

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2020-86-5-31-36>

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ МАГНИТНЫМ МЕТОДОМ

© **Виталий Фёдорович Новиков¹, Камиль Рахимчанович Муратов^{1*},
Роман Александрович Соколов¹, Валерий Петрович Устинов²**

¹ Тюменский индустриальный университет, Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38; *e-mail: muratows@mail.ru

² Газпром добыча Ноябрьск, Губкинский ГПЗ, Россия, 629830, Ямало-Ненецкий АО, г. Губкинский, пос. Промышленная зона.

*Статья поступила 1 ноября 2019 г. Поступила после доработки 20 марта 2020 г.
Принята к публикации 25 марта 2020 г.*

Влияние термообработки на скорость коррозии образцов высокоуглеродистых сталей (максимальная коррозионная убыль наблюдается при температуре отпуска 400 °С) основано на возникновении микрогальванических пар между фазовыми составляющими материала. Микрогальванические пары в процессе термообработки перераспределяются, что меняет условия протекания гальванических токов. В свою очередь структурно-фазовый состав обуславливает магнитные свойства сталей и определяет связь их магнитных характеристик с коррозионной активностью. Цель работы — разработка метода контроля скорости коррозии по изменению магнитных характеристик. Установлено, что существует тесная взаимосвязь между коэрцитивной силой и электрохимическим потенциалом (относительно хлорсеребряного электрода) — показателем коррозионной активности. На примере трубопровода из стали 09Г2С, вдоль которого изменение коэрцитивной силы достигало 25 %, показано, что риск развития макрогальванических пар достаточно высок. Предложен экспресс-метод выявления коррозионно опасных зон изделий путем сканирования магнитных параметров материала. В качестве решения проблемы неоднозначности связи коррозионной активности и магнитных параметров использовали многопараметровый подход. Гармоническим разложением петель магнитного гистерезиса образцов стали 45Х получили ряд нечетных гармоник, некоторые из которых слабо коррелировали с коррозионной убылью. Вместе с тем комплексы из нескольких гармоник коррелировали с ней уже в значительно большей степени. Полученные результаты могут быть использованы при технической диагностике и прогнозировании коррозионной активности стальных конструкций до начала их эксплуатации.

Ключевые слова: коэрцитивная сила; релаксационная магнитная восприимчивость; скорость коррозии; прогнозирование; закалка; отпуск после закалки; гальваническая коррозионная пара; Фурье-преобразование; методы технической диагностики.

DETERMINATION OF THE CORROSION RESISTANCE OF LOW ALLOYED STEELS BY MAGNETIC METHOD

© **Vitaly F. Novikov¹, Kamil R. Muratov^{1*}, Roman A. Sokolov¹, Valery P. Ustinov²**

¹ Tyumen Industrial University, 38, Volodarskogo ul., Tyumen, 625000, Russia; *e-mail: muratows@mail.ru

² Gazprom dobycha Noyabrsk LLC, pos. Promyshlennaya zona, Gubkinsky, Yamalo-Nenetsky AO, 629830, Russia.

Received November 1, 2019. Revised March 20, 2020. Accepted March 25, 2020.

An innovative method of measuring and control of the steel corrosion rate by changing magnetic characteristics is developed. The impact of heat treatment on the corrosion rate of the samples of high-carbon steels (maximum corrosion loss is observed at a tempering temperature of 400°C) is attributed to the appearance of micro-galvanic pairs (MGP) between the phase components of the material. MGP undergo redistribution under heat treatment thus changing conditions of the galvanic current flow. The structural phase composition, in turn, determines the magnetic properties of steel and correlation between the magnetic properties and corrosiveness. The goal of the study is demonstration of the possibility and expediency of using the magnetic parameters of steel for determination of the steel corrosion rate. A close correlation dependence is observed between the coercive force and the electrochemical potential (relative to the silver chloride electrode) which are direct indicators of the corrosiveness. Case study of a pipeline made of 09G2S steel along which change in the coercive force attained 25% revealed rather high risk of developing micro-galvanic pairs. A rapid method of scanning magnetic parameters is proposed to detect potentially corrosive zones. A multi-parameter approach can be used to solve the problem of the ambiguity of the relationship between the corrosiveness and magnetic parameters. Harmonic decomposition of magnetic hys-

teresis loops of 45Kh steel samples is used to obtain a number of odd harmonics. Some of them weakly correlate with the corrosion loss, whereas complexes of several harmonics correlate to a greater extent. The results can be used in technical diagnostics and prediction of the corrosion activity of steel structures before their operation. The results can be used in technical diagnostics and forecasting of the corrosiveness of steel structures prior to their operation.

