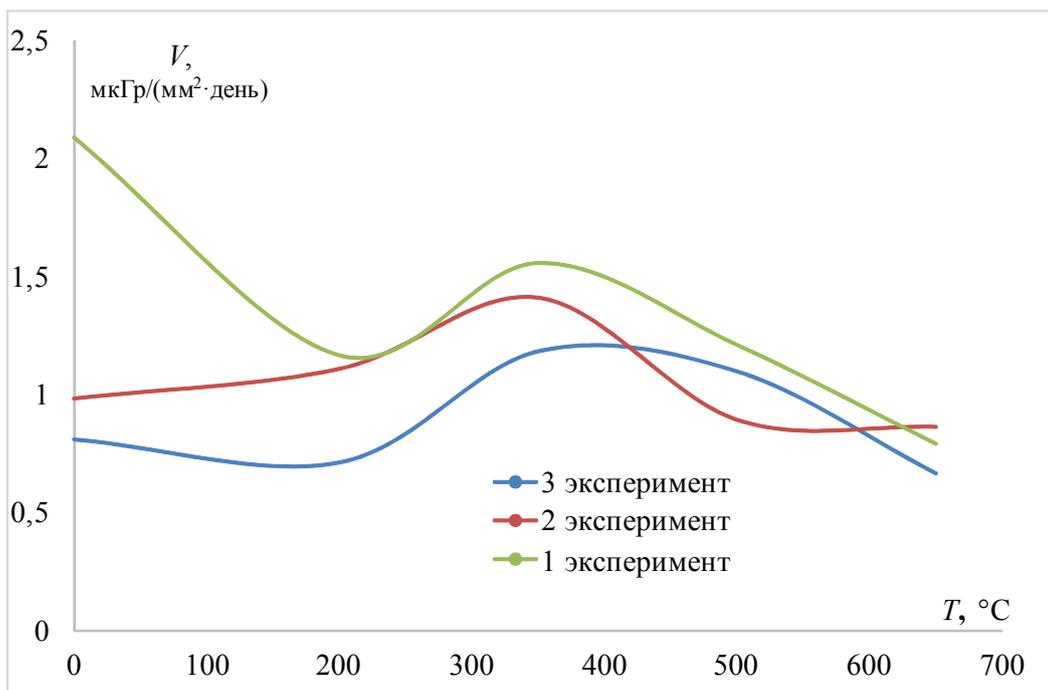


Рис. 13. Зависимость скорости коррозии в морской воде от температуры отпуска для образцов из стали 09Г2С

Fig. 13. Dependence of the corrosion rate in seawater on the tempering temperature for samples made of 09G2S steel

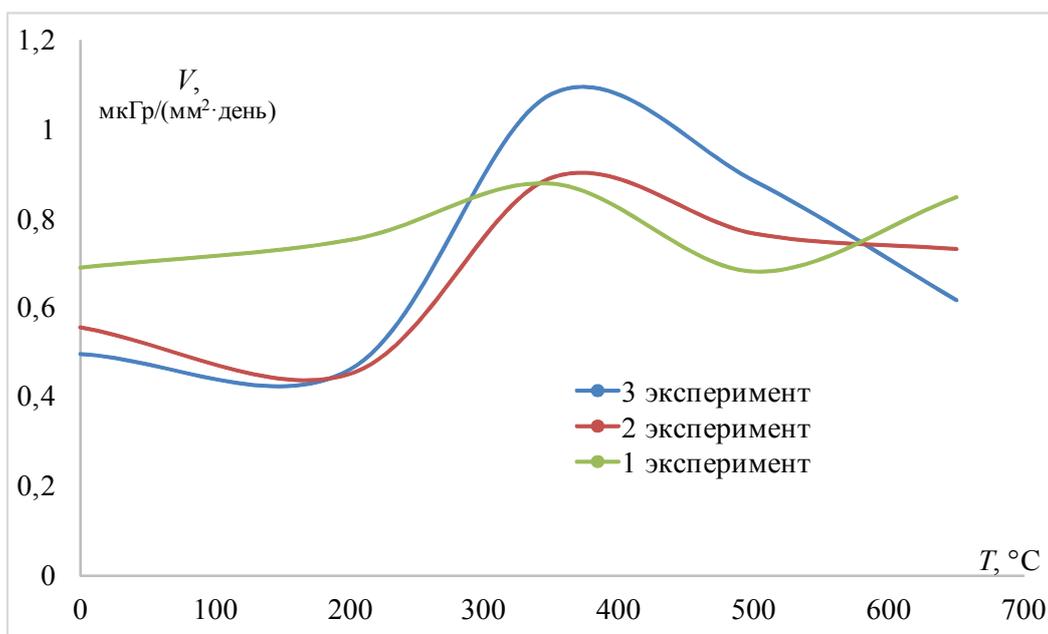


Рис. 14. Зависимость скорости коррозии в морской воде от температуры отпуска для образцов из стали Ст3

