

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2022-88-12-44-50>

ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРОЗИОННЫХ СВОЙСТВ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

© Роман Александрович Соколов*, Виталий Фёдорович Новиков,
Камиль Рахимчанович Муратов

Тюменский индустриальный университет, Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, д. 38; *e-mail: falcon.rs@mail.ru

*Статья поступила 20 июня 2022 г. Поступила после доработки 29 июня 2022 г.
Принята к публикации 27 сентября 2022 г.*

Неоднородности кристаллической структуры и химического состава, наличие примесных элементов, образующих включения, вызывают отклонения свойств объекта контроля от требуемых физико-механических параметров. Это существенно сказывается на надежности и сроке эксплуатации изделия. В работе представлены результаты исследования склонности конструкционных сталей к коррозии в агрессивной среде с использованием магнитных характеристик. В процессе термообработки сталь претерпевает структурно-фазовые превращения, меняющие ее свойства, включая магнитные и коррозионные. Исследовали термообработанные образцы сталей 09Г2С, Ст3, 15ХСНД. Кроме основного магнитного параметра — коэрцитивной силы, использовали также спектральные характеристики образцов, полученные с помощью кривой перемагничивания — петли магнитного гистерезиса. Для выявления связи скорости коррозии и коэрцитивной силы применяли многопараметровый подход с гармоническими составляющими в качестве диагностических параметров. Определение скорости коррозии в данном случае может быть сведено к классическим задачам технической диагностики. Установлено, что комплексный параметр, основанный на гармонических составляющих, полученных с использованием петли магнитного гистерезиса, и скорость коррозии имеют выраженную взаимосвязь. Выявленная взаимозависимость позволяет разработать неразрушающий метод прогноза коррозионной стойкости конструкционных сталей. Полученные результаты могут быть использованы для совершенствования экспресс-метода определения коррозионно-опасных зон сталей с помощью магнитных параметров.

Ключевые слова: коэрцитивная сила; остаточная намагниченность; скорость коррозии; прогнозирование; структурно-фазовый состав; внутренние напряжения.

STUDY OF THE CORROSION PROPERTIES OF STRUCTURAL STEELS USING MAGNETIC CHARACTERISTICS

© Roman A. Sokolov*, Vitaly F. Novikov, Kamil R. Muratov

Tyumen Industrial University, 38, ul. Volodarskogo, Tyumen, 625000, Russia; e-mail: falcon.rs@mail.ru

Received June 20, 2022. Revised June 29, 2022. Accepted September 27, 2022.

Heterogeneities of the crystal structure and chemical composition, as well as the impurity elements forming inclusions cause deviations of the properties of test object from the required physical and mechanical parameters which significantly affects the reliability and service life of the product. We present the results of studying the susceptibility of structural steels to corrosion in aggressive environment using their magnetic characteristics. Structural-phase transformations occurred in steels under the effect of heat treatment change their properties, including magnetic and corrosion ones. Heat-treated 09G2S, St3, 15XSND steel samples were studied. In addition to the main magnetic parameter — coercive force, we also used spectral characteristics of the samples obtained using a remagnetization curve, magnetic hysteresis loop. The multi-parameter approach with harmonic components was used to identify the corrosion rate and coercive force correlation. Determination of the corrosion rate in this case can be reduced to classical problems of technical diagnostics. It is shown that a complex parameter based on harmonic components obtained using a magnetic hysteresis loop and the corrosion rate exhibit a pronounced correlation which provide developing a non-destructive method for predicting the corrosion resistance of structural steels. The results obtained can be used to improve the rapid method for determining the corrosion-hazardous zones of steels using the magnetic parameters.

Keywords: coercivity; residual magnetization; corrosion rate; forecasting; structural and phase composition; internal stresses.

Введение

Оборудование, применяемое на опасных производственных объектах, в большинстве случаев используется в агрессивных внешних условиях либо работает с агрессивными средами, контакт с которыми приводит к возникновению коррозионных процессов [1].

Так, при эксплуатации стальных вертикальных резервуаров нередки случаи, когда через некоторое время (менее расчетного периода эксплуатации) резервуар оказывается полупустым, что связано с различными типами протекающих процессов коррозии [2]. При этом в результате разлива нефтепродуктов создается неблагоприятная экологическая ситуация, требующая существенных усилий для ее устранения, а также компенсации возможного ущерба [3].

Значительные коррозионные повреждения наблюдаются на оборудовании при транспортировке углеводородов. На рис. 1 приведено количество коррозионных дефектов по длине участка газопровода Ямбург – Елец 1.

