



Обзорная статья

УДК 620.193.27:669.018.293

DOI 10.17073/0368-0797-2022-3-154-162



МЕТОДЫ КОРРОЗИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ПРИ РАЗРАБОТКЕ И ПРОМЫШЛЕННОМ ОСВОЕНИИ НОВЫХ СУДОСТРОИТЕЛЬНЫХ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ И ТЕХНОЛОГИЙ ИХ ПРОИЗВОДСТВА. ОБЗОР. ЧАСТЬ II. ИСПЫТАНИЯ НА КОРРОЗИОННОЕ РАСТРЕСКИВАНИЕ И НАТУРНЫЕ МОРСКИЕ ИСПЫТАНИЯ

А. А. Альхименко¹, А. Д. Давыдов¹, А. А. Харьков¹, С. Ю. Мушникова²,
О. А. Харьков², О. Н. Парменова², А. А. Яковицкий²

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29)

² ЦНИИ КМ «Прометей» имени академика И.В. Горынина НИЦ «Курчатовский институт» (Россия, 191015, Санкт-Петербург, ул. Шпалерная, 49)

Аннотация. В обзоре изложены методы испытаний на коррозионное растрескивание, которые реализуют различные условия нагружения образцов: при постоянной статической нагрузке или деформации; при постоянной или возрастающей нагрузке образцов с предварительно выращенной усталостной трещиной; с постоянной малой скоростью деформирования образцов в условиях растяжения. Проведение подобных испытаний необходимо для определения сопротивления судостроительных материалов, которые должны эксплуатироваться в составе нагруженных судовых конструкций, соприкасающихся с морской водой. Приведены краткие представления о механизме коррозионного растрескивания сталей и сплавов. Указана необходимость проведения стендовых испытаний сталей и их сварных соединений, а также моделей, имитирующих отдельные узлы и элементы конструкций. На данном этапе обеспечиваются условия, максимально приближенные к условиям эксплуатации за счет экспозиции в различных климатических зонах Мирового океана (вариации температуры, концентрации хлоридов, количества растворенного кислорода, степени биообрастания и их одновременное воздействие). Показано, что в ходе натурных испытаний (завершающий этап комплексных обязательных сдаточных испытаний) новые материалы, перспективные для использования в морских условиях, проходят окончательную оценку коррозионной стойкости в виде элементов судовых конструкций и систем в условиях эксплуатации судна.

Ключевые слова: коррозия, коррозионное растрескивание, условия нагружения, условия эксплуатации, усталостная трещина, натурные испытания, испытания с постоянной малой скоростью деформации

Финансирование: Исследования выполнены при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации программы Научного центра мирового уровня по направлению «Передовые цифровые технологии» СПбПУ (соглашение № 075-15-2020-934 от 17.11.2020).

Для цитирования: Альхименко А.А., Давыдов А.Д., Харьков А.А., Мушников С.Ю., Харьков О.А., Парменова О.Н., Яковицкий А.А. Методы коррозионных испытаний, применяемые при разработке и промышленном освоении новых судостроительных сталей и сплавов и технологий их производства. Обзор. Часть II. Испытания на коррозионное растрескивание и натурные морские испытания // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 3. С. 154–162. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-3-154-162>

Review article

METHODS OF CORROSION TESTING USED FOR DEVELOPMENT AND COMMERCIAL EXPLOITATION OF NEW SHIPBUILDING STEELS AND ALLOYS. REVIEW. PART II. CORROSION CRACKING AND FIELD MARINE TESTS

A. A. Al'khimenko¹, A. D. Davydov¹, A. A. Khar'kov¹, S. Yu. Mushnikova²,
O. A. Khar'kov², O. N. Parmenova², A. A. Yakovitskii²

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (29 Politekhnikeskaya Str., St. Petersburg 195251, Russian Federation)

² Academician I.V. Gorynin Central Research Institute of Structural Materials “Prometey” National Research Center “Kurchatov Institute” (49 Shpalernaya Str., St. Petersburg 191015, Russian Federation)

Abstract. The review describes methods of stress corrosion cracking (SCC) tests that implement various conditions for samples loading: at a constant static load or deformation, at a constant or increasing load of samples with a previously grown fatigue crack, with a slow strain rate. Such tests shall be carried out to determine the resistance of shipbuilding materials to be used in loaded ship structures in contact with seawater. Brief descriptions of the mechanism of stress corrosion cracking of steels and alloys are given. The necessity to carry out bench tests of steels and their welded joints, as well as models simulating individual units and elements of structures, is indicated. At this stage, conditions are ensured as close to operating conditions as possible due to exposure in various climatic zones of the world's oceans (variations in temperature, chloride concentration, amount of dissolved oxygen, degree of biofouling, and their simultaneous impact). It is shown that during verification field tests (final stage) new materials promising for operation in marine conditions pass the final evaluation of corrosion resistance in the form of elements of ship structures and systems in the conditions of ship operation.

Keywords: corrosion, stress corrosion cracking, loading conditions, operating conditions, fatigue crack, field tests, slow strain rate testing

Funding: The research was partially funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as part of World-Class Research Center program: Advanced Digital Technologies (contract No. 075-15-2020-934 dated 17.11.2020).

For citation: Al'khimenko A.A., Davydov A.D., Khar'kov A.A., Mushnikova S.Yu., Khar'kov O.A., Parmenova O.N., Yakovitskii A.A. Methods of corrosion testing used for development and commercial exploitation of new shipbuilding steels and alloys. Review. Part II. Corrosion cracking and field marine tests. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 3, pp. 154–162. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-3-154-162>

ВВЕДЕНИЕ

Коррозионное растрескивание (КР) является одним из наиболее опасных видов коррозионных повреждений, которые приводят к серьезным разрушениям нагруженных конструкций не только в судостроении, но также в авиации, тепловой и атомной энергетике, строительстве, химической, нефтегазодобывающей и нефтеперерабатывающей, пищевой и других отраслях промышленности [1]. На вызываемые КР разрушения приходится около 30 % материального ущерба от коррозии [2]. Коррозионному растрескиванию могут подвергаться металлические материалы в коррозионной среде только при воздействии растягивающих механических напряжений.

В судостроительной промышленности КР могут подвергаться корпусные конструкции, соприкасающиеся с морской водой, в местах сосредоточения наиболее высоких механических нагрузок, которыми служат, как правило, сварные соединения. Для глубоководной морской техники напряжения в конструкции возникают за счет гидравлического давления, создаваемого при погружении [3–8].

