

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2024-90-3-45-51>

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СТАТИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ВОДОРОСОДЕРЖАНИЕ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТАЛЕЙ РАЗНОГО ТИПА

© Екатерина Геннадьевна Раковская^{1*}, Наталья Георгиевна Занько¹, Людмила Константиновна Ягунова²

¹ Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова, Россия, 194021, г. С.-Петербург, Институтский пер., д. 5; *e-mail: rakovskayabzd@gmail.com

² Балтийский федеральный университет имени И. Канта, Россия, 236016, г. Калининград, ул. А. Невского, д. 14.

Статья поступила 15 августа 2023 г. Поступила после доработки 9 октября 2023 г. Принята к публикации 18 декабря 2023 г.

При применении катодной защиты в местах повреждения лакокрасочных пленок происходит интенсивное выделение водорода, часть которого удаляется по законам диффузии, а часть из адсорбированного состояния на поверхности металла переходит в приповерхностные слои. Как следствие, развивается статическая водородная усталость стали, характеризующаяся тем, что металл, находящийся в условиях статического нагружения, внезапно хрупко разрушается при напряжениях, значительно меньших не только предела прочности, но и предела пластичности. В работе представлены результаты исследования влияния статических растягивающих напряжений на абсорбцию водорода металлом в процессе его катодной поляризации и распределения водорода по сечению поверхности металла. Использовали металлические образцы трех типов: проволочные из стали У8А, пластинчатые из стали 10ХСНД и полукольцевые из нержавеющей стали Х18Н9Т с концентратором напряжений. Испытания проволочных и полукольцевых образцов проводили при постоянной нагрузке, пластинчатых — при постоянной деформации. Поляризацию проволочных и пластинчатых образцов осуществляли при разных плотностях тока в течение 4 суток, полукольцевых — 1 ч. По окончании поляризации определяли послойное распределение водорода, адсорбированного металлом, методом анодного растворения. Установлено, что с увеличением величины деформации растет водородосодержание поверхностных слоев металла. Кроме того, приложение растягивающих нагрузок и деформирование металла изгибом способствуют увеличению количества поглощенного водорода, влияют на его распределение по сечению металла. В сталях разного состава и структуры толщина слоя, содержащего максимальное количество водорода, различна. Полученные результаты могут быть использованы при защите от коррозии изделий из конструкционных сталей в морской воде.

Ключевые слова: водородосодержание; сталь; коррозия; статическое напряжение; катодная поляризация.

STUDY OF THE EFFECT OF STATIC STRESSES ON THE HYDROGEN CONTENT AND ELECTROCHEMICAL CHARACTERISTICS OF STEELS OF DIFFERENT TYPES

© Ekaterina G. Rakovskaya,^{1*} Natalia G. Zanko,¹ Lyudmila K. Yagunova²

¹ S. M. Kirov St. Petersburg State Forest Technical University, 5, Institutsky per., St. Petersburg, 194021, Russia; *e-mail: rakovskayabzd@gmail.com

² Immanuel Kant Baltic Federal University, 14, ul. A. Nevskogo, Kaliningrad, 236016, Russia.

Received August 15, 2023. Revised October 9, 2023. Accepted December 18, 2023.

When cathodic protection is applied in places where paint films are damaged, an intense release of hydrogen occurs, which is removed both through diffusion and by transition from the adsorbed state on the metal surface to the subsurface layers thus leading to static hydrogen fatigue of steels, i.e., a brittle fracture occurs suddenly under static loading conditions at stress values significantly lower than the strength limit and even below the plasticity limit. We present the results of studying the impact of static tensile stresses on the hydrogen absorption by a metal during its cathodic polarization and the distribution of hydrogen over the cross-section of the metal surface. Three types of metal samples were used: wire samples made of U8A steel, plate samples made of 10KhSND steel, and semicircular samples made of Kh18N9T stainless steel with a stress concentrator. Tests of wire and semi-ring samples were carried out under a constant load and plate samples were tested under constant deformation. Polarization of wire and plate

samples was carried out at different current densities for 4 days and semi-ring samples for 1 hour. At the end of polarization, the layer-by-layer distribution of hydrogen absorbed by the metal was determined by the anodic dissolution method. It is shown that with increasing deformation, the hydrogen content of the surface layers of the metal increases. Moreover, application of tensile loads and deformation of the metal by bending contribute to an increase in the amount of absorbed hydrogen and affect hydrogen distribution over the metal cross section. The thickness of the layer containing the maximum amount of hydrogen differs in steels of different compositions and structures. The results obtained can be used to protect structural steels against corrosion in sea water.