Процесс коррозии включает в себя множество отдельных механизмов [1, 4, 5]. Вместе с тем для определения коррозионных свойств металла в различных средах универсальные подходы отсутствуют. Существующие методы хотя и разнообразны по способам проведения коррозионных испытаний, однако определяют коррозионные характеристики относительно выбранной среды [6 – 12, 22, 24].

При исследовании коррозии используют как разрушающие, так и неразрушающие методы контроля. Среди методов контроля коррозионных свойств стали отметим гравиметрический, металлографический, методы определения элек-

трохимического потенциала [4, 5, 19]. Основные их недостатки — большая временная затратность и высокие погрешности (метод определения химического потенциала) при определении скорости коррозии. Часто применяют также методы контроля, основанные на мониторинге состояния датчиков и регистрации ультразвуковых колебаний [7, 8, 10].

Заметим, что для увеличения скорости проведения испытаний необходимы универсальные косвенные параметры, позволяющие быстро осуществлять неразрушающий контроль склонности металла к коррозии независимо от коррозионной среды.

Разрушение металлов в результате коррозии при контакте с электролитами во многом определяется размерами зернистой структуры и дисперсностью системы [1, 5, 9, 25]. Эти же параметры оказывают значительное влияние на величину коэрцитивной силы, остаточной намагниченности и других магнитных характеристик стали [4, 5].

Многие магнитные параметры могут быть определены с помощью петли магнитного гистерезиса [6, 23, 24]. Полученные при этом гармонические составляющие можно использовать для контроля коррозионных свойств.

Цель работы — исследование скорости коррозии конструкционных сталей в агрессивной среде с использованием спектральных характеристик.

Материалы, методика, оборудование

Исследовали образцы, изготовленные из листового проката конструкционных сталей 09Г2С, Ст3, 15ХСНД. Термообработку образцов проводили путем нагрева до температуры 930 ± 20 °C

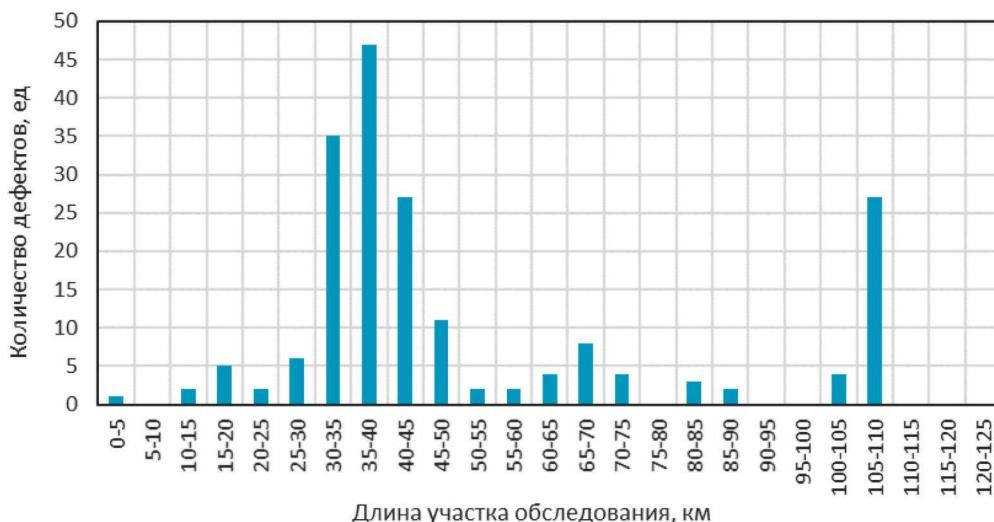


Рис. 1. Количество коррозионных дефектов по длине участка обследования газопровода Ямбург – Елец 1

Fig. 1. Corrosion damage along the section of the Yamburg – Yelets 1 gas pipeline