Keywords: coercivity; relaxation magnetic susceptibility; corrosion rate; forecasting, hardening; tempering after hardening; galvanic corrosion pair; Fourier transform; methods of technical diagnostics.

Введение

Процессы коррозионного разрушения протекают на поверхности металла крайне неравномерно. В практике эксплуатации стальных вертикальных резервуаров нередки случаи, когда через некоторое время (менее расчетного периода эксплуатации) резервуар оказывается полупустым, а вокруг места его установки наблюдается разлив нефтепродукта [1, 2]. Причиной подобной ситуации может быть сквозная коррозия, возникающая в стальных листах. Вместе с тем контроль металла позволяет уменьшить число подобных опасных случаев.

Основные методы контроля коррозионных свойств стали — гравиметрический, металлографический, методы определения электрохимического потенциала и др. [3, 4], как правило, требуют значительных временных затрат и характеризуются существенными погрешностями (например, метод определения электрохимического потенциала). Использование косвенных параметров, дающих возможность оперативного неразрушающего контроля склонности металла к коррозии в конкретной коррозионной среде, представляется более перспективным [5, 6].

Цель работы — контроль скорости коррозии стали с использованием магнитных характеристик материала (коэрцитивной силы, релаксационной магнитной восприимчивости и магнитной петли гистерезиса).

Влияние структурного состояния стали на коррозионную активность и магнитные характеристики

Известно, что скорость коррозии закаленной высокоуглеродистой стали зависит от температуры отпуска, которая влияет на структуру материала [3]. Так, коррозионная потеря массы стального образца, отпущенного при 400 °С, в шесть раз больше, чем образцов, отпущенных при температурах ниже 200 и выше 600 °С. Причина — микрогальваническая коррозия, обусловленная различием электрохимических свойств фазовых составляющих стали, которые в свою очередь в процессе отпуска трансформируются [7, 8].

Структура закаленной углеродистой стали состоит из мартенсита и остаточного аустенита.

Отпуск при низких температурах ведет к превращению аустенита в мартенсит отпуска и затем — к разрушению мартенсита с формированием карбидной фазы. При среднем отпуске (300 – 450 °С) полностью завершается процесс выделения углерода из пересыщенного твердого раствора и мартенсит превращается в феррит. Карбид Fe_2C преобразуется в цементит Fe_3C . При этом образуется двухфазная структура (троостит отпуска), состоящая из феррита, в котором равномерно распределены мельчайшие частицы цементита. Эта структура при наличии электролита ведет к появлению активных гальванических центров, ускоряющих процесс коррозионного разрушения.

При 2-часовой термообработке закаленной от 850 °С стали, содержащей 0,95 % углерода, максимум тонкодисперсного цементита достигается примерно при 400 °С (для стали с 0,7 % С — при 300 °С). После отпуска при этих температурах катодные включения цементита (относительно феррита) занимают большую часть поверхности феррита, поэтому их гальваническое действие максимально [3]. При высоком отпуске (500 – 650 °С) происходят растворение мелких частиц в матрице и диффузионный перенос вещества через матрицу к поверхности крупных частиц, вследствие чего они становятся еще крупнее. Формируется феррито-цементитная смесь более грубого, чем троостит, строения, называемая сорбитом отпуска. В результате уменьшается количество гальванических пар и скорость коррозии снижается.

Таким образом, факторы, связанные со структурно-фазовым составом материала, в совокупности с напряженно-деформированным состоянием определяют коррозионные свойства стали [3, 4, 7, 9 – 11]. Одновременно эти факторы обуславливают магнитные свойства материала [13 – 15]. Иными словами, между магнитными и коррозионными характеристиками сталей существует косвенная взаимосвязь.

Обсуждение результатов

На рис. 1 представлена зависимость потери массы Δm образцов стали У10, закаленных от 850 °С в масло и отпущенных при различных температурах от коэрцитивной силы H_c [3, 16].