Fig. 14. Dependence of the corrosion rate in seawater on the tempering temperature for samples made of St3 steel

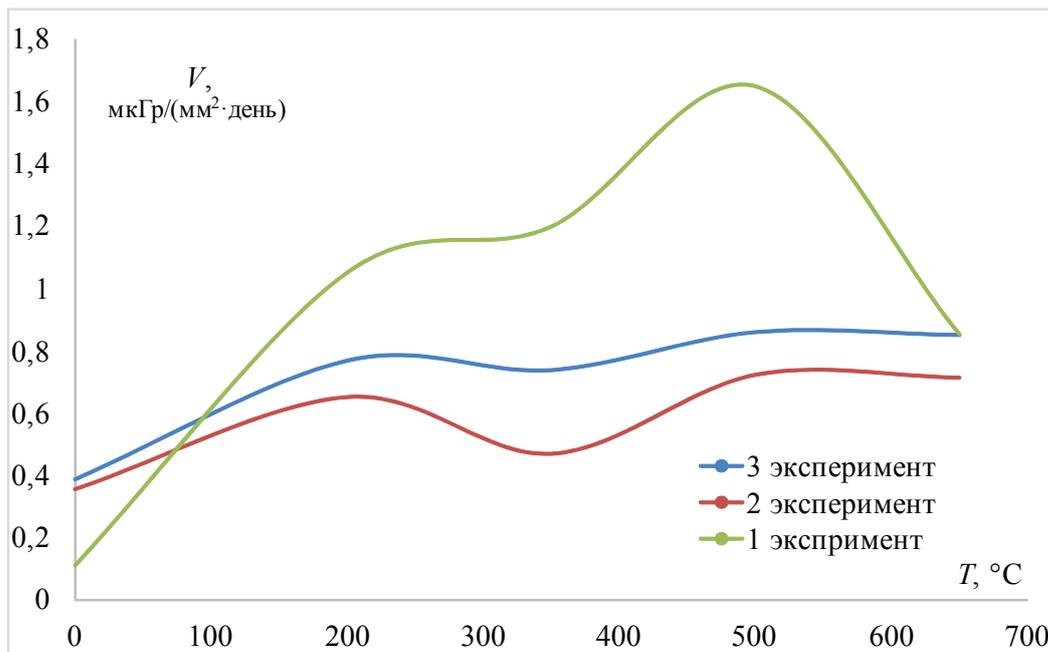


Рис. 15. Зависимость скорости коррозии в морской воде от температуры отпуска для образцов из стали 15ХСНД

Fig. 15. Dependence of the corrosion rate in seawater on the tempering temperature for samples made of 15KhSND steel

что, возможно, связано с процессами коагуляции и сфероидизации частиц цементита, которые существенным образом сказываются на коррозии [22–25]. Изменение микроструктуры стали 15ХСНД показано на рис. 16.

Сопоставив результаты, полученные после эксперимента в агрессивной коррозионной среде, с результатами расчета фактора разнородности, были получены зависимости, представленные на рис. 17.

Как можно отметить, на рис. 17 показаны зависимости, которые могут быть описаны с помощью одной линейной регрессионной кривой, что, возможно, свидетельствует о том, что характер взаимодействия выбранных для исследования конструкционных сталей с агрессивной средой носит один и тот же характер. Данный факт указывает на то, что в механизме коррозии поверхности данных сталей протекают одни и те же процессы, зависящие от дисперсности системы (фактора разнородности). Выпадение точек из общей зависимости для исследуемых сталей происходит при различных температурах: 15ХСНД – образец с закалкой; Ст3 – образец с отпуском при 650 °С; 09Г2С – образец с отпуском при 350 °С.

Подобные выпадения точек из общей зависимости могут быть объяснены с позиции изменения структурно-фазового состава. Так, при закалке стали 15ХСНД формируется структура, в которой не наблюдается эффекта нарушения когерентности решеток для мартенсита и цементита [22, 26–29]. В таком состоянии обе фазы имеют низкую плотность дефектов строения кристаллической решетки [25, 27, 30–31], что отражается на скорости коррозии, делая ее достаточно низкой.