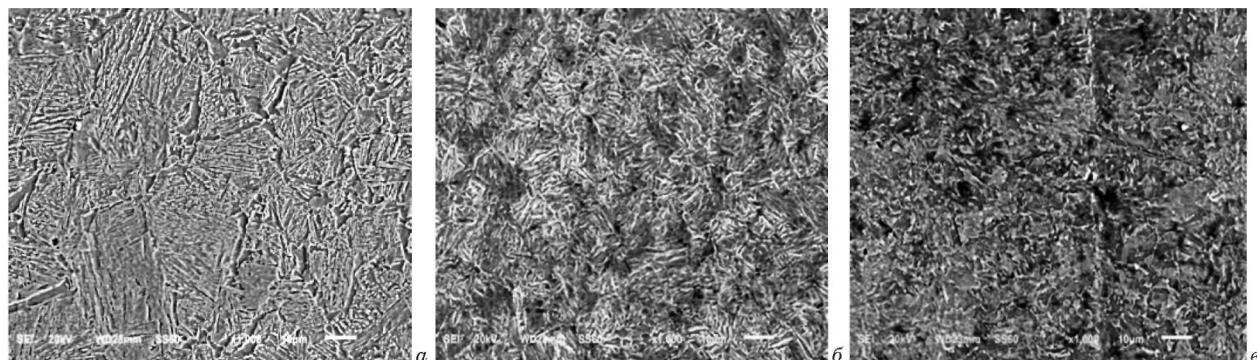


Рис. 2. Структуры термообработанных образцов стали 15ХСНД: *а* — закаленный образец; *б, в* — образцы при температурах отпуска 350 и 650 °С ($\times 1000$)

Fig. 2. The structure of heat-treated samples of 15XCND steel: *a* — hardened sample; *b, c* — samples at a tempering temperature of 350 and 650°C ($\times 1000$)

(выдержка — 15 мин) и быстрого охлаждения в воде. Закаленные образцы отпускались в течение 1 ч с охлаждением на воздухе при температурах 200, 350, 500 и 650 °С.

Структуру материала анализировали с использованием растрового электронного микроскопа JEOL 6008A. Для выявления микроструктуры образцы обрабатывали 3 %-ным раствором азотной кислоты (рис. 2).

Химический состав определяли с помощью рентгенофлюоресцентного химического анализатора X-MET 5100 (Oxford Instruments). Показатели содержания углерода, серы и фосфора использовали из сертификатов качества на исследуемые стали. Так, содержание углерода составляло 0,11 – 0,16 %.

При помощи аппаратно-программной системы магнитной структуроскопии DIUS-1.15M, использующей замкнутую магнитную цепь, получали петли магнитного гистерезиса и определяли другие магнитные характеристики исследуемых образцов.

Коррозионные испытания проводили в лабораторных условиях в течение 31 дня. В качестве агрессивной среды использовали морскую воду (содержание соли — 34 г/л), приготовленную путем растворения природной морской соли верхнекамского месторождения с микроэлементами в дистиллированной воде [27].

Массу образцов измеряли до и после испытаний на весах SHIMADZU UW620h (погрешность — 0,001 г). Геометрические размеры образцов определяли при помощи штангенциркуля.

При испытаниях в агрессивной среде образцы не находились в прямом контакте друг с другом для исключения взаимного влияния (ГОСТ 9.008–85). Для уменьшения возникающих погрешностей измерений и устранения влияния термической и механической обработки поверх-

ности на конечный результат эксперимент проводили три раза.

В качестве критерия оценки коррозионного разрушения использовали скорость коррозии:

$$v = \frac{\Delta m}{St}, \quad (1)$$

где Δm — относительная убыль массы образца; S — площадь поверхности образца, контактирующей с агрессивной средой; t — время контакта образца с агрессивной средой.

Гармонические составляющие получали с помощью петли магнитного гистерезиса (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022612165) путем представления исходных данных в виде псевдовременного сигнала и его обработки с использованием спектральной функции Фурье, учитывающей различный шаг дискретизации [23].

Обсуждение результатов

На рис. 3 приведены зависимости скорости коррозии исследуемых образцов в морской воде от температуры отпуска. Видно, что скорость коррозии наибольшим образом меняется при среднем отпуске. Схожие закономерности между результатами коррозионных испытаний для сталей 09Г2С и Ст3, видимо, связаны с изменением коррозионных свойств при изменении структурного состояния материала.

Кроме того, для сталей 09Г2С и Ст3 наблюдается увеличение скорости коррозии на 350 °С, а для 15ХСНД — уменьшение, что, возможно, связано с процессами коагуляции и сфероидизации частиц цементита [20 – 22]. Это происходит вследствие изменений величины внутренних напряжений.

Зависимости внутренних напряжений от температуры отпуска представлены на рис. 4 [19].