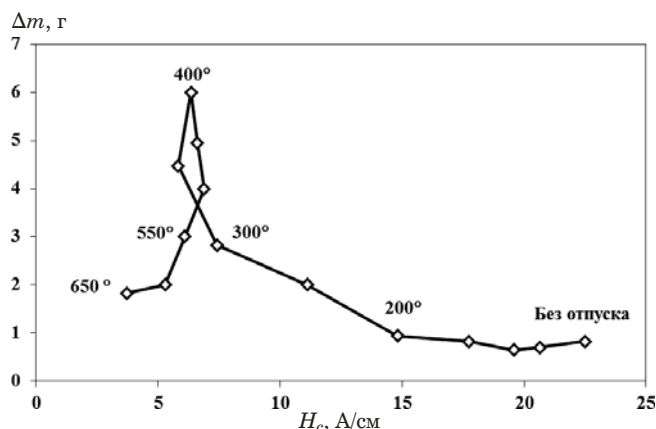


Рис. 1. Зависимость потери массы Δm стали У10 от коэрцитивной силы H_c

Fig. 1. Dependence of the mass loss Δm (steel U10) on the coercive force H_c

Время пребывания образцов в 1 %-м водном растворе серной кислоты составляло 72 ч.

Тонкодисперсная структура стали влияет на ее релаксационные свойства, в частности, на релаксационную магнитную восприимчивость χ_r [17]. На рис. 2 для стали У10 приведена зависимость коррозионной убыли массы Δm [3] от релаксационной магнитной восприимчивости χ_r [3, 16].

Видно, что взаимосвязь (точки) между скоростью коррозии и релаксационной магнитной восприимчивостью достаточно тесная. Выпадающие из монотонной зависимости точки (крестики) относятся к образцам, отпущенным при температурах 600 и 660 °С (их легко распознать, например, по твердости HRC) [16].

Гальванические пары, возникающие между различными фазовыми и структурными составляющими стали, могут иметь и макромасштаб [18, 19]. Макрогальванопары обусловлены неоднородностью структурно-фазового состава металла, внутренними напряжениями и неоднородностью контактирующей агрессивной среды. Кроме того, отметим такой фактор, как разнородность микроструктуры [9], которая отражает дисперсию размера структурных компонентов материала.

Относительно хлорсеребряного электрода определяли электрохимический потенциал образцов стали 09Г2С с различными режимами термообработки (рис. 3). Образцы сначала шлифовали, затем стравливали наклепанный поверхностный слой. Видно, что с ростом H_c электрохимический потенциал E уменьшается практически линейно.

На рис. 4 приведены зависимости продольной и поперечной коэрцитивной силы от длины трубы из стали 09Г2С. По резким перепадам H_c

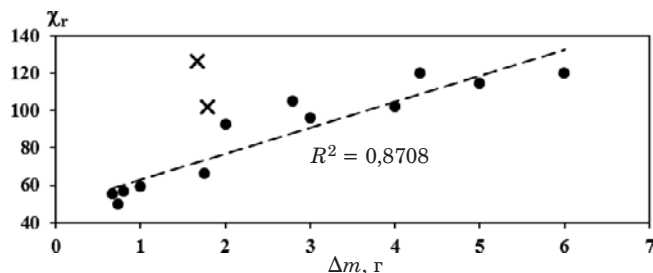


Рис. 2. Зависимость между релаксационной магнитной восприимчивостью χ_r и коррозионной убылью массы Δm (72 ч) для стали У10

Fig. 2. Dependence between the relaxation magnetic susceptibility χ_r and corrosive loss of mass Δm (72 h) in steel U10

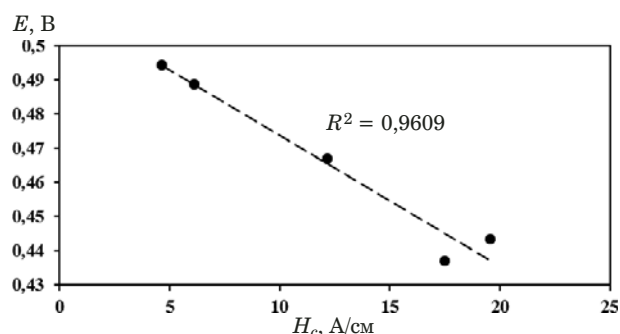


Рис. 3. Зависимость электрохимического потенциала E от коэрцитивной силы H_c для образцов стали 09Г2С