При внедрении в проектирование и строительство кораблей, судов и морских сооружений новых корпусных сталей и сплавов обязательным является оценка их склонности к КР [3, 8]. В течение многих десятилетий для этой цели применялись испытания с гладкой поверхностью при постоянной нагрузке или деформации [1, 9–13]. При использовании метода с постоянной нагрузкой в образцах создают напряжения определенной величины и выдерживают в синтетической морской воде или 3,5 %-ном растворе хлорида натрия до разрушения или до заданной временной базы. По результатам испытаний серии образцов строится кривая длительной коррозионной прочности в координатах «напряжение – время до разрушения». Метод испытаний с постоянной деформацией заключается в создании напряженного состояния с помощью фиксированной деформации и контроле появления трещин в процессе испытаний. Считается, что при таком методе испыта-

ний имитируются напряжения, возникающие при изготовлении конструкций (остаточные сварочные, сборочные) [12].

Недостатками испытаний при постоянной нагрузке или деформации является необходимость в большом количестве образцов и испытательных машин, при этом длительность испытаний составляет тысячи часов. Переход на более ускоренные испытания позволил получать больший объем информации при значительно меньших затратах металла и времени.

Тем не менее, испытания на КР при постоянной нагрузке или деформации выполняются на стадии проверки коррозионных свойств судостроительных материалов в природной морской воде. Морские стендовые испытания стали проводиться с 1946 г. по инициативе Г.В. Акимова, когда под его руководством были построены специальные коррозионные станции в Баренцевом море (Дальние Зеленцы) и Черном море (Геленджик). В следующие десятилетия были созданы морские коррозионные станции в Севастополе, Одессе и Владивостоке.

Морские испытания материалов выполняются с целью определения их стойкости к общей или локальной коррозии (язвенной, щелевой, контактной). Напряжения в образцах для проведения испытаний на КР создают за счет образования сварных швов или наплавов.

Завершающим этапом оценки коррозионной стойкости новых материалов для судостроения являются натурные испытания, которые проводятся на эксплуатируемых судах. Например, для оценки коррозионной стойкости новых корпусных сталей во время постройки или докового ремонта судна образцы закрепляют на подводной части корпуса так, чтобы они были полностью электрически изолированы от корпуса для исключения контактной коррозии [14].

ИСПЫТАНИЯ НА КОРРОЗИОННОЕ РАСТРЕСКИВАНИЕ

Явлению КР конструкционных сталей и сплавов уделяется большое внимание многими исследователя-

ми [1, 2, 8 – 19]. Предложен механизм КР в морской воде, представляющий последовательное протекание повторяющихся процессов в вершине коррозионной трещины, а именно:

- локального анодного растворения металла;
- гидролиза продуктов коррозии, вызывающего образование дополнительных ионов водорода;
- водородного охрупчивания металла под действием растягивающих напряжений и возникающих у вершины трещины локальных зон пластической деформации.

Установлены факторы, влияющие на сопротивляемость КР, к которым относятся металлургическое качество стали, уровень катодной поляризации при применении электрохимической защиты, величина внешних и внутренних напряжений, в том числе сварочных. Показано, что первостепенное значение в сопротивлении материалов КР имеет уровень прочности [20 – 28].

В настоящее время в судостроении для определения стойкости сталей и сплавов к КР широкое распространение получили различные варианты испытаний, основанные на двух методах:

- метод испытаний образцов с предварительно выращенной усталостной трещиной (основанный на принципах механики разрушения) при различных способах нагружения [29 – 36];
- метод испытаний образцов при постоянной малой скорости деформации (SSRT – *Slow strain rate testing*) [13, 29, 37 – 41].

Основанием для применения образцов с усталостной трещиной является предположение о наличии трещиноподобных дефектов в реальных конструкциях в виде литейных пор, дефектов прокатки,ковки или при сварке и сборке изделий, а также вследствие образования поверхностных локальных коррозионных повреждений при эксплуатации. Это может сократить или исключить стадию образования трещины. Склонность к КР устанавливается с помощью аппарата линейной механики разрушения (ЛМР) по силовому критерию K_I (коэффициенту интенсивности напряжений или вязкости разрушения), который определяет напряженное состояние у вершины трещины. Рост трещины в коррозионной среде начинается при $K_I = K_{Isc}$, на воздухе при K_{Ic} . Чем больше различие между K_{Isc} и K_{Ic} , тем выше склонность к КР [42 – 46]. Для испытаний на КР используются образцы, которые приведены в ГОСТ 25.506, ГОСТ 9.903, ASTM E 1681. Применение методов ЛМР позволяет оценивать скорость роста трещины, что впервые экспериментально определил Браун [47].

Для современных конструкционных материалов, обладающих при высокой прочности значительной пластичностью, реализация условий ЛМР при испытаниях на КР становится недостижимой. Это привело к развитию методов нелинейной механики разрушения [30 – 32], при применении которых определяют

J -интеграл (аналог K_I), раскрытие у вершины трещины ее берегов δ или CTOD (*Crack tip open displacement*). Для определения этих величин строятся R -кривые путем многократного нагружения и разгрузки образца и измерения с помощью экстензометра раскрытия трещины (рис. 1).

Опыт проведения испытаний на КР образцов с трещиной в судостроении выявил их существенные ограничения. К ним можно отнести:

- трудоемкость изготовления образцов сложной геометрической формы;
- необходимость нанесения трещины на специальном оборудовании;
- выход из строя датчиков раскрытия трещины из-за воздействия коррозионной среды;
- искажение результатов расчета параметров разрушения при ветвлении трещины или ее прохождении по определенным структурным составляющим металла.

О возможности проведения испытаний на КР при растяжении образца исследуемого материала с постоянной малой скоростью деформации впервые появились публикации около полувека назад [14, 33]. Незначительные по сравнению со статическими испытаниями сроки их проведения, а также установленное соответствие получаемых обоими методами данных по склонности сталей к воздействию коррозионной среды [48] делают применение метода SSRT наиболее предпочтительным при сравнительных испытаниях различных материалов.