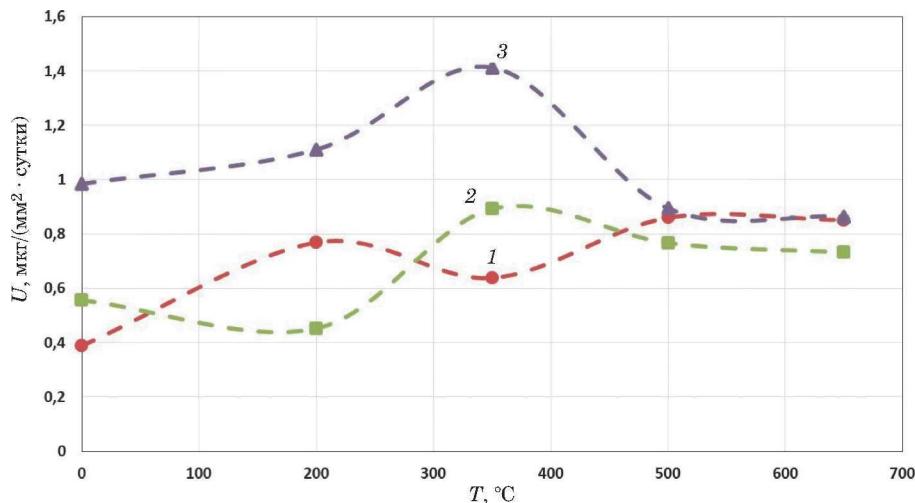


Рис. 3. Зависимости скорости коррозии U образцов сталей 15ХНСД (1), Ст3 (2), 09Г2С (3) от температуры отпуска T
Fig. 3. Dependences of the corrosion rate U of steel samples 15HSD (1), St3 (2), 09G2S (3) on the tempering temperature T

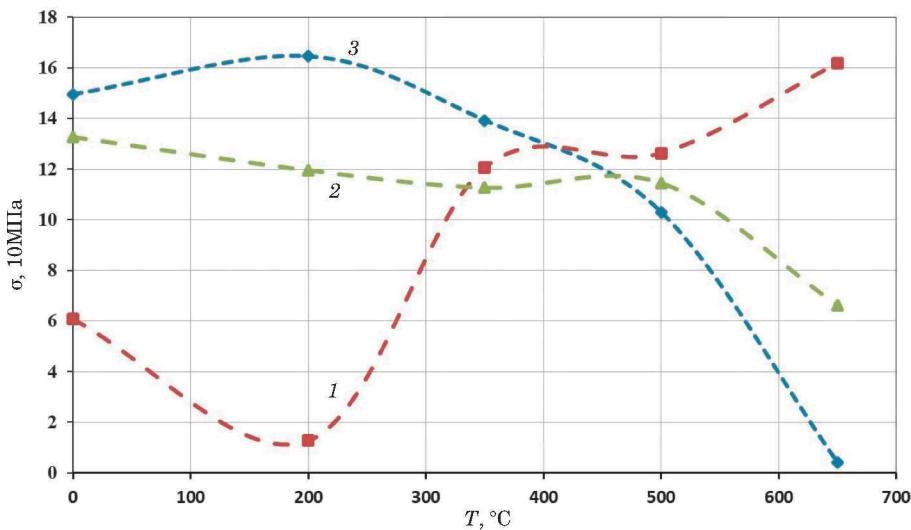


Рис. 4. Зависимости величины внутренних напряжений σ от температуры отпуска T для образцов сталей 15ХНСД (1), Ст3 (2), 09Г2С (3)
Fig. 4. Dependences of the value of internal stresses σ on the tempering temperature T for steel samples 15HSD (1), St3 (2), 09G2S (3)

Отметим, что зависимости получены при анализе рентгеновских дифрактограмм [28].

Для контроля различных характеристик стали (твердости, предела упругости, предела прочности, пластичности), а также напряженно-деформированного состояния часто используют коэрцитивную силу [26]. На рис. 5 приведены зависимости коэрцитивной силы от скорости коррозии образцов в морской воде. Видно, что общей зависимости между коэрцитивной силой и скоростью коррозии не прослеживается. Это говорит о неприменимости коэрцитивной силы в качестве универсального параметра для контроля коррозионных свойств.

Определение скорости коррозии с использованием магнитных характеристик может быть сведено к задачам технической диагностики, поскольку анализ петли магнитного гистерезиса позволяет получить достаточное количество параметров, а спектральный анализ — гармонические составляющие. Если рассматривать значения амплитуд гармоник как оси координат в некотором пространстве признаков, то функцию преобразования пространства признаков в диагностическое пространство можно представить некоторым параметром P [21]. Это позволяет понизить размерность по отношению к пространству признаков. Положение в той или иной точке этого