Для образца стали 09Г2С с отпуском при температуре 350 °С процесс может быть объяснен процессами разупрочнения стали, связанными с уменьшением внутренних напряжений и, как следствие, уменьшением дефектности кристаллической решетки из-за снижения плотности дислокаций и различных дефектов строения [27–29, 31–34]. Данный процесс вызван распадом мартенсита на феррит и цементит, а также процессом выделения углерода [22, 25]. Получившийся при таком распаде феррит обладает низкой твердостью, что и обуславливает разупрочнение. Данный эффект можно наблюдать на графике зависимости величины внутренних напряжений от температуры отпуска, представ-

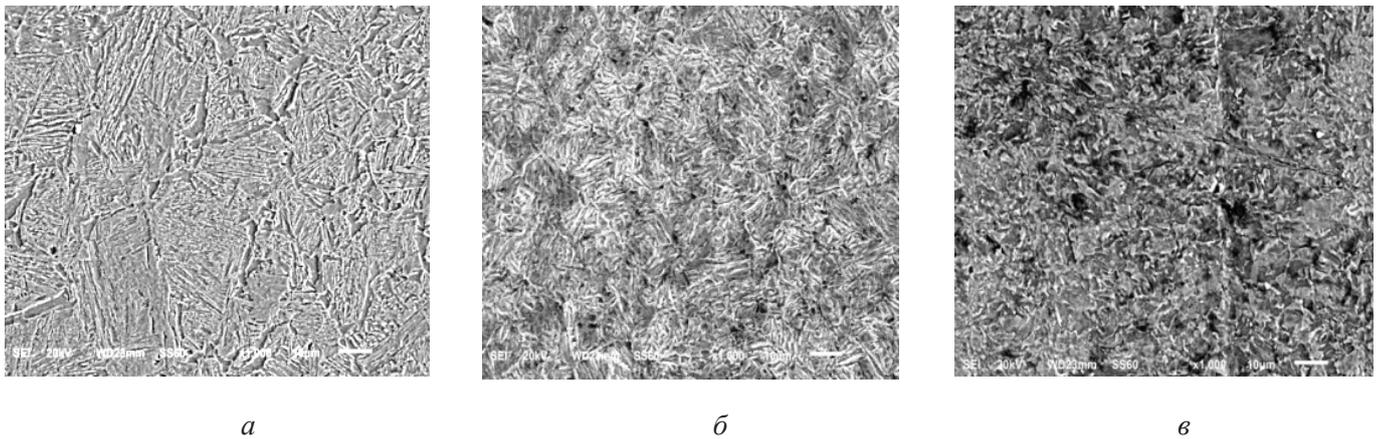

a
б
в

Рис. 16. Структура термообработанных образцов стали 15ХСНД при 1000 кратном увеличении в растровом электронном микроскопе:

a – закаленный образец; *б* – образце при отпуске 350 °С; *в* – образец при отпуске 650 °С

Fig. 16. The structure of the heat-treated samples of 15KhSND steel at 1000 times magnification scanning electron microscope:

a – heating up to 930 °С with quenching in water; *б* – quenching + tempering at 350 °С; *в* – quenching + tempering at 650 °С

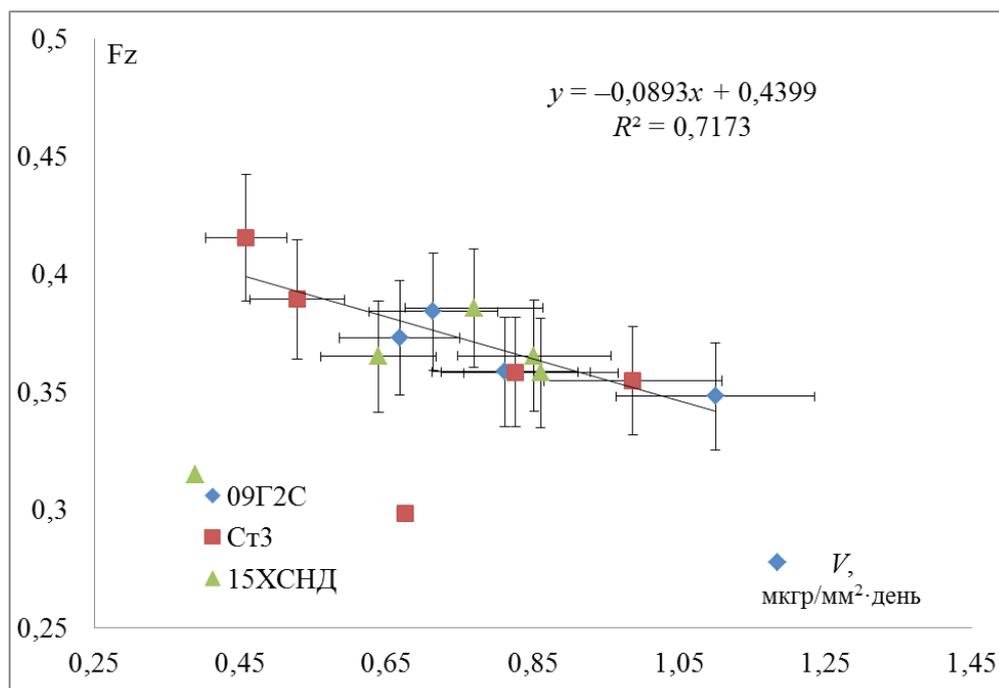


Рис. 17. Зависимость скорости коррозии в морской воде от фактора разнорзернистости для образцов, изготовленных из конструкционной стали

Fig. 17. Dependence of the corrosion rate in seawater on the grain size variation factor for samples made of structural steel

ленном на рис. 18 [21]. Данный график зависимости получен при анализе рентгеновских дифрактограмм [34].