Fig. 3. Dependence of the electrochemical potential E on the coercive force H_c in 09Г2С steel samples

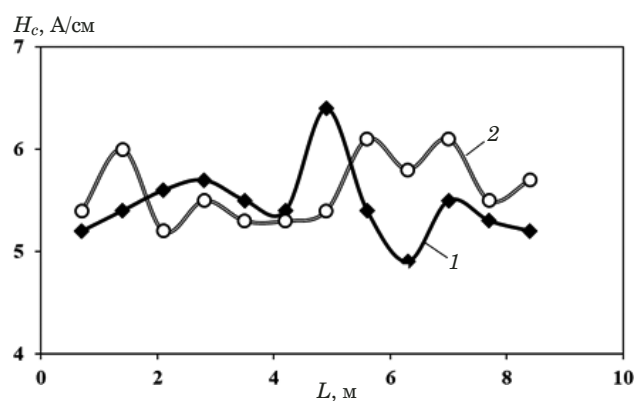


Рис. 4. Зависимости продольной (2) и поперечной (1) коэрцитивной силы H_c от длины трубы L из стали 09Г2С

Fig. 4. Dependence of transverse (1) and longitudinal (2) coercive forces H_c on the pipe length L (steel 09Г2С)

(в данном случае до 1,60 А/см) можно прогнозировать аномальную коррозию в результате возникновения макропар.

Определение коэрцитивной силы и релаксационной магнитной восприимчивости на протяженных изделиях стандартными приборами тре-

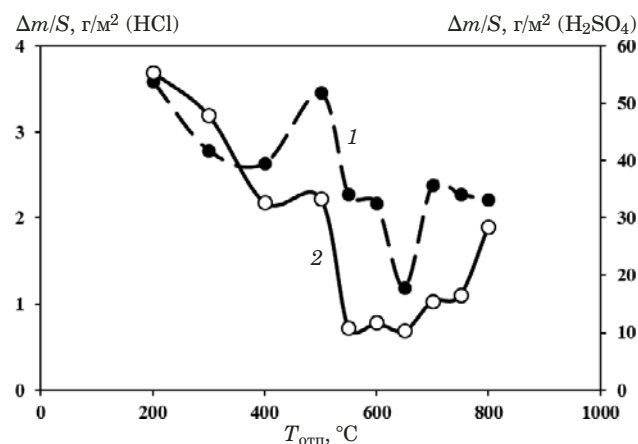


Рис. 5. Зависимость удельной коррозионной убыли $\Delta m/S$ образцов стали 45X в растворах соляной (1) и серной (2) кислот от температуры отпуска $T_{отп}$

Fig. 5. Dependence of the corrosion loss $\Delta m/S$ of steel samples in the solutions of hydrochloric (1) and sulfuric (2) acids on tempering temperature T_{temp}

бует неподвижного расположения преобразователя на поверхности, что затрудняет непрерывное сканирование. Такая проблема отсутствует при сканировании остаточной намагниченности поля рассеяния протяженной намагниченной полосы по поверхности изделия [20 – 22].

Для повышения достоверности магнитного коррозионного контроля необходимо использовать многопараметровый подход [23], как, например, при гармоническом анализе квазистатических петель гистерезиса [6].

На образцах стали 45X, закаленных от 840 °C в масло и отпущенных при различных температурах, провели 96-часовые коррозионные испытания в 5 %-ных растворах соляной и (после шлифования) серной кислот [6]. Результаты приведены на рис. 5.

Ход кривых отражает коррозионные свойства материала при изменении его структурного состояния (падение в диапазоне 200 – 400 °C, всплеск при 500 °C, далее падение и подъем). Однако поскольку корреляция слабая, механизмы растворения в кислотных средах при разных

вариациях структурно-фазового состава материала различны.