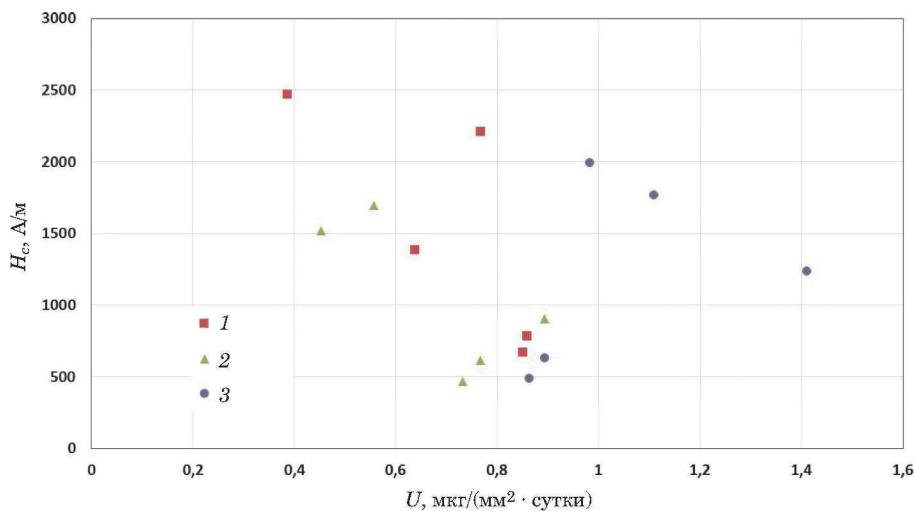


Рис. 5. Зависимости коэрцитивной силы H_c от скорости коррозии U для образцов сталей 15ХНСД (1), Ст3 (2), 09Г2С (3)

Fig. 5. Dependences of the coercive force H_c on the corrosion rate U for steel samples 15XSND (1), St3 (2), 09G2S (3)

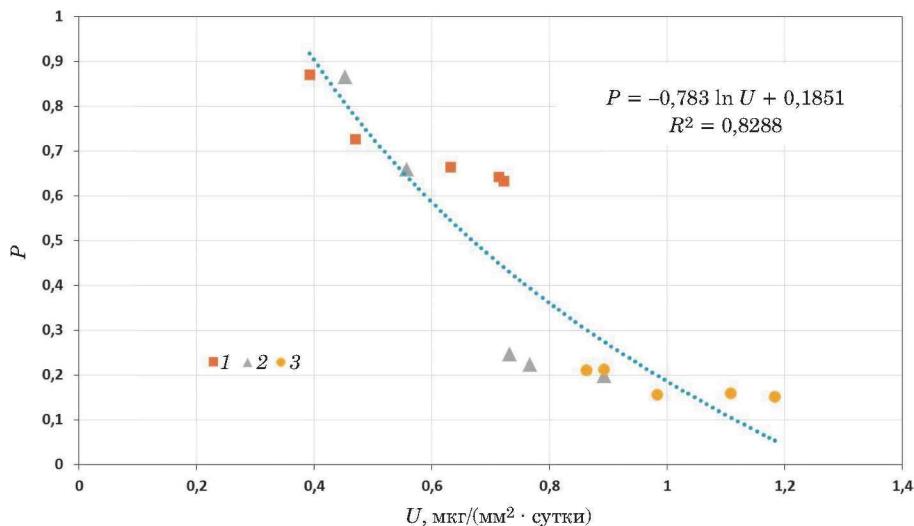


Рис. 6. Зависимость комплексного параметра P от скорости коррозии U для образцов сталей 15ХНСД (1), Ст3 (2), 09Г2С (3)

Fig. 6. Dependences of the complex parameter P on the corrosion rate U for steel samples 15XSND (1), St3 (2), 09G2S (3)

пространства будет отражать соответствующую скорость коррозии стали в агрессивной среде.

Заметим, что параметр P включает в себя несколько диагностических характеристик (гармонических составляющих). Определение его функциональной зависимости во многом схоже с процессом определения новых осей в методе главных компонент.

Зависимость комплексного параметра P от скорости коррозии исследуемых образцов в морской воде представлена на рис. 6.

Видно, что комплексный параметр $P = (A_1^2 + A_3^2 + A_5^2)^{1/2}$ (A_n — нечетная гармоническая составляющая) имеет тесную связь со скоростью коррозии по сравнению с коэрцитивной силой.

Наблюдаемая регрессионная зависимость, которая описывается степенной функцией, возможно, свидетельствует о том, что характер взаимодействия выбранных конструкционных сталей с агрессивной средой один и тот же. Это в свою очередь может указывать на то, что механизмы протекания процессов коррозии в поверхностных слоях рассматриваемых образцов схожи. Отметим, что выпадение точек из общей зависимости, вероятно, связано с различиями в химическом составе образцов. Вместе с тем необходимо учитывать, что статистические данные о скорости коррозии исследуемых сталей в морской воде отсутствуют.