Keywords: hydrogen content; steel; corrosion; static stress; cathodic polarization.

Введение

Под влиянием внедренного в сталь водорода, негативно влияющего на ее свойства и рабочие характеристики, возникают и развиваются дефекты структуры и решетки, понижающие качество металла, а также создающие условия для проявления водородной хрупкости стали. Водород способствует образованию пористостей, формированию и развитию трещин, расслаиванию металла, появлению локализованных искажений решетки и участков металла с измененным химическим составом и структурными свойствами. Адсорбированный сталью водород приводит к снижению длительной прочности и выносливости стали при циклических нагрузках, к внезапному хрупкому разрушению нагруженных деталей [1 – 4].

Водород может проникать в сталь как в процессе плавки, так и в результате ее обработки: сварки, травления в растворах кислот, нанесения гальванических покрытий и др. Наводораживание металла происходит при коррозии с водородной деполяризацией, катодной защите стальных изделий и др.

Катодная поляризация в сочетании с лакокрасочными покрытиями — эффективный способ защиты от морской коррозии [5 – 9]. Однако необходимо учитывать, что при применении катодной защиты в местах повреждения лакокрасочных пленок происходит интенсивное выделение водорода, часть которого удаляется по законам диффузии, а часть из адсорбированного состояния на поверхности металла переходит в приповерхностные слои [10 – 14]. Как следствие, развивается статическая водородная усталость стали, которая характеризуется тем, что металл, находящийся в условиях статического нагружения, внезапно хрупко разрушается при напряжениях, значительно меньших не только предела прочности, но и предела пластичности.

Цель работы — исследование влияния статических напряжений на абсорбцию водорода сталью в процессе катодной поляризации и распределения водорода по сечению поверхности металла.

Материалы, методика, оборудование

Исследовали образцы сталей, используемых для изготовления оборудования, применяемого для эксплуатации в морской воде. Нержавеющие стали применяют для облицовки штырей и шеек баллера руля, для изготовления насосов и арматуры, гребных валов и др. Водородное охрупчивание аустенитных нержавеющих сталей подтверждено многими исследованиями [15 – 17], поэтому анализ факторов, влияющих на наводороживание сталей при катодной поляризации в морской воде, представляет значительный практический интерес.

Испытывали образцы трех типов: проволочные из стали У8А (диаметр — 0,8 мм), пластинчатые из стали 10ХСНД (размер — 70 × 15 × 1,5 мм) и полукольцевые из нержавеющей стали Х18Н9Т (размер — 20 × 15 × 1,5 мм) с концентратором напряжений. Образцы подвергали внешнему растягивающему напряжению. Использовали способы нагружения, типичные для условий эксплуатации металла в морской воде. Проволочные и полукольцевые образцы испытывали при постоянной нагрузке, пластинчатые — при постоянной деформации. Нагружение проволочных образцов осуществляли с помощью машины для испытания пружин и рессор МИП-102. Полукольцевые и пластинчатые образцы испытывали с помощью специальных приспособлений, позволяющих задавать требуемую нагрузку и менять стрелу прогиба образца. В экспериментах нагрузка составляла 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 и 90 % от предельной, при которой образцы разрушались на воздухе.

В таблице для пластинчатых образцов приведены изменения величин приложенной нагрузки, внутренних напряжений и деформации.

Катодную поляризацию образцов проводили в морской воде (рН = 7,5). Стационарный потенциал определяли относительно 0,1н хлорсеребряного электрода, соединенного с образцом с помощью капилляра Луггина, заполненного раствором КСl с агар-агаром. Для измерения потенциала использовали потенциометр постоянного тока со стрелчатым гальванометром чувствительностью $5 \cdot 10^{-8}$ А/дел. В случае пластинчатых

образцов потенциал измеряли в пяти точках по длине деформированной пластины, на полукольцевых образцах — вблизи концентратора напряжений.

Поляризацию проволоочных и пластинчатых образцов проводили при разных плотностях тока в течение 4 суток, полукольцевых — 1 ч. По окончании поляризации определяли послойное распределение водорода, абсорбированного металлом, методом анодного растворения [1, 16]. Для определения растворенного кислорода до и после анодного растворения в качестве реагента на кислород применяли сафранин Т. Для измерения оптической плотности использовали фотоэлектроколориметр ФЭК-М с зеленым светофильтром (рабочая длина кюветы — 30 мм).