Рекомендованные существующими стандартами скорости деформации при проведении испытаний сталей и сплавов находятся в пределах $10^{-7} - 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ [49, 50]. В работе [40] установлено, что судостроительные корпусные стали в наибольшей степени проявляют чувствительность к КР в морской воде при скорости деформации $\dot{\epsilon} = 10^{-6} \text{ с}^{-1}$. Уменьшение скорости деформации до 10^{-7} с^{-1} практически не влияло на характеристики

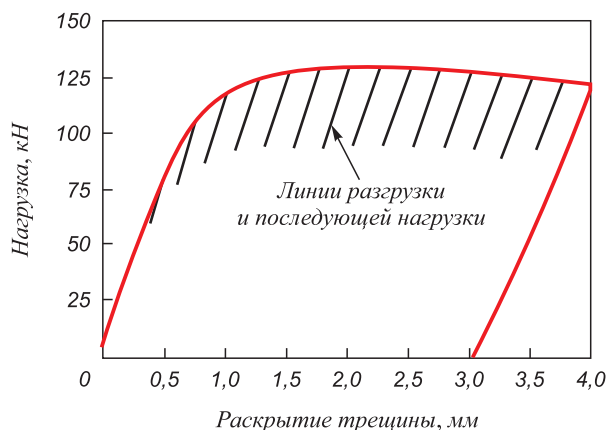


Рис. 1. Определение δ методом упругой податливости путем построения R -кривой

Fig. 1. Determination of δ with elastic compliance method by R -curve construction

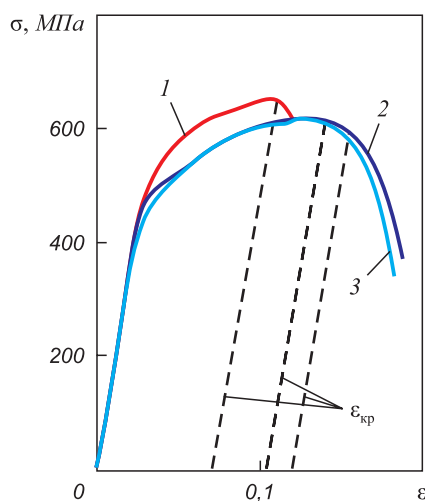


Рис. 2. Диаграмма «напряжение σ – относительная деформация ϵ », полученная при испытании стали D40S на коррозионное растрескивание методом растяжения с малой постоянной скоростью деформации при различных условиях испытаний:

1 – 3,5 % NaCl, катодная поляризация; 2 – 3,5 % NaCl; 3 – воздух

Fig. 2. Stress σ – strain ϵ diagram obtained at corrosion cracking test of D40S steel by low constant strain rate stretching under different test conditions:

1 – 3.5 % NaCl, cathodic polarization; 2 – 3.5 % NaCl; 3 – air

склонности стали к КР, но увеличивало длительность эксперимента в 10 раз. При испытании с малой скоростью деформации нагружение начинают от нулевой нагрузки до разрушения образца с построением диаграммы растяжения в координатах «напряжение – деформация». Чтобы определить влияние коррозионной среды, для сравнения аналогичную диаграмму исследуемого материала строят в инертной среде (рис. 2).

По окончании испытаний измеряются относительное удлинение δ и относительное сужение ψ образцов, осматривается поверхность образца (на наличие коррозионных трещин) и проводятся фрактографические исследования изломов с помощью оптического и электронного микроскопа.

Сопоставление диаграмм растяжения и значений $\epsilon_{кр}$, σ_{max} , δ , ψ , полученных на воздухе и в испытательной среде, позволяет определить склонность материала к КР.

Более точным критерием, получаемым из диаграммы, который определяет степень склонности материала к КР, является относительная деформация, при которой начинается разрушение образца в коррозионной среде ($\epsilon_{кр}$). Другим критерием может служить напряжение, при котором начинается рост трещины ($\sigma_{кр}$) [40, 41]. Это напряжение определяется по точке расхождения кривых для инертной и коррозионной среды. Также можно использовать отношение $\epsilon_{кр}$ и $\sigma_{кр}$ к относительной деформации и разрушающему напряжению, полученным при испытании в инертной среде. Деформационный критерий, зависящий от среды, температуры и свойств материала, может характеризовать его состояние в условиях статического, квазистатического и циклического нагружения. По сравнению с силовым критерием он лучше отражает физическую природу коррозионно-механического разрушения и влияние на него внешних и внутренних факторов, а силовой критерий удобен в качестве непосредственных характеристик при расчетах работоспособности изделий и конструкций [2, 25 – 26, 51 – 54].

Важным этапом определения коррозионной стойкости судостроительных материалов являются стендовые испытания в природной морской воде или морской атмосфере, максимально приближенные к реальным условиям эксплуатации. Образцы устанавливаются на длительный срок (не менее одного года), в течение которого проводятся промежуточные осмотры с фиксацией коррозионных поражений с учетом стандарта ASTM [55]. Экспозиция металлических образцов в различных районах Мирового океана позволяет оценить их коррозионную стойкость в зависимости от изменяющихся параметров: температуры морской воды, солености, количества растворенного кислорода и степени биообрастания [56, 57].

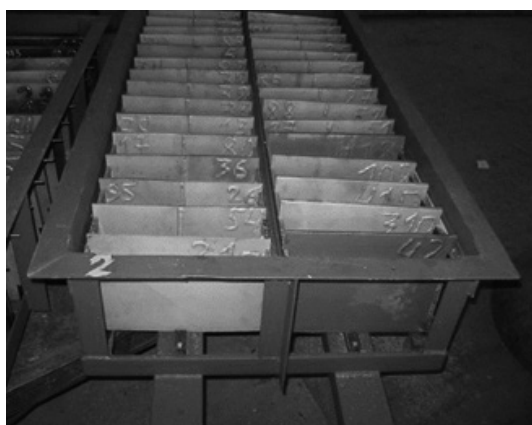


Рис. 3. Натурные испытания при погружении образцов в морскую воду с использованием кассеты

Fig. 3. Field tests for immersing samples in seawater using a cassette

На рис. 3 представлен стенд в виде кассеты с закрепленными в ней образцами различных судостроительных сталей, в том числе со сварными швами, размером $350 \times 250 \times (4 \div 20)$ мм перед началом испытаний и в момент погружения [49].

В качестве примера крупногабаритных сварных образцов корпусных сталей на рис. 4 показана модель сварного соединения с дополнительно наплавленным контуром. На таких образцах, помимо стойкости к общей коррозии, оценивается склонность к КР под действием остаточных сварочных напряжений.

Как правило, заключительной стадией проверки коррозионной стойкости материала являются натурные испытания, которые проводят на элементах судовых конструкций и систем, выполненных из исследуемого материала, в условиях эксплуатации судна. Натурные испытания длятся от одного года до нескольких лет. По ним окончательно оценивается коррозионная стойкость стали или сплава.

После проведения натурных испытаний принимается окончательное решение о возможности использования нового материала в судостроении в составе конструкций, работающих в морской воде, и, при необходимости, о применении средств защиты от коррозии, а также определяется срок эксплуатации до очередного планового ремонта.

Выводы

Сварные корпусные конструкции морских судов и стационарных сооружений одновременно испытывают воздействие морской воды и механических напряжений, что приводит к необходимости оценки их сопротивления коррозионному растрескиванию.