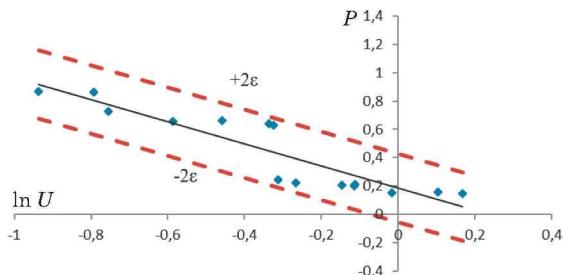


Рис. 7. Зависимость комплексного параметра P от скорости коррозии $\ln U$ при доверительной вероятности 95 %

Fig. 7. Dependence of the complex parameter P on the corrosion rate $\ln U$ at a confidence level 95 %

Регрессионный анализ зависимости параметра P от скорости коррозии в морской воде проводили, используя следующие значения: множественный $R = 0,91$; $R^2 = 0,83$; нормированный $R^2 = 0,82$; стандартная ошибка — 0,11; количество наблюдений — 15.

С учетом стандартной ошибки регрессии уравнение, характеризующее регрессионную модель, примет вид

$$Y = \alpha \ln X + \beta \pm \varepsilon, \quad (2)$$

где X — значение величины по оси абсцисс; α — нормировочный коэффициент; β — свободный член уравнения; ε — стандартная ошибка.

В данном случае $\varepsilon = 0,11$.

На рис. 7 приведена зависимость P от скорости коррозии образцов при доверительной вероятности 95 %.

Заключение

Проведенные исследования показали, что для скорости коррозии конструкционных сталей 15ХНСД, Ст3, 09Г2С и комплексного параметра, полученного на основе амплитудных составляющих гармонического сигнала, наблюдается достаточно тесная взаимосвязь. Выпадение некоторых значений на корреляционной кривой может быть связано с уменьшением искажений в кристаллической решетке сталей при термической обработке. Вместе с тем выраженность этих процессов для рассматриваемых образцов может различаться вследствие наличия в их составе разного количества легирующих элементов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Несторов Д., Сидорчук М., Миллионников В. и др. Коррозия резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов / ТехНадзор. 2015. № 11(108). С. 540 – 541.
2. Быстрова О. Н. Локальная коррозия углеродистой стали в резервуарах для очистки сточных нефтепромысловых вод / Вестник Технологического университета. 2016. Т. 19. № 4. С. 43 – 46.
3. Улиг Г. Г., Реви Р. У. Коррозия и борьба с ней. Введение в коррозионную науку и технику. — Л.: Химия, 1989. — 456 с.
4. Белеевский В. С., Куделин Ю. И. Коррозия: теория и практика. — М.: Спутник+, 2011. — 275 с.
5. Новиков В. Ф., Устинов В. П., Муратов К. Р. и др. О возможности магнитного метода контроля коррозионной стойкости стали / Коррозия: материалы, защита. 2018. № 8. С. 34 – 38.
6. 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. Is. 1. P. 12. DOI: 10.1088/1757-899X/289/1/012013
7. Скорчеллетти В. В. Теоретические основы коррозии металлов. — Л.: Химия, 1973. — 284 с.
8. Гуляев А. П. Металловедение. Учебник для вузов. — М.: Металлургия, 1986. — 544 с.
9. Помазова А. В., Панова Т. В., Геринг Г. И. Влияние разнозернистости структуры на коррозионную стойкость наружной поверхности труб из углеродистой стали 20, применяемых в теплоэнергетике / Вестник Южно-Уральского государственного университета. 2014. Т. 14. № 4. С. 37 – 44.
10. Чувильдеев В. Н., Копылов В. И., Нохрин А. В. и др. Влияние локального химического состава границ зерен на коррозионную стойкость титанового сплава / Письма в журнал технической физики. 2016. Т. 42. № 24. С. 24 – 32.
11. Гутман Э. М. Механохимия металлов и защита от коррозии. — М.: Металлургия, 1981. — 270 с.
12. Мовчан Т. Г., Есинова Н. Е., Ерюкин П. В. и др. Механохимические эффекты в процессах коррозии металлов / Журнал общей химии. 2005. Т. 75. № 11. С. 1761 – 1767.
13. Матюк В. Ф., Бурак В. А. Контроль качества отпуска закаленных изделий из конструкционных среднеуглеродистых сталей импульсным магнитным методом / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2011. Т. 77. № 9. С. 31 – 36.
14. Михеев М. Н., Горкунов Э. С. Магнитные методы неразрушающего контроля структурного состояния и прочностных характеристик термически обработанных изделий (обзор) / Дефектоскопия. 1985. № 3. С. 3 – 21.
15. Лобанов М. Л., Сысолятина И. П., Чистяков В. К. и др. О возможности неразрушающего контроля величины зерна на промежуточных этапах производства электротехнической стали / Дефектоскопия. 2003. № 8. С. 55 – 70.
16. Бида Г. В., Ничипурук А. П. Магнитные свойства термообработанных сталей. — Екатеринбург: Институт физики металлов УрО РАН, 2005. — 218 с.
17. Киселев В. Г., Калюткин А. А. Особенности влияния коррозионных элементов на локализацию процессов разрушения металла при прокладке трубопроводов в грунте / Известия вузов. Проблемы энергетики. 2015. № 1 – 2. С. 3 – 10.
18. Полянская И. Л., Щукина В. Н. Исследование обезуглероживания макроскопических коррозионных повреждений / Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2017. Т. 1. № 3(31). С. 92 – 96.
19. Новиков В. Ф., Прилуцкий В. В. Свойства локальной намагниченности в виде полосы и возможности ее использования для неразрушающего контроля / Дефектоскопия. 2014. № 7. С. 24 – 30.
20. Бида Г. В., Ничипурук А. П. Многопараметровые методы в магнитной структурископии и неразрушающем контроле механических свойств сталей / Дефектоскопия. 2007. № 8. С. 3 – 24.
21. Биргер И. А. Техническая диагностика. — М.: Машиностроение, 1978. — 240 с.
22. Устинов В. П., Новиков В. Ф., Муратов К. Р. и др. Особенность работы электрохимической защиты с локальными анодами в северных условиях / Академический журнал Западной Сибири. 2016. Т. 12. № 1(62). С. 25 – 27.
23. Новиков В. Ф., Нерадовский Д. Ф., Соколов Р. А. Использование квазистатических петель магнитного гистерезиса для контроля структуры стали / Вестник Пермского национального исследовательского политехнического уни-