Образцы обезжировали, просушивали, взвешивали и затем анодно растворяли при плотности тока $0,02 \text{ А/см}^2$ в течение определенного промежутка времени в зависимости от толщины слоя, в котором определяли водород. Далее рассчитывали содержание водорода в растворенном слое металла [1].

Чтобы осуществить послойное растворение металла, через электролизер пропускали ток в течение 10 мин. Далее, согласно методу анодного растворения, отбирали пробу анолита на определение оптической плотности. Затем снова подавали ток в течение 10 мин, отбирали пробу анолита и т.д. Так снимался слой за слоем с последующим определением содержания водорода в каждом из них.

В случае пластинчатых образцов образец по окончании поляризации разрезали на пять частей, в каждой из которых определяли содержание водорода.

Обсуждение результатов

Сначала исследовали влияние напряжений на водородосодержание стали, затем определяли распределение водорода по сечению образца в зависимости от напряжения в нем, далее оценивали влияние напряжений на электродный потенциал образца.

Исследования влияния внешних статических нагрузок на абсорбцию водорода металлом в процессе его катодной поляризации показали, что такие нагрузки повышают количество абсорбированного водорода. Причем с увеличением приложенной нагрузки растет и водородосодержание металла.

На рис. 1 для проволоочных образцов приведены зависимости водородосодержания металла от величины растягивающей нагрузки. Видно, что содержание водорода с увеличением внешней растягивающей нагрузки сначала растет, а затем снижается. Подобную зависимость концентрации

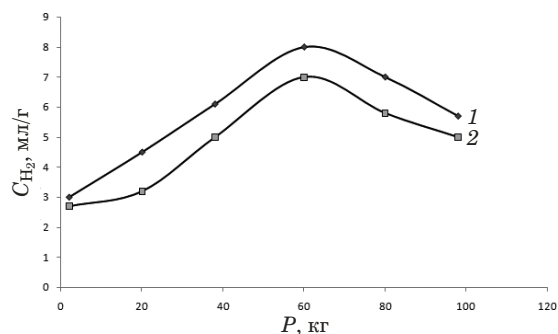


Рис. 1. Зависимости водородосодержания металла C_{H_2} от величины растягивающей нагрузки P (катодная поляризация при плотности тока 5 (1) и 20 мА/см^2 (2))

Fig. 1. Dependences of the hydrogen content in metal C_{H_2} on the magnitude of the tensile load P (cathode polarization at a current density 5 (1) and 20 mA/cm^2 (2))

абсорбированного металлом водорода от приложенной нагрузки получили и на полукольцевых образцах (максимальное водородонасыщение стали наблюдалось при деформации 70 % от предельной, при которой образец разрушался на воздухе).

Для пластинчатых образцов рассчитывали внутреннее напряжение в металле при различной степени деформации (степень деформации определялась стрелой прогиба образца). На рис. 2 представлены распределения напряжений и содержания водорода по длине деформированного образца. Видно, что максимум напряжений приходится на центральную часть. Она же при различной степени деформации поглощает наибольшее количество водорода. В целом можно заключить, что распределение водорода повторяет распределение напряжений по длине образца.

Для исследуемых типов образцов наблюдается увеличение водородосодержания металла при росте статических напряжений, как внешне приложенных, так и развивающихся в металле под действием приложенной нагрузки. Это можно объяснить деформацией, при которой нарушается расположение атомов в кристаллической решетке металла, что приводит к возникно-

Величины приложенной нагрузки, внутренних напряжений и деформации (пластинчатые образцы)

Values of applied load, internal stresses and deformation (plate samples)

Деформация f , мм	Нагрузка p , кг	Напряжение σ , кг/мм^2
1	3,5	19,2
2	7,3	40,0
3	10,5	57,5
4	12,7	70,0
5	14,2	78,0
6	15,0	82,0