В настоящее время в судостроении для определения стойкости сталей и сплавов к КР широкое распростра-

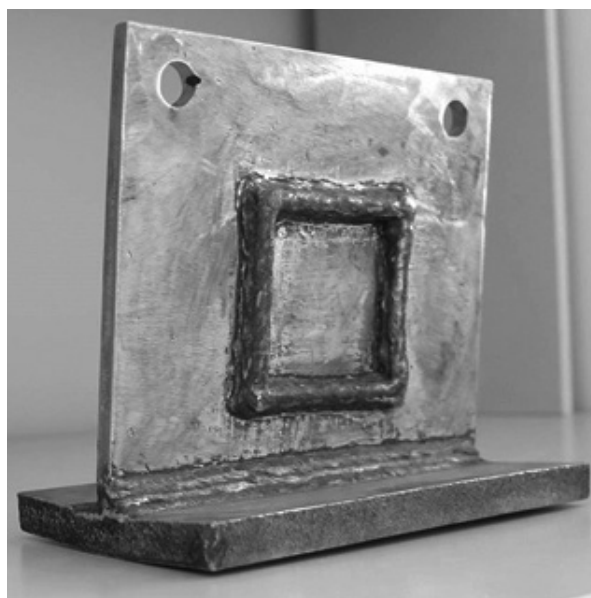


Рис. 4. Модельные сварные конструкции для испытаний при полном погружении в морскую воду

Fig. 4. Model welded structures for tests at full immersion in seawater

нение получили различные варианты испытаний, основанные на двух методах:

- метод испытаний образцов с предварительно выращенной усталостной трещиной, основанный на принципах механики разрушения, при различных способах нагружения;
- метод испытаний образцов при постоянной малой скорости деформации (SSRT).

Морские стендовые испытания сварных образцов и конструкций и натурные испытания в составе действующих судовых систем позволяют принять окончательное решение о возможности использования новых материалов в судостроении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Василенко И.И., Мелехов Р.К. Коррозионное растрескивание сталей. Киев: Наукова думка, 1977. 265 с.
2. Вороненко Б.И. Коррозионное растрескивание сталей (обзор) // Защита металлов. 1997. Т. 33. № 2. С. 132–143.
3. Горынин И.В., Грищенко Л.В., Соколов Б.В. Проблемы выбора материалов и технологий сварки при строительстве ледостойких платформ // Регистр СССР: Научно-технический сборник. 1977. Т. 1. Вып. 20. С. 120–134.
4. Соколов О.Г., Малышевский В.А., Легостаев Ю.Л., Грищенко Л.В. Современные свариваемые судостроительные стали в России и за рубежом // Сварочное производство. 1995. № 5. С. 19–21.
5. Горынин И.В., Малышевский В.А., Легостаев Ю.Л. Высокопрочные свариваемые стали // Вопросы материаловедения. 1999. № 3(20). С. 21–29.
6. Малышевский В.А., Семичева Т.Г., Владимиров Н.Ф., Хлусова Е.И. Хладостойкие стали для судостроения и морской техники // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. 2004. № 27. С. 134–149.
7. Легостаев Ю.Л. Освоение морского пути по Северному Ледовитому океану и создание корпусных материалов и средств их

1. Vasilenko I.I., Melekhov R.K. *Corrosion Cracking of Steels*. Kiev: Naukova dumka, 1977, 265 p. (In Russ.).
2. Voronenko B.I. Corrosion cracking of steels (Review). *Zashchita metallov*. 1997, vol. 33, no. 2, pp. 132–143. (In Russ.).
3. Gorynin I.V., Grishchenko L.V., Sokolov B.V. Problems of choice of materials and welding technologies in construction of ice-resistant platforms. *Registr SSSR: Nauchno-tekhnicheskii sbornik*. 1977, vol. 1, no. 20, pp. 120–134. (In Russ.).
4. Sokolov O.G., Malyshevskii V.A., Legostaev Yu.L., Grishchenko L.V. Modern welded shipbuilding steels in Russia and abroad. *Svarochnoe proizvodstvo*. 1995, no. 5, pp. 19–21. (In Russ.).
5. Gorynin I.V., Malyshevskii V.A., Legostaev Yu.L. High strength welded steels. *Voprosy materialovedeniya*. 1999, no. 3(20), pp. 21–29. (In Russ.).
6. Malyshevskii V.A., Semecheva T.G., Vladimirov N.F., Khlusova E.I. Cold-resistant steels for shipbuilding and marine equipment. *Nauchno-tekhnicheskii sbornik Rossiiskogo morskogo registra sudokhodstva*. 2004, no. 27, pp. 134–149. (In Russ.).
7. Legostaev Yu.L. Development of sea route along the Arctic Ocean and creation of shell materials and their corrosion-erosion protec-