Для образца, изготовленного из стали Ст3, выпадение может быть объяснено тем, что при высоком отпуске происходит процесс коагуля-

ции частиц цементита. При этом средний размер зерна начинает увеличиваться. Структура приближается к равновесному состоянию [22–25], обуславливая уменьшение величины внутренних напряжений и числа зерен, увеличение их размеров и границ между ними. Процесс оста-

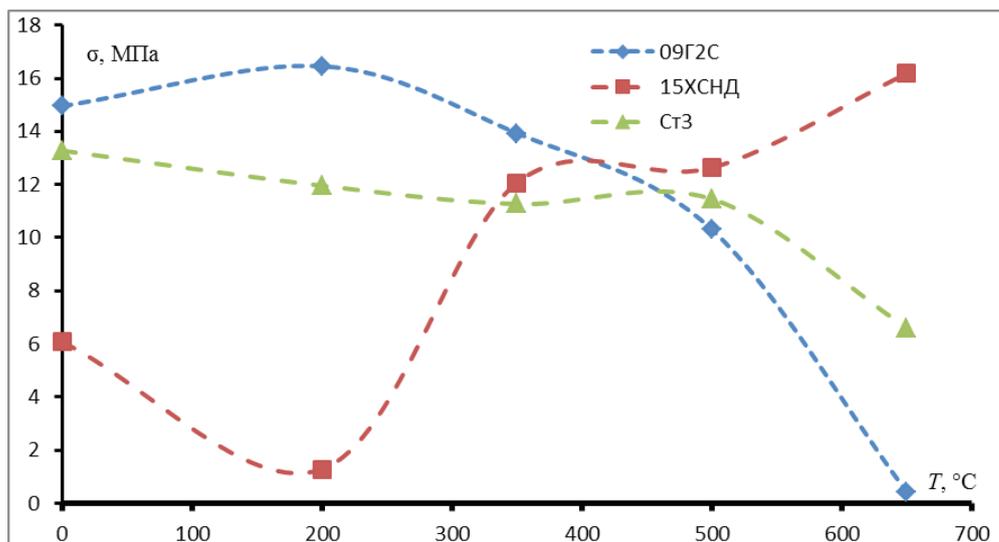


Рис. 18. Зависимость величины внутренних напряжений от температуры отпуска

Fig. 18. Dependence of the internal stress value on the tempering temperature

навливаются при достижении зерном «критического размера». Из-за уменьшения числа зерен, увеличения их размеров и увеличения границ между ними происходит уменьшение внутренних напряжений, что также сказывается на искаженности кристаллической структуры и приводит к уменьшению скорости коррозии стали.

Выводы

1. Согласно полученным данным установлено, что для скорости коррозии конструкционных сталей и фактора разнотерности наблюдается удовлетворительная корреляция.

2. Результаты работы показали, что выпадение точек из общей зависимости для исследуемых сталей происходит при различных температурах: 15ХСНД – образец с закалкой; Ст3 – образец с отпуском при 650 °С; 09Г2С – образец с отпуском при 350 °С. Наблюдаемые выпадения значений на корреляционной кривой могут быть связаны с процессами уменьшения искажений в кристаллической решетке стали при термической обработке. Выраженность этих процессов для рассматриваемых сталей может быть различной из-за наличия в их составе разного количества легирующих элементов.

3. Представленную работу в некотором смысле можно рассматривать как концепцию развития структурного определения коррозионной активности сталей и, следовательно, предсказания коррозионно-опасных состояний конструкций.