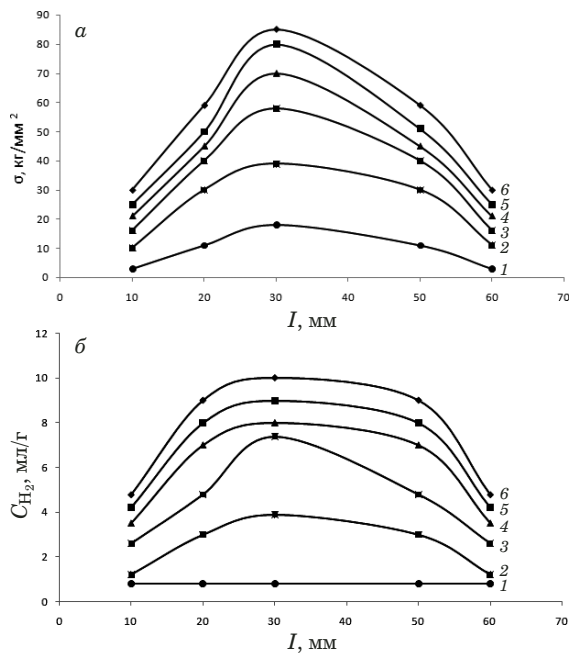


Рис. 2. Зависимости напряжений σ (а) и содержания водорода C_{H_2} (б) от длины пластинчатого образца l при степени деформации 1 (1), 2 (2), 3 (3), 4 (4), 5 (5) и 6 мм (6)

Fig. 2. Dependences of stresses σ (a) and hydrogen content C_{H_2} (b) on the length of the plate sample l at the deformation degree 1 (1), 2 (2), 3 (3), 4 (4), 5 (5), and 6 mm (6)

вению разного рода дефектов и несовершенств, к которым относятся вакантные места в решетке кристалла, атомы в междоузлиях, дислокации и др.

Неравномерное распределение водорода по сечению металла с концентрацией в основном в приповерхностных слоях [5] играет значительную роль в разрушении металла, поскольку процессы его повреждаемости протекают, главным образом, в поверхностном слое. Проведенные испытания показали, что приложение нагрузок или деформирование металла существенно влияет на распределение водорода по сечению металла (рис. 3).

Установили, что максимальное содержание поглощенного металлом водорода наблюдается для проволоочных образцов в слое толщиной 6–13, для полукольцевых — 2–4, для пластинчатых — 20–40 мкм. Из этого следует, что в сталях различного состава и структуры толщина слоя, содержащего максимальное количество поглощенного водорода, различна. Отметим, что в стали типа X18H9T большее количество водорода, абсорбированного металлом, сосредоточено в тонком поверхностном слое металла.

Из представленных данных видно, что приложение растягивающей нагрузки и деформирование изгибом способствуют увеличению количества поглощенного металлом водорода. Причем резко растет водородосодержание поверхностных

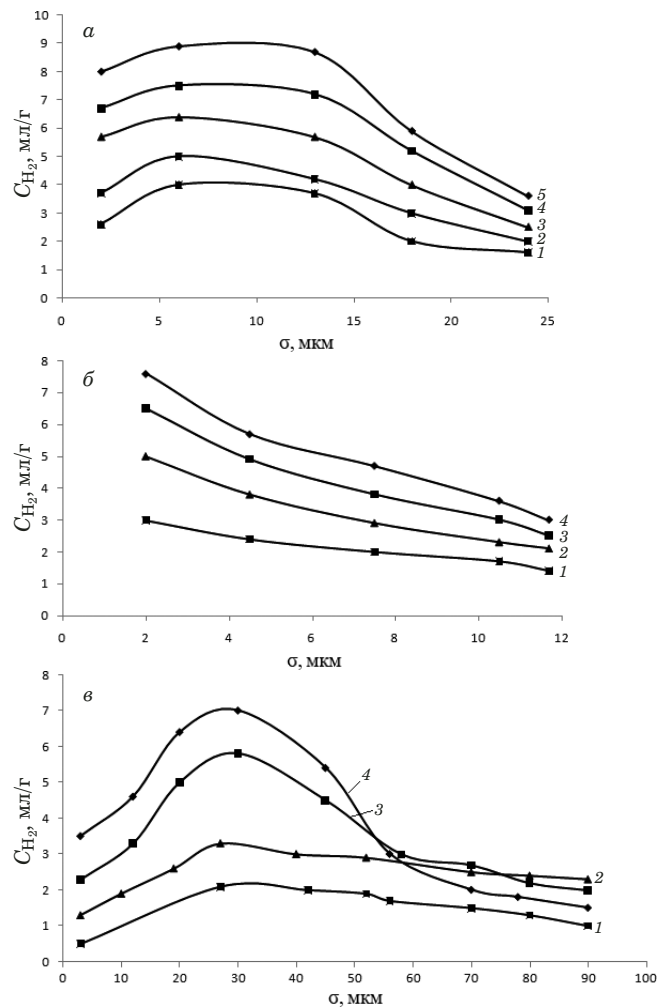


Рис. 3. Зависимости содержания водорода C_{H_2} от величины напряжений σ для проволоочных (а), полукольцевых (б) и пластинчатых (в) образцов при нагрузках растяжения 0 (1), 20 (2), 40 (3), 50 (4), 60 кг (5) и деформациях сжатия 0 (1), 30 (2), 50 (3), 70 % (4) и изгибом 0 (1), 2 (2), 4 (3), 6 мм (4) соответственно (плотность тока — 0,5 мА/см², время поляризации — 4 сут, электролит — морская вода + H₂S)