- коррозионно-эрозионной защиты при эксплуатации ледоколов и стационарных морских ледостойких буровых установок // Вопросы материаловедения. 2012. № 2(70). С. 224–226.
8. Материалы для судостроения и морской техники. Справочник в 2-х томах / Под ред. И.В. Горынина. Т. 1. Санкт-Петербург: НПО «Профессионал», 2009. 776 с.
9. Newman R.C. Stress-Corrosion Cracking Mechanisms // Corrosion Mechanisms in Theory and Practice / Markus P., Oudar J. eds. USA: Marcel Dekker, 1995. P. 311–368.
10. Ramamurthy S., Atrens A. Stress corrosion cracking of high-strength steels // Corrosion Reviews. 2013. Vol. 31. No. 1. P. 1–31. <https://doi.org/10.1515/correv-2012-0018>
11. Brown B.F. Stress Corrosion Cracking in High Strength steel and in Aluminium and Titanium Alloys. NRL, 1972.
12. Ажогин Ф.Ф. Коррозионное растрескивание и защита высокопрочных сталей. Москва: Металлургия, 1974. 256 с.
13. Коррозия: Справочное издание / Под ред. Л.Л. Шрайера. Москва: Металлургия, 1981. 632 с.
14. Scully J.R., Moran P.J. Influence of strain on the environmental hydrogen-assisted cracking of a high strength steel in sodium chloride solution // Corrosion. 1988. Vol. 44. No. 3. P. 176–185. <https://doi.org/10.5006/1.3583922>
15. Богорад И.Я., Гоман Г.М., Климова В.А. Исследование коррозионной стойкости корпусных сталей в натуральных условиях // Технология судостроения. 1967. № 6. С. 19–25.
16. Prosek T., Iversen A., Taxen C., Thierry D. Low temperature stress corrosion cracking of stainless steels in the atmosphere in presence of chloride deposits // Corrosion. 2009. Vol. 65. No. 2. P. 105–117. <https://doi.org/10.5006/1.3319115>
17. Малышев В.Н. Коррозионное растрескивание стали X18H10T в однонормальном растворе соляной кислоты при комнатной температуре, инициируемое наводороживанием // Вопросы материаловедения. 2010. № 1. С. 117–125.
18. Сергеев Н.Н., Кутепов С.Н., Гвоздев А.Е., Агеев Е.В. Механизмы водородного растрескивания металлов и сплавов, связанные с усилением дислокационной активности // Известия Юго-Западного государственного университета. Курск. 2017. Т. 21. № 2. С. 32–42. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2017-21-2-32-47>
19. Oryshchenko A.S., Mushnikova S.Y., Kharkov A.A., Kalinin G.Y. Study of stress corrosion cracking of austenitic steels in sea water // Proceedings of the European Corrosion Congress EUROCORR 2010. September 13–17, 2010. Moscow, P. 334.
20. Wang S., Martin M.L., Sofronis P., Ohnuki S., Hashimoto N., Robertson I.M. Hydrogen-induced intergranular failure of iron // Acta Mater. 2014. Vol. 69. P. 275–282. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.01.060>
21. Novak P., Yuan R., Somerday B.P., Sofronis P., Ritchie R.O. A statistical, physical-based, micro-mechanical model of hydrogen-induced intergranular fracture in steel // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 2010. Vol. 58. No. 2. P. 206–226. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2009.10.005>
22. Маричев В.А. Современные представления о водородном охрупчивании при замедленном разрушении // Защита металлов. 1980. Т. 16. № 5. С. 531–543.
23. Bulloch J.H. Same effect of yield strength on the stress corrosion cracking behaviour of low alloy steels in aqueous environments at ambient temperatures // Engineering Failure Analysis. 2004. Vol. 11. No. 6. P. 843–856. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2004.03.006>
24. Kobayashi K., Omura T., Ueda M., Nakamura K. Effect of testing temperature on SSC properties of low alloy steel // Corrosion 2006, Houston, TX. NACE, 2006. Paper no. 06127.
25. Ravindranath K., Tanoli N., Al-Wakaa D. Effect of long-term service exposure on the localized corrosion and stress corrosion cracking susceptibility of type 347 stainless steel // Corrosion. 2018. Vol. 74. No. 3. P. 350–361. <https://doi.org/10.5006/2612>
26. Guo X., Gao W., Chen K., Shen Z., Zhang L. Corrosion and stress corrosion cracking susceptibility of type 347H stainless steel in supercritical water // Corrosion. 2018. Vol. 74. No. 1. P. 83–95. <https://doi.org/10.5006/2459>
- tion during the operation of icebreakers and stationary marine ice-resistant drilling rigs. *Voprosy materialovedeniya*. 2012, no. 2(70), pp. 224–226. (In Russ.).
8. *Materials for Shipbuilding and Marine Engineering. Handbook in 2 vols.* Gorynin I.V. ed. Vol. 1. St. Petersburg: Professional, 2009, 776 p. (In Russ.).
9. Newman R.C. *Stress-Corrosion Cracking Mechanisms. Corrosion Mechanisms in Theory and Practice*. Markus P., Oudar J. eds. USA: Marcel Dekker, 1995, pp. 311–368.
10. Ramamurthy S., Atrens A. Stress corrosion cracking of high-strength steels. *Corrosion Reviews*. 2013, vol. 31, no. 1, pp. 1–31. <https://doi.org/10.1515/correv-2012-0018>
11. Brown B. F. *Stress Corrosion Cracking in High Strength steel and in Aluminium and Titanium Alloys*. NRL, 1972.
12. Azhogin F.F. *Corrosion Cracking and Protection of High-Strength Steels*. Moscow: Metallurgiya, 1974, 256 p. (In Russ.).
13. *Corrosion*. Shraier L.L. ed. Butterworths and Co Publishers Ltd., Canada, 1976.
14. Scully J.R., Moran P.J. Influence of strain on the environmental hydrogen-assisted cracking of a high strength steel in sodium chloride solution. *Corrosion*. 1988, vol. 44, no. 3, pp. 176–185. <https://doi.org/10.5006/1.3583922>
15. Bogorad I.Ya., Goman G.M., Klimova V.A. Study of corrosion resistance of shell steels in field conditions. *Tekhnologiya sudostroyeniya*. 1967, no. 6, pp. 19–25. (In Russ.).
16. Prosek T., Iversen A., Taxen C., Thierry D. Low temperature stress corrosion cracking of stainless steels in the atmosphere in presence of chloride deposits. *Corrosion*. 2009, vol. 65, no. 2, pp. 105–117. <https://doi.org/10.5006/1.3319115>
17. Malyshev V.N. Corrosion cracking of Cr18Ni10Ti steel in single normal solution of hydrochloric acid at room temperature initiated by hydrogen-charging. *Voprosy materialovedeniya*. 2010, no. 1, pp. 117–125. (In Russ.).
18. Sergeev N.N., Kutepov S.N., Gvozdev A.E., Ageev E.V. Dislocation induced mechanisms of hydrogen embrittlement of metals and alloys. *Proceedings of the Southwest State University*. 2017, vol. 21, no. 2, pp. 32–47. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2017-21-2-32-47>
19. Oryshchenko A.S., Mushnikova S.Y., Kharkov A.A., Kalinin G.Y. Study of stress corrosion cracking of austenitic steels in sea water. *Proceedings of the European Corrosion Congress EUROCORR 2010, September 13–17, 2010, Moscow, Russia*, p. 334.
20. Wang S., Martin M.L., Sofronis P., Ohnuki S., Hashimoto N., Robertson I.M. Hydrogen-induced intergranular failure of iron. *Acta Materialia*. 2014, no. 69, pp. 275–282. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.01.060>
21. Novak P., Yuan R., Somerday B.P., Sofronis P., Ritchie R.O. A statistical, physical-based, micro-mechanical model of hydrogen-induced intergranular fracture in steel. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2010, vol. 58, no. 2, pp. 206–226. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2009.10.005>
22. Marichev V.A. Modern notions of hydrogen embrittlement in delayed destruction. *Zashchita metallov*. 1980, vol. 16, no. 5, pp. 531–543. (In Russ.).
23. Bulloch J.H. Same effect of yield strength on the stress corrosion cracking behaviour of low alloy steels in aqueous environments at ambient temperatures. *Engineering Failure Analysis*. 2004, vol. 11, no. 6, pp. 843–856. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2004.03.006>
24. Kobayashi K., Omura T., Ueda M., Nakamura K. Effect of testing temperature on SSC properties of low alloy steel. *Corrosion 2006, Houston, TX. NACE*, 2006, paper no. 06127.
25. Ravindranath K., Tanoli N., Al-Wakaa D. Effect of long-term service exposure on the localized corrosion and stress corrosion cracking susceptibility of type 347 stainless steel. *Corrosion*. 2018, vol. 74, no. 3, pp. 350–361. <https://doi.org/10.5006/2612>
26. Guo X., Gao W., Chen K., Shen Z., Zhang L. Corrosion and stress corrosion cracking susceptibility of type 347H stainless steel in supercritical water. *Corrosion*. 2018, vol. 74, no. 1, pp. 83–95. <https://doi.org/10.5006/2459>