Список литературы

1. Малахов А.И., Жуков А.П. Основы материаловедения и теория коррозии. – М.: Высшая школа, 1989. – 516 с.
2. Коррозия резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов / Д. Нестеров, М. Сидорчук, В. Миллионщиков, Т. Беликова, Н. Ястребова // ТехНадзор. – 2015. – № 11 (108). – С. 540–541.
3. Nalli K. Corrosion and its mitigation in the oil and gas industry. An overview // PetroMin Pipeliner Report. – 2010. – January–March. – P. 10–16.
4. Коллаком Р.А. Диагностика повреждений. – М.: Мир, 1989. – 512 с.
5. Жук Н.П. Курс коррозии и защиты металлов. – М.: Металлургия, 1976. – 472 с.
6. Intelligent coatings for corrosion control / ed. by A. Tiwari, L. Hihara, J. Rawlins. – Amsterdam: Butterworth-Heinemann, 2014. – 746 p. – ISBN 9780124114678.
7. Polyanchukov V.G. Modern corrosion monitoring of complex systems in acid media – the bridge into the 21st century // Werkstoffe und Korrosion. – 2001. – Vol. 52, N 2. – P. 117–123.
8. Application of the multichannel electrode method to monitoring of corrosion of steel in an artificial crevice / A. Naganuma, K. Fushimi, K. Azumi, H. Habazaki, H. Konno // Corrosion Science. – 2010. – Vol. 52, N 4. – P. 1179–1186. – DOI: 10.1016/j.corsci.2010.01.005.
9. Introduction to corrosion monitoring // Metal Samples: Corrosion Monitoring Systems. – Munford, AL, 2013. – URL: www.alspi.com/introduction.htm (accessed: 18.08.2020).
10. Steel bar corrosion monitoring by potentiostatic pulse method / L. Kong, G. Qiao, T. Zhang, G. Song // Advanced Materials Research. – 2011. – Vol. 163–167. –

P. 2941–2944. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.163-167.2941.

11. Новиков В.Ф., Нерадовский Д.Ф., Соколов Р.А. Использование квазистатических петель магнитного гистерезиса для контроля структуры стали // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. – 2016. – Т. 18, № 2. – С. 38–49. – DOI: 10/15593/2224-9877/2016.2.03.

12. Помазова А.В., Панова Т.В., Геринг Г.И. Роль факторов формы зеренной структуры в электрохимической коррозии котельных труб, изготовленных из углеродистой стали 20 // Практика противокоррозионной защиты. – 2013. – № 3 (69). – С. 68–71.

13. A technique for predicting steel corrosion resistance / V.F. Novikov, R.A. Sokolov, D.F. Neradovskiy, K.R. Muratov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 289. – P. 1–6. – DOI: 10.1088/1757-899X/289/1/012013.

14. Li Y., Wang F.G., Liu G. Grain size effect on the electrochemical corrosion behavior of surface nanocrystallized low-carbon steel // Corrosion. – 2004. – Vol. 60, N 10. – P. 891–896. – DOI: 10.5006/1.3287822.

15. The effect of the structure-phase state of iron-cementite nanocomposites on local activation processes / A.V. Syugaev, S.F. Lomaeva, S.M. Reshetnikov, A.S. Shuravin, E.V. Sharafeeva, D.V. Surnin // Protection of Metals. – 2008. – Vol. 44, N 4. – P. 395–399. – DOI: 10.1134/S0033173208040097.

16. ГОСТ 5639–82. Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна: введ. 1983–01–01. – М.: Изд-во стандартов, 2003. – 45 с.

17. Лезинская Е.Я. Методы оценки структурной неоднородности металла труб оболочек ТВЭЛ и чехлов ТВС из коррозионно-стойких сталей и сплавов // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. – 2003. – Вып. 3. – С. 108–112.

18. Лезинская Е.Я., Клюев Д.Ю., Николаенко Ю.Н. Новый метод оценки разнородности структуры труб из нержавеющей сталей и сплавов // Теория и практика металлургии. – 2012. – № 1. – С. 68–73.

19. Гроховский В.И. Возможности цифровой микроскопии в металлографии // Цифровая микроскопия: материалы школы семинара. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2001. – Ч. 1. – С. 18–20.

20. ГОСТ 9.008–85. ЕСЗКС. Металлы и сплавы. Методы определения показателей коррозии и коррозионной стойкости. – М.: Изд-во стандартов, 2004. – 44 с.

21. Influence of surface treatment of construction steels on determination of internal stresses and grain

sizes using X-ray diffractometry method / R.A. Sokolov, V.F. Novikov, K.R. Muratov, A.N. Venediktov // Materials Today: Proceedings. – 2019. – Vol. 19, pt. 5. – P. 2584–2585. – DOI: 10.1016/j.matpr.2019.09.015.

22. Счастливцев В.М., Мирзаев Д.А., Яковлева И.Л. Структура термически обработанной стали. – М.: Металлургия, 1994. – 288 с.

23. Callister W.D. Materials science and engineering: an introduction. – 6th ed. – Hoboken, NJ: Wiley, 2020. – 848 p. – ISBN 978-0471135760.

24. Горелик С.С. Рекристаллизация металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1978. – 568 с.

25. Phase and structural transformations in low-carbon martensitic steels / L.M. Kleiner, D.M. Larinin, L.V. Spivak, A.A. Shatsov // The Physics of Metals and Metallography. – 2009. – Vol. 108. – P. 153–160. – DOI: 10.1134/S0031918X09080080.