До коррозионных испытаний с помощью структуроскопа DIUS-1.15M на исследуемых образцах получали петли магнитного гистерезиса, которые с помощью Фурье-преобразования представляли в виде гармоник A_1, A_3, A_5, A_7 (в относительных единицах). Амплитуды некоторых гармоник удовлетворительно коррелировали с удельной коррозионной убылью $\Delta m/S$ (S — площадь поверхности). Используя подход, включающий перебор различных комбинаций гармоник, получили улучшенную (по сравнению с гармониками A_3 и A_5) корреляционную связь комплексных параметров $P_1 = (A_1 A_3 A_5 A_7)^{1/4}$ и $P_2 = (A_3^2 + A_5^2 + A_7^2)^{1/2}$ с $\Delta m/S$ (рис. 6) [6].

Видно, что образцы с температурой термообработки 800 °C выпадают из общей закономерности. Это обусловлено фазовым переходом при температуре $A_{с3} = 770$ °C и достижением равновесного феррито-перлитного состояния материала. Отметим, что подобное состояние легко выявить с помощью таких параметров, как твердость, намагниченность насыщения, коэрцитивная сила и др. [16].

Контроль коррозионной активности с использованием магнитных характеристик можно свести к задачам технической диагностики. Так, если амплитуды гармоник A_1, A_3, A_5, A_7 — оси координат в некотором пространстве признаков [24], то параметры P_1 и P_2 — функции преобразования пространства признаков в диагностическое пространство [24]. Положение в последнем отражает соответствующую коррозионную активность ($\Delta m/S$) образца.

Заключение

Таким образом, проведенные исследования показали, что возможно определение скорости коррозии магнитными методами по коэрцитивной силе, релаксационной магнитной восприимчивости и гармоникам разложения квазистатической магнитной петли гистерезиса. Применение

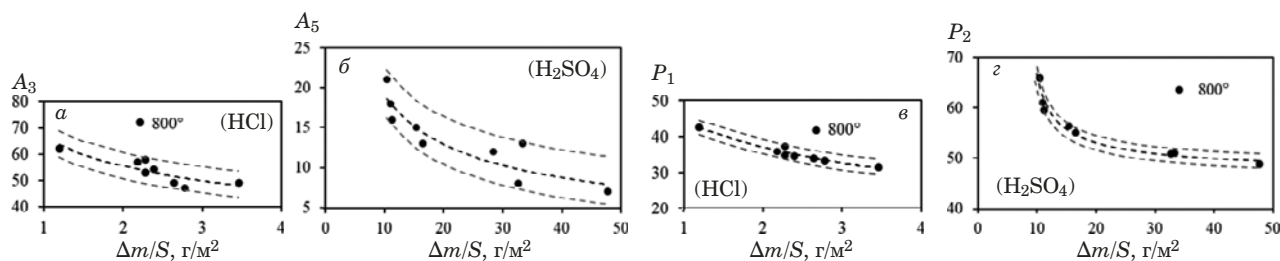


Рис. 6. Зависимости амплитуд гармоник A_3 и A_5 (а, б) и комплексных параметров P_1 и P_2 (в, г) от удельной коррозионной убыли массы $\Delta m/S$ образцов стали 45X в растворах соляной и серной кислот

Fig. 6. Dependence of the amplitudes of harmonics A_3 and A_5 (a, b) and complex parameters P_1 (c) and P_2 (d) on the specific corrosion loss of mass $\Delta m/S$ of 45Kh steel samples in the solutions of hydrochloric and sulfuric acids