27. Ogawa Y., Takakuwa O., Okazaki S., Okita K., Funakoshi Y., Matsunaga H., Matsuoka S. Pronounced transition of crack initiation and propagation modes in the hydrogen-related failure of a Ni-based superalloy 718 under internal and external hydrogen conditions // *Corrosion Science*. 2019. Vol. 161. Article 108186. <http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2019.108186>
28. Ma H.C., Liu Z.Y., Du C.W., Wang H.R., Li X.G., Zhang D.W., Cui Z.Y. Stress corrosion cracking of E690 steel as a welded joint in a simulated marine atmosphere containing sulphur dioxide // *Corrosion Science*. 2015. Vol. 100. P. 627–641. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2015.08.039>
29. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. Москва: Наука, 1974. 640 с.
30. Разрушение. Т. 2: Математические основы теории разрушения / Под ред. Г. Либовица. Москва: Мир, 1975. С. 204–335.
31. Ильин А.В., Филин В.Ю. Применение расчетных оценок прочности с использованием механики разрушения для сварных конструкций глубоководной техники // Деформация и разрушение материалов. 2012. № 2. С. 9–15.
32. Zhu X.-K., Joyce J.A. Review of fracture toughness (G, K, J, CTOD, CTOA) testing and standardization // *Engineering Fracture Mechanics*. 2012. Vol. 85. P. 1–46. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2012.02.001>
33. Паркинс Р.Н., Маца Ф., Ройела Ж.Ж. Методы испытания на коррозию под напряжением // Защита металлов. 1973. Т. 1. № 3. С. 515–540.
34. Костин С.К. Коррозионное растрескивание в морской воде высокопрочных сталей различного структурно-фазового состава: Автореферат диссертации ... кандидата технических наук. Санкт-Петербург, 2018. 24 с.
35. Mushnikova S.Y., Kalinin G.Y., Kharkov A.A. Corrosion resistance problems of low magnetic shipbuilding steels // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2016. No. 7. P. 892–898. <https://doi.org/10.1134/S2075113316060113>
36. Scully J.C. The interaction of stress corrosion cracking of austenitic steels in seawater // *Corrosion Science*. 1980. Vol. 20. P. 997–1016.
37. Serebrinsky S.A., Duffo G.S., Galvele J.R. Effect of strain rate on stress corrosion crack velocity: Difference between intergranular and transgranular cracking // *Corrosion Science*. 1999. Vol. 41. No. 1. P. 191–195. [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(98\)00118-8](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(98)00118-8)
38. Toshinori O., Juichi I. Stress corrosion cracking susceptibility and cracking criteria of 13 Cr martensitic stainless steels in neutral chloride solution at room temperature // *Tetsu-To-Hagane / Journal of the Iron and Steel Institute of Japan*. 1989. Vol. 75. No. 7. P. 1201–1216. https://doi.org/10.2355/tetsutohagane1955.75.7_1201
39. Леонов В.П., Щербинин В.Ф., Паноцкий Д.А., Малинкина Ю.Ю. Определение критической скорости нагружения при испытаниях на коррозионно-механическую прочность титановых сплавов // Сборник докладов Всероссийской конференции по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат-2013». Москва, 28 февраля – 01 марта 2013. Москва: ВИАМ, 2013. С. 20.
40. Харьков А.А., Немчикова Л.Г., Михневич А.П., Билина С.Ю. Оценка склонности сталей к коррозионному растрескиванию при испытании с медленной скоростью деформирования // Технология судостроения. 1990. № 3. С. 10–13.
41. Мушникова С.Ю., Харьков О.А., Костин С.К. Методы оценки коррозионно-механической прочности конструкционных материалов и стенды для их испытаний // Сборник докладов Всероссийской конференции по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат-2013». Москва, 28 февраля – 01 марта 2013. Москва: ВИАМ, 2013. С. 18.
42. Case R., Bezensek B. Fracture toughness assessment of the susceptibility for sulfide stress corrosion cracking in high strength carbon steels: A review // *Corrosion*. 2021. Vol. 77. No. 1. P. 48–59. <https://doi.org/10.5006/3610>
43. Ali M., Pargeter R. Techniques for determining the effect of a sour environment on fracture toughness of steel // *Steely Hydrogen*. 2nd Int. Conf. on Metals and Hydrogen. May 5 – 7, 2014, Gent,
27. Ogawa Y., Takakuwa O., Okazaki S., Okita K., Funakoshi Y., Matsunaga H., Matsuoka S. Pronounced transition of crack initiation and propagation modes in the hydrogen-related failure of a Ni-based superalloy 718 under internal and external hydrogen conditions. *Corrosion Science*. 2019, vol. 161, article 108186. <http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2019.108186>
28. Ma H.C., Liu Z.Y., Du C.W., Wang H.R., Li X.G., Zhang D.W., Cui Z.Y. Stress corrosion cracking of E690 steel as a welded joint in a simulated marine atmosphere containing sulphur dioxide. *Corrosion Science*. 2015, vol. 100, pp. 627–641. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2015.08.039>
29. Cherepanov G.P. *Brittle Fracture Mechanics*. Moscow: Nauka, 1974, 640 p. (In Russ.).
30. *Fracture. Vol. 2: Mathematical Methods in Fracture Mechanics*. Libovits G. ed. Moscow: Mir, 1975, pp. 204–335. (In Russ.).
31. Il'in A.V., Filin V.Yu. Application of design strength estimates using fracture mechanics for welded structures of deep-sea machinery. *Deformatsiya i razrushenie materialov*. 2012, no. 2, pp. 9–15. (In Russ.).
32. Zhu X.-K., Joyce J.A. Review of fracture toughness (G, K, J, CTOD, CTOA) testing and standardization. *Engineering Fracture Mechanics*. 2012, vol. 85, pp. 1–46. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2012.02.001>
33. Parkins R.N., Matsa F., Roela Zh.Zh. Stress corrosion test methods. *Zashchita metallov*. 1973, vol. 1, no. 3, pp. 515–540. (In Russ.).
34. Kostin S.K. *Corrosion cracking in seawater of high-strength steels of different structural-phase composition: Extended Abstract of Cand. Sci. Diss.* St. Petersburg, 2018, 24 p. (In Russ.).
35. Mushnikova S.Y., Kalinin G. Y., Kharkov A.A. Corrosion resistance problems of low magnetic shipbuilding steels. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2016, no. 7, pp. 892–898. <https://doi.org/10.1134/S2075113316060113>
36. Scully J.C. The interaction of stress corrosion cracking of austenitic steels in seawater. *Corrosion Science*. 1980, vol. 20, pp. 997–1016.
37. Serebrinsky S.A., Duffo G.S., Galvele J.R. Effect of strain rate on stress corrosion crack velocity: Difference between intergranular and transgranular cracking. *Corrosion Science*. 1999, vol. 41, no. 1, pp. 191–195. [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(98\)00118-8](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(98)00118-8)
38. Toshinori O., Juichi I. Stress corrosion cracking susceptibility and cracking criteria of 13 Cr martensitic stainless steels in neutral chloride solution at room temperature. *Tetsu-To-Hagane / Journal of the Iron and Steel Institute of Japan*. 1989, vol. 75, no. 7, pp. 1201–1216. https://doi.org/10.2355/tetsutohagane1955.75.7_1201
39. Leonov V.P., Shcherbinin V.F., Panotskii D.A., Malinkina Yu.Yu. Determination of critical loading rate during tests for corrosion-mechanical strength of titanium alloys. In: *II All-Russ. Conf. on Tests and Research of the Materials Properties "TestMat-2013", February 28 – March 1, 2013, Moscow*. Moscow: VIAM, 2013, p. 20. (In Russ.).
40. Khar'kov A.A., Nemchikova L.G., Mikhnevich A.P., Bilina S.Yu. Evaluation of the tendency of steels to corrosion cracking during testing with a slow deformation rate. *Tekhnologiya sudostroeniya*. 1990, no. 3, pp. 10–13. (In Russ.).
41. Mushnikova S.Yu., Khar'kov O.A., Kostin S.K. Methods of evaluation of corrosion-mechanical strength of structural materials and benches for their testing. In: *II All-Russ. Conf. on Tests and Research of the Materials Properties, February 28 – March 1, 2013, Moscow*. Moscow: VIAM, 2013, p. 18. (In Russ.).
42. Case R., Bezensek B. Fracture toughness assessment of the susceptibility for sulfide stress corrosion cracking in high strength carbon steels: A review. *Corrosion*. 2021, vol. 77, no. 1, pp. 48–59. <https://doi.org/10.5006/3610>
43. Ali M., Pargeter R. Techniques for determining the effect of a sour environment on fracture toughness of steel. In: *Steely Hydrogen. 2nd Int. Conf. on Metals and Hydrogen, May 5–7, 2014, Gent, Belgium*.