26. Влияние зернограницных сегрегаций на температуры мартенситного превращения в бикристаллах NiTi / Р.И. Бабичева, А.С. Семенов, С.В. Дмитриев, К. Жой // Письма о материалах. – 2019. – Т. 9, № 2. – С. 162–167. – DOI: 10.22226/2410-3535-2019-2-162-167.

27. Wollenberger H.J. Point defects // Physical Metallurgy. / ed. by R.W. Cahn, P. Haasen. – Amsterdam: Elsevier, 1996. – Vol. 2. – P. 1621–1721. – DOI: 10.1016/B978-044489875-3/50023-5.

28. Rohrer G.S. Structure and bonding in crystalline materials. – Cambridge; New York: Cambridge University Press, 2004. – 552 p. – DOI: 10.1017/CBO9780511816116. – ISBN 9780511816116.

29. Новиков И.И. Дефекты кристаллического строения металлов. – М.: Металлургия, 1975. – 208 с.

30. Gao F., Heinisch H., Kurtz R.J. Diffusion of He interstitials in grain boundaries in α -Fe // Journal of Nuclear Materials. – 2006. – Vol. 351. – P. 133–140. – DOI: 10.1016/j.jnucmat.2006.02.015.

31. Hart E.W. On the role of dislocations in bulk diffusion // Acta Metallurgica. – 1957. – Vol. 5, iss. 10. – P. 597. – DOI: 10.1016/0001-6160(57)90127-X.

32. Courtney T.H. Mechanical behavior of materials. – Singapore: McGraw Hill, 2000. – 752 p. – ISBN 978-1577664253.

33. Study of defect evolution by TEM with in situ ion irradiation and coordinated modeling / M. Li, M.A. Kirk, P.M. Baldo, D. Xu, B.D. Wirth // Philosophical Magazine. – 2012. – Vol. 92. – P. 2048–2078. – DOI: 10.1080/14786435.2012.662601.

34. Noyan I.C., Cohen J.B. Residual stress – measurement by diffraction and interpretation. – New York: Springer-Verlag, 1987. – 285 p. – ISBN 978-1-4613-9570-6.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2020 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Determination of the Relationship between the Factor of Grain Size Factor and the Corrosion Rate of Structural Steel

Roman Sokolov^{a, *}, Vitaly Novikov^b, Kamil Muratov^c, Anatolii Venediktov^d

Tyumen Industrial University, 38 Volodarskogo str., Tyumen, 625000, Russian Federation

^a  <https://orcid.org/0000-0001-5867-8170>,  falcon.rs@mail.ru, ^b  <https://orcid.org/0000-0002-1987-351X>,  vitaly.nowikov2017@yandex.ru,
^c  <https://orcid.org/0000-0002-8079-2022>,  muratows@mail.ru, ^d  <https://orcid.org/0000-0002-6899-4297>,  annattoliy@gmail.com

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 28 May 2020

Revised: 18 June 2020

Accepted: 15 August 2020

Available online: 15 September 2020

Keywords:

SEM

Tempering temperature

Grain size variation factor

Gravimetric method

Grain boundaries

Grain size

Corrosion rate

ABSTRACT

Introduction: Equipment using at hazardous production facilities is in most cases made of the structural steels, which are subject to severe corrosion damage in contact with aggressive environments. In aggressive environments, the process of corrosion destruction of the material has a multi-component nature. The multicomponent nature of corrosion processes still leaves the question as to what factors have a greater effect on the process of corrosion. In the literature, the size of the grain structure is indicated as the main corrosion-determining factor. However, in addition to the sizes of the grain, corrosion is also affected by the corresponding factor of grain size variation, characterizing the dispersion of the system as a whole. Therefore, differentiation of factors affecting the course of corrosion processes remains an urgent problem. **Purpose:** To analyze the possibility of using the grain size variation factor as a diagnostic parameter for determining the rate of the corrosive destruction of structural steel. **In article were studied** a heat-treated steel samples 15HSND, 09G2S and St3 made from rolled steel. **Methods of research:** For the study of steels 15KHSND, St3 and 09G2S was applied in the work: scanning electron and optical microscopes-to study the grain structure and intergranular boundaries; SIAMS 700 software package-to find the boundaries and average statistical data on the grain structure; a portable x-ray fluorescence chemical analyzer-to determine the chemical composition of the samples under study; laboratory balance with a measurement error of 0.001 g – to measure the mass of the samples. **Results and Discussion:** It is established that for the rate of corrosion of structural steels and the factor of heterogeneity, a single satisfactory linear correlation is observed, which can be used to predict the corrosion-hazardous States of structures. It is noted that the loss of some values from the General regression curve can be associated with the processes of reducing distortions in the crystal lattices of steel during a certain heat treatment. The severity of these processes for the considered steels may be different due to the presence of different amounts of alloying elements in their composition.