Fig. 3. Dependences of the hydrogen content of C_{H_2} on the magnitude of stresses σ for wire (a), semi-ring (b), and plate (c) samples under tensile loads 0 (1), 20 (2), 40 (3), 50 (4), 60 kg (5) and compression deformations 0 (1), 30 (2), 50 (3), 70 % (4) and bend 0 (1), 2 (2), 4 (3), 6 mm (4), respectively (current density — 0.5 mA/cm², polarization time — 4 days, electrolyte — seawater + H₂S)

слоев стали. Глубина же слоя, содержащего максимальное количество поглощенного водорода, с повышением степени деформации несколько уменьшается.

Свойства металла под влиянием водорода меняются вследствие взаимодействия последнего с дислокациями, имеющимися в металле или образующимися во время пластической деформации [15–20]. Изменения дислокационной структуры в процессе деформации приводят, видимо, к изменению условий абсорбции водорода металлом.

Резкое повышение водородосодержания поверхностных слоев стали с ростом приложенной растягивающей нагрузки или при увеличении степени деформации металла изгибом может происходить из-за увеличения плотности дислокаций в поверхностных слоях. Возникающие при деформации кристаллической решетки дислокации, вакансии и другие дефекты будут двигаться по направлению приложенной нагрузки, т.е. к поверхности металла.

При исследовании влияния напряжений на электродный потенциал металла выявили, что электродные потенциалы всех типов образцов становятся более отрицательными.

На рис. 4 приведены изменения стационарного потенциала проволочных и пластинчатых образцов в зависимости от приложенной нагрузки. Видно, что повышение нагрузки вызывает разблагораживание потенциала. В момент приложения нагрузки (проволочные образцы) наблюдается резкое смещение потенциала в область отрицательных значений (от $10 \pm 2,2$ (для нагрузки 20 кг) до $45 \pm 2,3$ мВ (для 60 кг)).

В случае пластинчатых образцов с ростом степени деформации (внутренних напряжений в металле) кривые лежат в области более отрицательных значений потенциала. При этом по длине пластинчатого деформированного образца потенциал распределен неравномерно (наиболее напряженная центральная часть образца имеет более электроотрицательный потенциал).

Действие напряжений и пластических деформаций на электрохимические характеристики металла можно объяснить пониженной работой выхода у деформированного металла [15], т.е. ослаблением связи Me–O и, следовательно, большей легкостью для иона Me^+ покинуть решетку по сравнению с недеформированным металлом. Кроме того, образующаяся на напряженном или деформированном металле в начальный момент действия электролита пленка содержит больше трещин и большего размера, чем на недеформированном или ненапряженном образце. Это будет определять заряд поверхности металла и, соответственно, строение двойного электрического поля. Неравновесность процесса образования двойного электрического слоя (со временем он стабилизируется) объясняет первоначальный рост потенциала.

Заключение

Таким образом, проведенные исследования показали, что с увеличением величины деформации растет водородосодержание поверхностных слоев металла. Установлено, что для проволочных образцов экстремальная нагрузка составляет 60 кг/мм^2 , для полукольцевых — 70 % от предель-