- Belgium. Available at URL: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/techniques-for-determining-the-effect-of-a-sour-environment-on-fracture-toughness-of-steel>
44. Cravero S., Bravo R., Ernst H. A simplified transient approach for modeling crack growth in DCB specimen testing // *CORROSION* 2010, Houston, TX. NACE International. 2010. Paper no. 10321.
 45. Hadley I., Karger S.A. Effect of crack tip constraint on fracture toughness of A533B steel and validation of the sintap constraint procedure. Ainsworth R. ed. Gloucester, UK: Nuclear Electric Ltd, 1999. Available at URL: http://www.eurofitnet.org/sintap_TWI-012.pdf
 46. Thébault F., Gomes C., Millet J., Oliveira J., Kemtchou S. Sulfide stress cracking fracture toughness of 125 ksi grade in mild sour service conditions // *NACE – International Corrosion Conference Series*. 2017. Vol. 2. P. 1106–1112.
 47. Brown B.F. Stress corrosion cracking: A perspective review of the problem. Naval Research Laboratory. Report 7130. 1970. 27 p.
 48. Альхименко А.А., Харьков А.А., Шемякин Б.А., Шапошников Н.О. Разработка методики ускоренных испытаний трубных сталей нефтяного сортамента на коррозионное растрескивание // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2020. Т. 86. № 9. С. 70–76. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2020-86-9-70-76>
 49. ASTM G 129-21. Standard Practice for Slow Strain Rate Testing to Evaluate the Susceptibility of Metallic Materials to Environmentally Assisted Cracking. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2021. 7 p.
 50. GB 15970.7-2000. Corrosion of Metals and Alloys – Stress Corrosion Testing – Part 7: Slow Strain Rate Testing. National Standard of China. 2000. 50 p.
 51. Mustapha A., Charles E.A., Hardie D. Evaluation of environment-assisted cracking susceptibility of a grade X100 pipeline steel // *Corrosion Science*. 2012. Vol. 54. P. 5–9. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2011.08.030>
 52. Omura T., Kobayashi K., Ueda M. SSC resistance of high strength low alloy steel OCTG in high pressure H₂S environments // *NACE – International Corrosion Conference Series*. 2009. Paper no. 09102.
 53. Jiao Y., Mahmood J., Zheng W., Singh P.M., Kish J.R. Effect of thermal aging on the intergranular stress corrosion cracking susceptibility of type 310S stainless steel // *Corrosion*. 2018. Vol. 74. No. 4. P. 430–443. <https://doi.org/10.5006/2544>
 54. Wu L., Takeda Y., Shoji T., Yamashita M., Izumi S. Effect of reversed austenite on the stress corrosion cracking of modified 17-4PH stainless steel. // *Corrosion*. 2017. Vol. 73. No. 6. P. 704–712. <https://doi.org/10.5006/2232>
 55. ASTM G 52-00. Standard Practice for Exposing and Evaluating Metals and Alloys in Surface Seawater. West Conshohocken, PA: ASTM International. 2020. 4 p.
 56. Карпов В.А., Ковальчук Ю.Л., Полтаруха О.П., Ильин И.Н. Комплексный подход к защите от морского обрастания и коррозии. Москва: Товарищество научных изданий КМК, 2007. 156 с.
 57. Melchers R.F., Jiffrey R. Influence of water velocity on marine immersion corrosion of mild steel // *Corrosion*. 2004. Vol. 60. No. 1. P. 84–94. <https://doi.org/10.5006/1.3299235>
- Available at URL: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/techniques-for-determining-the-effect-of-a-sour-environment-on-fracture-toughness-of-steel>
44. Cravero S., Bravo R., Ernst H. A simplified transient approach for modeling crack growth in DCB specimen testing. In: *CORROSION* 2010, Houston, TX. NACE International, 2010, paper no. 10321.
 45. Hadley I., Karger S.A. *Effect of crack tip constraint on fracture toughness of A533B steel and validation of the sintap constraint procedure*. Ainsworth R. ed. 1999. Available at URL: http://www.eurofitnet.org/sintap_TWI-012.pdf
 46. Thébault F., Gomes C., Millet J., Oliveira J., Kemtchou S. Sulfide stress cracking fracture toughness of 125 ksi grade in mild sour service conditions. *NACE – International Corrosion Conference Series*. 2017, vol. 2, pp. 1106–1112.
 47. Brown B.F. Stress corrosion cracking: A perspective review of the problem. *Naval Research Laboratory*. 1970, report 7130, 27 p.
 48. Al'khimenko A.A., Khar'kov A.A., Shemyakinskii B.A., Shaposhnikov N.O. Development of the methodology of accelerated testing of oil-gas pipe steels for stress corrosion cracking. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*. 2020, vol. 86, no. 9, pp. 70–76. (In Russ.). <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2020-86-9-70-76>
 49. *ASTM G 129-21. Standard Practice for Slow Strain Rate Testing to Evaluate the Susceptibility of Metallic Materials to Environmentally Assisted Cracking*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2021, 7 p.
 50. *GB 15970.7-2000. Corrosion of Metals and Alloys – Stress Corrosion Testing – Part 7: Slow Strain Rate Testing*. National Standard of China, 2000, 50 p.
 51. Mustapha A., Charles E.A., Hardie D. Evaluation of environment-assisted cracking susceptibility of a grade X100 pipeline steel. *Corrosion Science*. 2012, vol. 54, pp. 5–9. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2011.08.030>
 52. Omura T., Kobayashi K., Ueda M. SSC resistance of high strength low alloy steel OCTG in high pressure H₂S environments. *NACE – International Corrosion Conference Series*, 2009, paper no. 09102.
 53. Jiao Y., Mahmood J., Zheng W., Singh P.M., Kish J.R. Effect of thermal aging on the intergranular stress corrosion cracking susceptibility of type 310S stainless steel. *Corrosion*. 2018, vol. 74, no. 4, pp. 430–433. <https://doi.org/10.5006/2544>
 54. Wu L., Takeda Y., Shoji T., Yamashita M., Izumi S. Effect of reversed austenite on the stress corrosion cracking of modified 17-4PH stainless steel. *Corrosion*. 2017, vol. 73, no. 6, pp. 704–712. <https://doi.org/10.5006/2232>
 55. *ASTM G 52-20. Standard Practice for Exposing and Evaluating Metals and Alloys in Surface Seawater*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2020, 4 p.
 56. Karpov V.A., Koval'chuk Yu.L., Poltarukha O.P., Il'in I.N. *Integrated Approach to Protection against Marine Fouling and Corrosion*. Moscow: Tovarichestvo nauchnykh izdaniy KMK, 2007, 156 p.
 57. Melchers R.F., Jiffrey R. Influence of water velocity on marine immersion corrosion of mild steel. *Corrosion*. 2004, vol. 60, no. 1, pp. 84–94. <https://doi.org/10.5006/1.3299235>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Алексей Александрович Альхименко, директор Научно-технологического комплекса «Новые технологии и материалы», Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
ORCID: 0000-0001-6701-1765
E-mail: a.alkhimenko@spbstu.ru