при анализе магнитных свойств стали многопараметрового подхода и традиционных методов технической диагностики позволяет прогнозировать скорость коррозии с достаточно высокой точностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нестеров Д., Сидорчук М., Миллионщиков В., Беликова Т., Ястребова Н. 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., Ревя Р. У. Коррозия и борьба с ней. Введение в коррозионную науку и технику / Пер. с англ. — Л.: Химия, 1989.
4. Белевский В. С., Куделин Ю. И. Коррозия: теория и практика. — М.: Спутник+, 2011. — 275 с.
5. Новиков В. Ф., Устинов В. П., Муратов К. Р., Федоров Б. В., Попова С. А. 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. Issue 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 разнородности структуры на коррозионную стойкость наружной поверхности труб из углеродистой стали 20, применяемых в теплоэнергетике / Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. 2014. Т. 14. № 4. С. 37 – 44.
10. Чувильдеев В. Н., Копылов В. И., Нохрин А. В., Бахметьев А. М., Сандлер Н. Г., Тряев П. В., Козлова Н. А., Табачкова Н. Ю., Михайлов А. С., Чегуров М. К., Смирнова Е. С. Влияние локального химического состава границ зерен на коррозионную стойкость титанового сплава / Письма в журнал технической физики. 2016. Т. 42. № 24. С. 24 – 32. DOI: 10.1134/S1063785016120178.
11. Гутман Э. М. Механохимия металлов и защита от коррозии. — М.: Металлургия, 1981. — 270 с.
12. Мовчан Т. Г., Есипова Н. Е., Ерюкин П. В., Урьев Н. Б., Русанов А. И. Механохимические эффекты в процессах коррозии металлов / Журнал общей химии. 2005. Т. 75. № 11. С. 1761 – 1767. DOI: 10.1007/s11176-005-0491-8.
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., Гобов Ю. Л., Горкунов Э. С., Задворкин С. М., Корзунин Г. С., Лаврентьев А. Г., Перов Д. В., Ринкевич А. Б., Сандовский В. А. О возможности неразрушающего контроля величины зерна на промежуточных этапах производства электротехнической стали / Дефектоскопия. 2003. Т. 39. № 8. С. 55 – 70. DOI: 10.1023/B:RUNT.0000016388.74217.9a.
16. Бида Г. В., Ничипурук А. П. Магнитные свойства термообработанных сталей. — Екатеринбург, 2005. — 218 с.
17. Царькова Т. П. Магнитные свойства и методы контроля качества термически и деформационно упрочненных сталей: автореферат дисс. ... канд. техн. наук. — Екатеринбург, 1995.
18. Киселев В. Г., Калютник А. А. Особенности влияния коррозионных элементов на локализацию процессов разрушения металла при прокладке трубопроводов в грунте / Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2015. № 1 – 2. С. 3 – 10.
19. 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.
20. Пат. № 2627122 РФ, МПК G01R 33/14 (2006.01). Способ и устройство для определения релаксационной коэрцитивной силы и релаксационной намагниченности протяженных изделий из ферромагнитных материалов / Новиков В. Ф., Радченко А. В., Устинов В. П., Чуданов В. Е., Муратов К. Р.; заявитель и патентообладатель ООО НПФ «Радан». — № 2016137251; заявл. 16.09.2016; опубл. 03.08.2017. Бюл. № 22.
21. 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. DOI: 10.1134/S1061830914070080.
22. Пат. № 2570704 РФ, МПК G01N 17/00. Способ и устройство для контроля избыточной коррозии стали / Евко В. П., Новиков В. Ф., Радченко А. В., Устинов В. П.; заявитель и патентообладатель ООО НПФ «Радан». — № 2015103100/28; заявл. 30.01.2015; опубл. 10.12.2015. Бюл. № 34.
23. Бида Г. В., Ничипурук А. П. Многопараметровые методы в магнитной структуроскопии и неразрушающем контроле механических свойств сталей / Дефектоскопия. 2007. № 8. С. 3 – 24. DOI: 10.1134/S1061830907080013.
24. Биргер И. А. Техническая диагностика. — М.: Машиностроение, 1978. — 240 с.