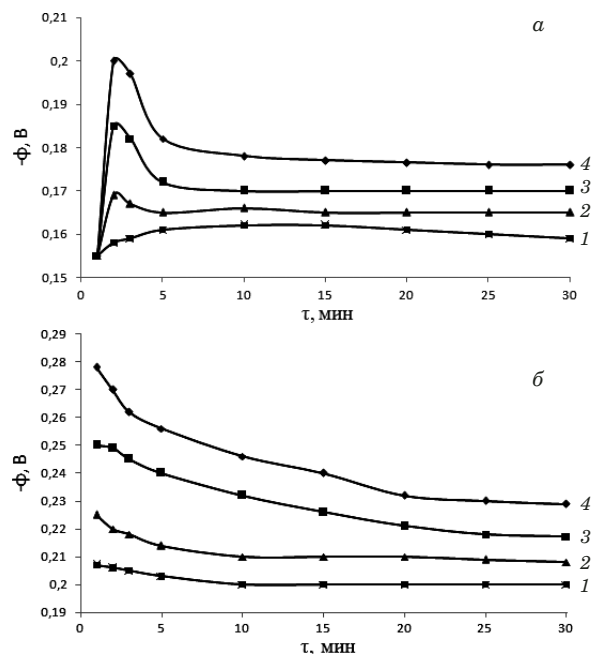


Рис. 4. Зависимости стационарного потенциала $-\Phi$ проволочных (а) и пластинчатых (б) образцов от времени τ при величине приложенной нагрузки 0 (1), 20 (2), 40 (3), 60 кг (4) и внутренних напряжений в металле 0 (1), 40 (2), 70 (3), 80 кг/мм² (4) соответственно

Fig. 4. Dependences of the stationary potential $-\Phi$ of wire (a) and plate (b) samples on the time τ at the magnitude of the applied load 0 (1), 20 (2), 40 (3), 60 kg (4) and internal stresses in the metal 0 (1), 40 (2), 70 (3), 80 kg/mm² (4), respectively

ной, при которой образец разрушается на воздухе. В сталях различного состава и структуры толщина слоя, содержащего максимальное количество поглощенного водорода, различна. Так, для проволочных образцов максимальное содержание поглощенного металлом водорода наблюдается в слое 6 – 13 мкм, для полукольцевых — 2 – 4, для пластинчатых — 20 – 40 мкм. Растягивающая нагрузка и деформирование металла изгибом способствуют увеличению количества поглощенного водорода. Под влиянием статических нагрузок и, соответственно, при развитии внутренних напряжений в металле для всех трех типов образцов наблюдалось резкое разблагораживание потенциала, наиболее выраженное в первые минуты испытания.

Финансирование

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета института (учреждения, организации). Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Конфликт интересов

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Раковская Е. Г., Занько Н. Г., Ягунова Л. К. Определенные содержания водорода в приповерхностных слоях стали У8А с применением токов высокой частоты / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2021. Т. 87. № 7. С. 44 – 48. DOI: 10.26896/1028-6861-2021-87-7-44-48
2. Кутепов С. Н., Клементьев Д. С., Калинин А. А. Влияние микроструктурных факторов на характер водородного растрескивания сварных соединений высокопрочных сталей (обзор) / Известия ТГУ. Технические науки. 2022. № 8. С. 398 – 411. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-8-398-412
3. Сергеев Н. Н., Извольский В. В., Сергеев А. Н. Прогнозирование долговечности арматурного проката в условиях коррозионного растрескивания под напряжением / Вестник РГАТА имени П. А. Соловьева. 2019. № 2(49). С. 93 – 104.
4. Li X., Ma X., Song X., et al. Review of Hydrogen Embrittlement in Metals: Hydrogen Diffusion, Hydrogen Characterization, Hydrogen Embrittlement Mechanism and Prevention / Acta Metallurgica Sinica (English Letters). 2020. Vol. 33. N 6. P. 759 – 773. DOI: 10.1007/s40195-020-01039-7
5. Раковская Е. Г., Ягунова Л. К. Исследование влияния растягивающих напряжений на абсорбцию водорода при катодной защите стали в морской воде / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2020. Т. 86. № 6. С. 24 – 28. DOI: 10.26896/1028-6861-2020-86-6-24-28
6. Петров А. И., Разуваева М. В. Анализ влияния предела текучести на коррозионное растрескивание под напряжением мартенситных и ферритных сталей в кислых средах / Журнал технической физики. 2022. Т. 92. № 10. С. 1588 – 1594. DOI: 10.21883/JTF.2022.10.53251.154-22
7. Голубцов В. А., Рябчиков И. В., Мизин В. Г. Влияние химически активных элементов на водородное растрескивание стали для труб / Сталь. 2016. № 3. С. 50 – 53.
8. Сергеев Н. Н., Сергеев А. Н., Кутепов С. Н. и др. Анализ теоретических представлений о механизмах водородного растрескивания металлов и сплавов / Известия ЮЗГУ. 2017. № 3(72). С. 6 – 33. DOI: 10.21869/2223-1560-2017-21-3-6-33
9. Шашкова Л. В., Манаков Н. А., Козик Е. С., Свиденко Е. В. Влияние диффузионно-подвижного и связанного водорода на водородную хрупкость стали / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. Т. 85. № 8. С. 59 – 66. DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-8-59-66
10. Averina Yu., Zhukov D., Tsevkova V., et al. Hydrogen embrittlement and peculiar properties of determining the concentration of hydrogen in structural steels / 29th International Conference on Metallurgy and Materials. Conference Proceedings. — Brno, 2020. P. 387 – 392. DOI: 10.37904/metal.2020.3494
11. Семенов Я. С., Ларионов В. П. Выявление механизмов замедленного разрушения низколегированных высокопрочных сталей / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2001. Т. 67. № 10. С. 43 – 47.
12. Сергеев Н. Н., Сергеев А. Н., Кутепов С. Н. и др. Механизм водородного растрескивания металлов и сплавов. Ч. 1 (обзор) / Металловедение. 2018. № 3. С. 27 – 33.
13. Merson E., Krishtal M., Merson D., et al. Effect of strain rate on acoustic emission during hydrogen assisted cracking in high carbon steel / Material Science and Engineering: A. 2012. Vol. 550. P. 408 – 417.
14. Хижняков В. И., Негодин А. В. Коррозионное растрескивание катодно защищаемых газонефтепроводов в процессе длительной эксплуатации / Вестник ТГАСУ. 2017. № 4. С. 264 – 267.
15. Белоглазов С. М. Электрохимический водород и металлы. Поведение, борьба с охрупчиванием. — Калининград: КГУ, 2004. — 321 с.