For citation: Sokolov R.A., Novikov V.F., Muratov K.R., Venediktov A.N. Determination of the relationship between the factor of grain size factor and the corrosion rate of structural steel. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2020, vol. 22, no. 3, pp. 106–125. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.3-106-125. (In Russian).

References

1. Malakhov A.I., Zhukov A.P. *Osnovy materialovedeniya i teoriya korrozii* [Fundamentals of materials science and corrosion theory]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1989. 516 p.
2. Nesterov D., Sidorchuk M., Millionshchikov V., Belikova T., Yastrebova N. Korroziya rezervuarov dlya khraneniya nefiti i nefteproduktov [Corrosion of tanks for oil and petroleum products]. *Tekhnadzor = Technical Supervision*, 2015, no. 11 (108), pp. 540–541.
3. Nalli K. Corrosion and its mitigation in the oil and gas industry. An overview. *PetroMin Pipeliner Report*, 2010, January–March, pp. 10–16.

* Corresponding author

Sokolov Roman A., Post-graduate Student, Assistant
 Tyumen Industrial University,
 38 Volodarskogo str.,
 625000, Tyumen, Russian Federation
 Tel.: +7-919-925-88-47, e-mail: falcon.rs@mail.ru

4. Collacott R.A. *Structural integrity monitoring*. London, New York, Chapman and Hall, 1985 (Russ. ed.: Kollakot R.A. *Diagnostika povrezhdenii*. Moscow, Mir Publ., 1989. 512 p.).
5. Zhuk N.P. *Kurs korrozii i zashchity metallov* [The rate of corrosion and protection of metals]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1976. 472 p.
6. Tiwari A., Hihara L., Rawlins J., eds. *Intelligent coatings for corrosion control*. Amsterdam, Butterworth-Heinemann, 2014. 746 p. ISBN 9780124114678.
7. Polyanchukov V.G. Modern corrosion monitoring of complex systems in acid media – the bridge into the 21st century. *Werkstoffe und Korrosion*, 2001, vol. 52, no. 2, pp. 117–123.
8. Naganuma A., Fushimi K., Azumi K., Habazaki H., Konno H. Application of the multichannel electrode method to monitoring of corrosion of steel in an artificial crevice. *Corrosion Science*, 2010, vol. 52, no. 4, pp. 1179–1186. DOI: 10.1016/j.corsci.2010.01.005.
9. Introduction to corrosion monitoring. *Metal Samples: Corrosion Monitoring Systems*. Munford, AL, 2013. Available at: www.alspi.com/introduction.htm (accessed 18.08.2020).
10. Kong L., Qiao G., Zhang T., Song G. Steel bar corrosion monitoring by potentiostatic pulse method. *Advanced Materials Research*, 2011, vol. 163–167, pp. 2941–2944. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.163-167.2941.
11. Novikov V.F., Neradovskii D.F., Sokolov R.A. Ispol'zovanie kvazistaticheskikh petel' magnitnogo gisterезisa dlya kontrolya struktury stali [The using of quasi-static magnetic hysteresis loops to control steel structures]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie = Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2016, vol. 18, no. 2, pp. 38–49. DOI: 10/15593/2224-9877/2016.2.03.
12. Pomazova A.V., Panova T.V., Gering G.I. Rol' faktorov formy zerennoi struktury v elektrokhimicheskoi korrozii kotel'nykh trub, izgotovlennykh iz uglerodistoi stali 20 [Role of grain structure form factors in electrochemical corrosion of boiler tubes made of carbon steel 20]. *Praktika protivokorroziionnoi zashchity = Theory and Practice of Corrosion Protection*, 2013, no. 3 (69), pp. 68–71.
13. Novikov V.F., Sokolov R.A., Neradovskiy D.F., Muratov K.R. A technique for predicting steel corrosion resistance. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 289, pp. 1–6. DOI: 10.1088/1757-899X/289/1/012013.
14. Li Y., Wang F.G., Liu G. Grain size effect on the electrochemical corrosion behavior of surface nanocrystallized low-carbon steel. *Corrosion*, 2004, vol. 60, no. 10, pp. 891–896. DOI: 10.5006/1.3287822.
15. Syugaev A.V., Lomaeva S.F., Reshetnikov S.M., Shuravin A.S., Sharafeeva E.V., Surnin D.V. The effect of the structure-phase state of iron-cementite nanocomposites on local activation processes. *Protection of Metals*, 2008, vol. 44, no. 4, pp. 395–399. DOI: 10.1134/S0033173208040097.
16. *GOST 5639–82. Stali i splavy. Metody vyyavleniya i opredeleniya velichiny zerna* [State Standard 5639–82. Steels and alloys. Methods of detection and determination of grain size]. Moscow, Standads Publ., 2003. 45 p.
17. Lezinskaya E.Ya. Metody otsenki strukturnoi neodnorodnosti metalla trub obolochek TVEL i chekhlov TVS iz korroziionno-stoikikh staley i splavov [Evaluation methods for structure non uniformity of metal for cladding tubes and wrapper of corrosion-resistant steels and alloys]. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Seriya: Fizika radiatsionnykh povrezhdenii i radiatsionnoe materialovedenie = Problems of Atomic Science and Technology. Physics of Radiation Effects and Radiation Materials Science*, 2003, no. 3, pp. 108–112. (In Russian).
18. Lezinskaya E.Ya., Klyuev D.Yu., Nikolaenko Yu.N. Novyi metod otsenki raznozernistosti struktury trub iz nerzhavayushchikh staley i splavov [New method for assessing the inequigranular structure of pipes of stainless steels and alloys]. *Teoriya i praktika metallurgii = Theory and Practice of Metallurgy*, 2012, no. 1, pp. 68–73. (In Russian).
19. Grokhovskiy V.I. [Possibilities of digital microscopy in metallography]. *Tsifrovaya mikroskopiya: materialy shkoly seminara* [Digital microscopy. School-seminar materials]. Ekaterinburg, USTU-UPI Publ., 2001, pt. 1, pp. 18–20. (In Russian).
20. *GOST 9.008–85. ESZKS. Metally i splavy. Metody opredeleniya pokazatelei korrozii i korroziionnoi stoikosti* [State Standard 9.008–85. Unified system of corrosion and ageing protection. Metals and alloys. Methods for determination of corrosion and corrosion resistance indices]. Moscow, Standards Publ., 2004. 44 p.
21. Sokolov R.A., Novikov V.F., Muratov K.R., Venediktov A.N. Influence of surface treatment of construction steels on determination of internal stresses and grain sizes using X-ray diffractometry method. *Materials Today: Proceedings*, 2019, vol. 19, pt. 5, pp. 2584–2585. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.09.015.
22. Schastlivtsev V.M., Mirzaev D.A., Yakovleva I.L. *Struktura termicheskoi obrabotannoi stali* [Structure of heat treated steel]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1994. 288 p.
23. Callister W.D. *Materials science and engineering: an introduction*. 6th ed. Hoboken, NJ, Wiley, 2020. 848 p. ISBN 978-0471135760.