REFERENCES

1. Nesterov D., Sidorchuk M., Millionshchikov V., Belikova T., Yastrebova N. Corrosion of oil and oil products storage tanks / TekhNadzor. 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 [Russian translation].
4. Belevsky 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., Fedorov B. V., Popova S. A. About possibilities of magnetic method for control of steel resistance corrosion / Korroz. Mater. Zashch. 2018. N 8. P. 34 – 38 [in Russian].
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. Issue 1. P. 12. DOI: 10.1088/1757-899X/289/1/012013.
7. Scorchelletti V. V. Theoretical bases of corrosion of metals. — Leningrad: Khimiya, 1973 [Russian translation].
8. Gulyaev A. P. Physical Metallurgy. Textbook for universities. — Moscow: Metallurgiya, 1986 [in Russian].
9. Pomozova V. A., Panova T. V., Gering G. I. Influence of heterogranularity of structure on the corrosion resistance of the outer pipe surface of the carbon steel 20 used in a power system / Vestn. Yuzh.-Ural. Gos. Univ. Ser. Metallurg. 2014. Vol. 14. N 4. P. 37 – 44 [in Russian].
10. Chuvil'deev V. N., Kopylov V. I., Nokhrin A. V., Bakmet'ev A. M., Sandler N. G., Tryaev P. V., Kozlova N. A., Tabachkova N. Y., Mikhailov A. S., Chegurov M. K., Smirnova E. S. 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. DOI: 10.1134/S1063785016120178.
11. **Gutman E. M.** Mechanochemistry of metals and corrosion protection. — Moscow: Metallurgiya, 1974 [in Russian].
 12. **Movchan T. G., Esipova N. E., Eryukin P. V., Uriev N. B., Rusanov A. I.** Mechanochemical effects in processes of corrosion of metals / *Russian Journal of General Chemistry*. 2005. Vol. 75. N 11. P 1761 – 1767. DOI: 10.1007/s11176-005-0491-8.
 13. **Matyuk V. F., Burak V. A.** Quality Control of Temper Drawing of Hardened Articles Made of Construction Medium-Carbon Steel Using 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: Overview / *Defektoskopiya*. 1985. N 3. P 3 – 21 [in Russian].
 15. **Lobanov M. L., Sysolyatina I. P., Chistyakov V. K., Gombov Yu. L., Gorkunov E. S., Zadvorkin S. M., Korzunin G. S., Lavrent'ev A. G., Perov D. V., Rinkevich A. B., Sandovskii V. A.** On possibility of nondestructive testing of the grain size in the intermediate stages of manufacturing electrical steel / *Defektoskopiya*. 2003. Vol. 39. N 8. P 55 – 70. DOI: 10.1023/B:RUNT.0000016388.74217.9a.
 16. **Bida G. V., Nichipuruk A. P.** Magnetic properties of heat-treated steels. — Yekaterinburg, 2005. — 218 p. [in Russian].
 17. **Tsar'kova T. P.** Magnetic properties and quality control methods of thermally and deformatively hardened steels: author's abstract of Candidate's thesis. — Yekaterinburg, 1995 [in Russian].
 18. **Kiselev V. G., Calutech A. A.** Features of influence of corrosion elements on localization of processes of destruction of metal at laying of pipelines in soil / *Izv. Vuzov. Probl. Énerget.* 2015. N 1 – 2. P 3 – 10 [in Russian].
 19. **Polyanskaya I. L., Shchukina V. N.** Research of decarburization of macroscopic corrosion damages / *Uch. Zap. Komso-mol'sk.-na-Amure Gos. Tekhn. Univ.* 2017. Vol. 1. N 3(31). P 92 – 96 [in Russian].
 20. RF Pat. N 2627122, IPC G01R 33/14 (2006.01). Method and apparatus for determining the relaxation of the coercive force and the relaxation of the magnetization of long products made of ferromagnetic materials / Novikov V. F., Radchenko A. V., Ustinov V. P., Chudanov V. E., Muratov K. R.; applicant and owner OOO NPF "Radan". — N 2016137251; appl. 16.09.2016; publ. 03.08.2017. Byull. N 22.
 21. **Novikov V. F., Prilutskii V. V.** The properties of stripe-shaped residual magnetization and the possibilities for its application for nondestructive testing / *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2014. Vol. 50. N 7. P 396 – 401. DOI: 10.1134/S1061830914070080.
 22. RF Pat. N 2570704, IPC G01N 17/00. Method and apparatus for control of excessive corrosion of steel / Evko V. P., Novikov V. F., Radchenko A. V., Ustinov V. P.; applicant and owner OOO NPF "Radan". — N 2015103100/28; appl. 30.01.2015; publ. 10.12.2015. Byull. N 34.
 23. **Bida G. V., Nichipuruk A. P.** Multiparameter methods in magnetic structuroscopy and nondestructive testing of mechanical properties of steels / *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2007. Vol. 43. N 8. P 493 – 509. DOI: 10.1134/S1061830907080013.
 24. **Birger I. A.** Technical diagnostics. — Moscow: Mashinostroyeniye, 1978. — 240 p. [in Russian].