- верситета. 2016. Т. 18. № 2. С. 38 – 49.
DOI: 10.15593/2224-9877/2016.2.03
24. Новиков В. Ф., Муратов К. Р., Соколов Р. А., Устинов В. П. Определение коррозионной стойкости низколегированных сталей магнитным методом / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2020. Т. 86. № 5. С. 31 – 36.
DOI: 10.26896/1028-6861-2020-86-5-31-36
 25. Соколов Р. А., Новиков В. Ф., Муратов К. Р., Венедиктов А. Н. Оценка влияния дисперсности структуры стали на магнитные и механические свойства / Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2021. Т. 23. № 4. С. 93 – 110. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.4-93-110
 26. Кулеев В. Г., Царькова Т. П. О влиянии пластического растяжения сталей на зависимости coercитивной силы от упругих сжимающих напряжений / Дефектоскопия. 2014. № 2. С. 34 – 45.
 27. Соколов Р. А., Новиков В. Ф., Муратов К. Р., Венедиктов А. Н. Определение взаимосвязи фактора разнозернистости и скорости коррозии конструкционной стали / Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2020. Т. 22. № 3. С. 106 – 125.
DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.3-106-125
 28. 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. P. 2584 – 2585. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.09.015
 13. Matyuk V. F., Burak V. A. Quality control of tempering hardened products from structural medium-carbon steels by pulsed magnetic method / Zavod Lab. Diagn. Mater. 2011. Vol. 77. N 9. P. 31 – 36 [in Russian].
 14. Mikheev M. N., Gorkunov E. S. Magnetic methods of non-destructive testing of the structural state and strength characteristics of heat-treated products: Review / Defektoskopiya. 1985. N 3. P. 3 – 21 [in Russian].
 15. Lobanov M. L., Sysolyatina I. P., Chistyakov V. K., et al. On the possibility of non-destructive testing of grain size at intermediate stages of production of electrical steel / Defektoskopiya. 2003. N 8. P. 55 – 70 [in Russian].
 16. Bida G. V., Nichipuruk A. P. Magnetic properties of heat-treated steels. — Yekaterinburg: Inst. Fiz. Met. UrO RAN, 2005. — 218 p. [in Russian].
 17. Kiselev V. G., Kalyutik A. A. Features of the influence of corrosive elements on the localization of metal destruction processes when laying pipelines in the ground / Izv. Vuzov. 2015. N 1 – 2. P. 3 – 10 [in Russian].
 18. Polianskaya I. L., Shchukina V. N. Investigation of decarburization of macroscopic corrosion damage / Uch. Zap. Komsomolsk.-na-Amure Gos. Tekhn. Univ. 2017. Vol. 1. N 3(31). P. 92 – 96 [in Russian].
 19. Novikov V. F., Prilutskiy V. V. Properties of local magnetization in the form of a strip and the possibility of its use for non-destructive testing / Defektoskopiya. 2014. N 7. P. 24 – 30 [in Russian].
 20. Bida G. V., Nichipuruk A. P. Multiparameter methods in magnetic structroscopy and non-destructive testing of mechanical properties of steels / Defektoskopiya. 2007. N 8. P. 3 – 24 [in Russian].
 21. Birger I. A. Technical diagnostics. — Moscow: Mashinostroenie, 1978. — 240 p. [in Russian].
 22. Ustinov V. P., Novikov V. F., Muratov K. R., et al. The peculiarity of the work of electrochemical protection with local anodes in northern conditions / Akad. Zh. Zapad. Sibiri. 2016. Vol. 12. N 1(62). P. 25 – 27 [in Russian].
 23. Novikov V. F., Neradovsky D. F., Sokolov R. A. The use of quasi-static magnetic hysteresis loops to control the structure of steel / Vestn. Perm. Nats. Issl. Politekhn. Univ. 2016. Vol. 18. N 2. P. 38 – 49 [in Russian].
DOI: 10.15593/2224-9877/2016.2.03
 24. Novikov V. F., Muratov K. R., Sokolov R. A., Ustinov V. P. Determination of corrosion resistance of low-alloy steels by magnetic method / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2020. Vol. 86. N 5. P. 31 – 36 [in Russian].
DOI: 10.26896/1028-6861-2020-86-5-31-36
 25. Sokolov R. A., Novikov V. F., Muratov K. R., Venediktov A. N. Assessment of the effect of the steels structure dispersion on its magnetic and mechanical properties / Obrab. Metallov. Tekhnol. Oborud. Instr. 2021. Vol. 23. N 4. P. 93 – 110 [in Russian]. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.4-93-110
 26. Kuleev V. G., Tsarkova T. P. On the influence of plastic stretching of steels on the dependence of coercive force on elastic compressive stresses / Defektoskopiya. 2014. N 2. P. 34 – 45 [in Russian].
 27. 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 / Obrab. Metallov. Tekhnol. Oborud. Instr. 2020. Vol. 22. N 3. P. 106 – 125 [in Russian].
DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.3-106-125
 28. 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. P. 2584 – 2585.
DOI: 10.1016/j.matpr.2019.09.015