24. Gorelik S.S. *Rekristallizatsiya metallov i splavov* [Recrystallization of metals and alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1978. 568 p.
25. Kleiner L.M., Larinin D.M., Spivak L.V., Shatsov A.A. Phase and structural transformations in low-carbon martensitic steels. *The Physics of Metals and Metallography*, 2009, vol. 108, pp. 153–160. DOI: 10.1134/S0031918X09080080.
26. Babicheva R.I., Semenov A.S., Dmitriev S.V., Zhou K. Vliyanie zernogranichnykh segregatsii na temperatury martensitnogo prevrashcheniya v bikristallakh NiTi [Effect of grain boundary segregations on martensitic transformation temperatures in NiTi bi-crystals]. *Pis'ma o materialakh = Letters on Materials*, 2019, vol. 9, no. 2, pp. 162–167. DOI: 10.22226/2410-3535-2019-2-162-167.
27. Wollenberger H.J. Point defects. *Physical Metallurgy*. Ed. by R.W. Cahn, P. Haasen. Amsterdam, Elsevier, 1996, vol. 2, pp. 1621–1721. DOI: 10.1016/B978-044489875-3/50023-5.
28. Rohrer G.S. *Structure and bonding in crystalline materials*. Cambridge, New York, Cambridge University Press, 2004. 552 p. DOI: 10.1017/CBO9780511816116. ISBN 9780511816116.
29. Novikov I.I. *Defekty kristallicheskogo stroeniya metallov* [Defects in the crystal structure of metals]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1975. 208 p.
30. Gao F., Heinisch H., Kurtz R.J. Diffusion of He interstitials in grain boundaries in α -Fe. *Journal of Nuclear Materials*, 2006, vol. 351, pp. 133–140. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2006.02.015.
31. Hart E.W. On the role of dislocations in bulk diffusion. *Acta Metallurgica*, 1957, vol. 5, iss. 10, p. 597. DOI: 10.1016/0001-6160(57)90127-X.
32. Courtney T.H. *Mechanical behavior of materials*. Singapore, McGraw Hill, 2000. 752 p. ISBN 978-1577664253.
33. Li M., Kirk M.A., Baldo P.M., Xu D., Wirth B.D. Study of defect evolution by TEM with in situ ion irradiation and coordinated modeling. *Philosophical Magazine*, 2012, vol. 92, pp. 2048–2078. DOI: 10.1080/14786435.2012.662601.
34. Noyan I.C., Cohen J.B. *Residual stress – measurement by diffraction and interpretation*. New York, Springer-Verlag, 1987. 285 p. ISBN 978-1-4613-9570-6.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2020 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).