16. Фортуна А. С., Астафурова Е. Г., Астафуров С. В. и др. Влияние электролитического наводороживания на особенности дислокационной структуры, формирующейся в аустенитной нержавеющей стали 01X17H14M3 при одноосном растяжении / Вестник Тамбовского университета. 2018. С. 555 – 558. DOI: 10.20310/1810-0198-2018-23-123p-555-558
17. Мушников С. Ю., Сагарадзе В. В., Филипов Ю. И. и др. Сравнительный анализ коррозионного растрескивания аустенитных сталей с разным содержанием азота в хлоридных и водородсодержащих средах / Физика металлов и металловедение. 2015. Т. 116. № 6. С. 663 – 672. DOI: 10.7868/S0015323015060054
18. Michler T., San Marchi C., Naumann J., et al. Hydrogen environment embrittlement of stable austenitic steels / International Journal of Hydrogen Energy. 2012. Vol. 37. P. 16231 – 16246.
19. Astafurova E. G., Maier G. G., Melnikov E. V., et al. Effect of hydrogenation on mechanical properties and tensile fracture mechanism of a high-nitrogen austenitic steel / Journal of Materials Science. 2017. Vol. 52. N 8. P. 4224 – 4233. DOI: 10.1007/s10853-016-0676-z
20. Мушников С. Ю., Костин С. К., Сагарадзе В. В., Катаева Н. В. Структура, свойства и сопротивление коррозионному растрескиванию азотсодержащей аустенитной стали, упрочненной термомеханической обработкой / Физика металлов и металловедение. 2017. Т. 118. № 11. С. 1223 – 1235. DOI: 10.7868/S0015323017110092

REFERENCES

1. Rakovskaya E. G., Zanko N. G., Yagunova L. K. Determination of the hydrogen content in the near-surface layers of U8A steel using high-frequency currents / Industr. Lab. Mater. Diagn. 2021. Vol. 87. N 7. P. 44 – 48 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2021-87-7-44-48
2. Kutepov S. N., Klementev D. S., Kalinin A. A. Influence of microstructural factors on the nature of hydrogen cracking of welded joints of high-strength steels (review) / Izv. TGU. Tekhn. Nauki. 2022. N 8. P. 398 – 411 [in Russian]. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-8-398-412
3. Sergeev N. N., Izvolsky V. V., Sergeev A. N. Forecasting the durability of rebar under stress corrosion cracking / Vestn. RGATA im. P. A. Solovyova. 2019. N 2(49). P. 93 – 104 [in Russian].
4. Li X., Ma X., Song X., et al. Review of Hydrogen Embrittlement in Metals: Hydrogen Diffusion, Hydrogen Characterization, Hydrogen Embrittlement Mechanism and Prevention / Acta Metallurgica Sinica (English Letters). 2020. Vol. 33. N 6. P. 759 – 773. DOI: 10.1007/s40195-020-01039-7
5. Rakovskaya E. G., Yagunova L. K. Investigation of the influence of tensile stresses on hydrogen absorption during cathodic protection of steel in sea water / Industr. Lab. Mater. Diagn. 2020. Vol. 86. N 6. P. 24 – 28 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2020-86-6-24-28
6. Petrov A. I., Razuvaeva M. V. Analysis of the effect of yield strength on stress corrosion cracking of martensitic and ferritic steels in acidic environments / Journal of technical physics. 2022. Vol. 92. N 10. P. 1588 – 1594 [in Russian]. DOI: 10.21883/JTF.2022.10.53251.154-22
7. Golubtsov V. A., Ryabchikov I. V., Mizin V. G. Influence of chemically active elements on hydrogen cracking of steel for pipes / Stal'. 2016. N 3. P. 50 – 53 [in Russian].
8. Sergeev N. N., Sergeev A. N., Kutepov S. N., et al. Analysis of theoretical ideas about the mechanisms of hydrogen cracking of metals and alloys / Izvestiya YuZGU. 2017. N 3(72). P. 6 – 33 [in Russian]. DOI: 10.21869/2223-1560-2017-21-3-6-33
9. Shashkova L. V., Manakov N. A., Kozik E. S., Svidenko E. V. Influence of diffusion-mobile and bound hydrogen on the hydrogen brittleness of steel / Industr. Lab. Mater. Diagn. 2019. Vol. 85. N 8. P. 59 – 66 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-8-59-66
10. Averina Yu., Zhukov D., Tsevkova V., et al. Hydrogen embrittlement and peculiar properties of determining the con-