REFERENCES

1. Nesterov D., Sidorchuk M., Millionshchikov V., et al. Corrosion of oil and oil products storage tanks / TekhnNadzor. 2015. N 11(108). P. 540 – 541 [in Russian].
2. Bystrova O. N. Local carbon steel corrosion in reservoirs for wastewater treatment / Vestn. Tekhnol. Univ. 2016. Vol. 19. N 4. P. 43 – 46 [in Russian].
3. Uhlig H. H., Revie R. W. Corrosion and corrosion control. An introduction to corrosion science and engineering. — Leningrad: Khimiya, 1989. — 456 p. [Russian translation].
4. Beleevsky V. S., Kudelin Yu. I. Corrosion: theory and practice. — Moscow: Sputnik+, 2011. — 275 p. [in Russian].
5. Novikov V. F., Ustinov V. P., Muratov K. R., et al. About possibilities of magnetic method for control of steel resistance corrosion / Korroziya Mater. Zashita. 2018. N 8. P. 34 – 38 [in Russian].
6. Novikov V. F., Sokolov R. A., Neradovsky D. F., Muratov K. R. A technique for predicting steel corrosion resistance / IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 289. Is. 1. P. 12.
DOI: 10.1088/1757-899X/289/1/012013
7. Scorcetletti V. V. Theoretical foundations of metal corrosion. — Leningrad: Khimiya, 1973. — 284 p. [Russian translation].
8. Gulyaev A. P. Metallovedenie. — Moscow: Metallurgiya, 1986. — 544 p. [in Russian].
9. Pomazova A. V., Panova T. V., Gering G. I. The effect of the structure's heterogeneity on the corrosion resistance of the outer surface of carbon steel pipes 20 used in thermal power engineering / Vestn. Yuzh.-Ural. Gos. Univ. 2014. Vol. 14. N 4. P. 37 – 44 [in Russian].
10. Chuvildeev V. N., Kopylov V. I., Nokhrin A. V., et al. The effect of the local chemical composition of grain boundaries on the corrosion resistance of a titanium alloy / Pis'ma Zh. Tekhn. Fiz. 2016. Vol. 42. N 24. P. 24 – 32 [in Russian].
11. Gutman E. M. Mechanochemistry of metals and corrosion protection. — Moscow: Metallurgiya, 1981. — 270 p. [in Russian].
12. Movechan T. G., Esipova N. E., Yeryukin P. V., et al. Mechanochemical effects in metal corrosion processes / Zh. Obshch. Khim. 2005. Vol. 75. N 11. P. 1761 – 1767 [in Russian].