Артем Дмитриевич Давыдов, инженер-исследователь Научно-технологического комплекса «Новые технологии и материалы», Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
ORCID: 0000-0001-6288-5703
E-mail: davydov_ad@spbstu.ru

Aleksei A. Al'khimenko, Director of the Scientific and Technological Complex “New Technologies and Materials”, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
ORCID: 0000-0001-6701-1765
E-mail: a.alkhimenko@spbstu.ru

Artem D. Davydov, Research Engineer of the Scientific and Technological Complex “New Technologies and Materials”, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
ORCID: 0000-0001-6288-5703
E-mail: davydov_ad@spbstu.ru

Александр Аркадьевич Харьков, к.т.н., заместитель директора Научно-исследовательского и образовательного центра «Везерфорд-Политехник», Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
E-mail: a.a.harkov@mail.ru

Светлана Юрьевна Мушникова, к.т.н., начальник сектора, ЦНИИ КМ «Прометей» имени академика И.В. Горынина НИЦ «Курчатовский институт»
E-mail: nnpk3@crism.ru

Олег Александрович Харьков, к.т.н., старший научный сотрудник, ЦНИИ КМ «Прометей» имени академика И.В. Горынина НИЦ «Курчатовский институт»
E-mail: npk3@crism.ru

Ольга Николаевна Парменова, к.т.н., старший научный сотрудник, ЦНИИ КМ «Прометей» имени академика И.В. Горынина НИЦ «Курчатовский институт»
E-mail: npk3@crism.ru

Алексей Андреевич Яковицкий, инженер 1 категории, ЦНИИ КМ «Прометей» имени академика И.В. Горынина НИЦ «Курчатовский институт»
E-mail: npk3@crism.ru

Aleksandr A. Khar'kov, Cand. Sci. (Eng.), Deputy Director of the Research and Educational Center "Weatherford-Polytechnic", Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
E-mail: a.a.harkov@mail.ru

Svetlana Yu. Mushnikova, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Sector, Academician I.V. Gorynin Central Research Institute of Structural Materials "Prometey" National Research Center "Kurchatov Institute"
E-mail: nnpk3@crism.ru

Oleg A. Khar'kov, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Academician I.V. Gorynin Central Research Institute of Structural Materials "Prometey" National Research Center "Kurchatov Institute"
E-mail: npk3@crism.ru

Ol'ga N. Parmenova, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Academician I.V. Gorynin Central Research Institute of Structural Materials "Prometey" National Research Center "Kurchatov Institute"
E-mail: npk3@crism.ru

Aleksei A. Yakovitskii, Engineer of the 1st Category, Academician I.V. Gorynin Central Research Institute of Structural Materials "Prometey" National Research Center "Kurchatov Institute"
E-mail: npk3@crism.ru

ВКЛАД АВТОРОВ

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

А. А. Альхименко – идея работы, формирование основной концепции обзора.

А. Д. Давыдов – написание текста рукописи, подбор иллюстраций, доработка текста, редактирование финальной версии обзора.

А. А. Харьков – научное руководство, написание текста рукописи, подбор информации, поиск и анализ опубликованных источников.

С. Ю. Мушникова – написание текста рукописи, анализ данных.

О. А. Харьков – написание текста рукописи, анализ данных.

О. Н. Парменова – подготовка текста, обзор публикаций по теме статьи, доработка текста.

А. А. Яковицкий – поиск данных для анализа.

A. A. Al'khimenko – formation of the review main concept.

A. D. Davydov – writing and revising the text, selection of illustrations, editing the review final version.

A. A. Khar'kov – scientific leadership, writing, selection of information, search and analysis of published sources.

S. Yu. Mushnikova – writing the text, data analysis.

O. A. Khar'kov – writing the text, data analysis.

O. N. Parmenova – preparation of the text, publications review, revising the text.

A. A. Yakovitskii – search of the data for analysis.

Поступила в редакцию 09.06.2021

После доработки 27.09.2021

Принята к публикации 27.01.2022

Received 09.06.2021

Revised 27.09.2021

Accepted 27.01.2022