- centration of hydrogen in structural steels / 29th International Conference on Metallurgy and Materials. Conference Proceedings. — Brno, 2020. P. 387 – 392.
DOI: 10.37904/metal.2020.3494
11. **Semenov Ya. S., Larionov V. P.** Identification of the mechanisms of delayed fracture of low-alloy high-strength steels / *Industr. Lab. Mater. Diagn.* 2001. Vol. 67. N 10. P. 43 – 47 [in Russian].
 12. **Sergeev N. N., Sergeev A. N., Kutepov S. N., et al.** Mechanism of hydrogen cracking of metals and alloys. P. 1 (review) / *Materialovedenie.* 2018. N 3. P. 27 – 33 [in Russian].
 13. **Merson E., Krishtal M., Merson D., et al.** Effect of strain rate on acoustic emission during hydrogen assisted cracking in high carbon steel / *Material Science and Engineering: A.* 2012. Vol. 550. P. 408 – 417.
 14. **Khizhnyakov V. I., Negodin A. V.** Corrosion cracking of cathodically protected oil and gas pipelines during long-term operation / *Vestn. TGASU.* 2017. N 4. P. 264 – 267 [in Russian].
 15. **Beloglazov S. M.** Electrochemical hydrogen and metals. Behavior, fight against embrittlement. — Kaliningrad: KGU, 2004. — 321 p. [in Russian].
 16. **Fortuna A. S., Astafurova E. G., Astafurov S. V., et al.** The influence of electrolytic hydrogenation on the features of the dislocation structure formed in austenitic stainless steel 01Kh17N14M3 under uniaxial tension / *Vestn. Tambov. Univ.* 2018. P. 555 – 558 [in Russian].
DOI: 10.20310/1810-0198-2018-23-123p-555-558
 17. **Mushnikova S. Yu., Sagaradze V. V., Fillipov Yu. I., et al.** Comparative analysis of stress-corrosion cracking of austenitic steels with different nitrogen contents in chloride and hydrogen-containing environments / *Fiz. Met. Metalloved.* 2015. Vol. 116. N 6. P. 663 – 672 [in Russian].
DOI: 10.7868/S0015323015060054
 18. **Michler T., San Marchi C., Naumann J., et al.** Hydrogen environment embrittlement of stable austenitic steels / *International Journal of Hydrogen Energy.* 2012. Vol. 37. P. 16231 – 16246.
 19. **Astafurova E. G., Maier G. G., Melnikov E. V., et al.** Effect of hydrogenation on mechanical properties and tensile fracture mechanism of a high-nitrogen austenitic steel / *Journal of Materials Science.* 2017. Vol. 52. N 8. P. 4224 – 4233.
DOI: 10.1007/s10853-016-0676-z
 20. **Mushnikova S. Yu., Kostin S. K., Sagaradze V. V., Kataeva N. V.** Structure, properties and resistance to corrosion cracking of nitrogen-containing austenitic steel, strengthened by thermomechanical treatment / *Fiz. Met. Metalloved.* 2017. Vol. 118. N 11. P. 1223 – 1235 [in Russian].
DOI: 10.7868/S0015323017110092