



Обзорная статья

УДК 620.193.27:669.018.293

DOI 10.17073/0368-0797-2022-1-48-56



МЕТОДЫ КОРРОЗИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ПРИ РАЗРАБОТКЕ И ПРОМЫШЛЕННОМ ОСВОЕНИИ НОВЫХ СУДОСТРОИТЕЛЬНЫХ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ И ТЕХНОЛОГИЙ ИХ ПРОИЗВОДСТВА.

ЧАСТЬ I. ЛАБОРАТОРНЫЕ КОРРОЗИОННЫЕ 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, д. 29)

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

Аннотация. Судостроительные стали и сплавы при воздействии морской воды могут подвергаться различным видам коррозионных поражений. Для надежной длительной эксплуатации судов и морских сооружений, несмотря на применение средств защиты от коррозии, выбираются материалы, обладающие помимо требуемых механических свойств достаточной коррозионной стойкостью, обеспечивающей заданный срок эксплуатации. Оценка коррозионной стойкости новых материалов для использования в судостроении осуществляется путем проведения обязательных сдаточных испытаний методами, многократно проверенными экспериментально, результаты которых подтверждены на практике. Комплекс исследований сопротивляемости коррозионному разрушению сталей и сплавов основан на поэтапном проведении лабораторных, стендовых и натурных испытаний. В обзоре дано краткое описание методов лабораторных коррозионных испытаний, являющихся составной частью обязательных сдаточных испытаний. Рассмотрены параметры, определяющие агрессивность морской воды как коррозионной среды, включая соленость и содержание кислорода. Представлены методы лабораторных испытаний, включающие электрохимические исследования с определением потенциала и скорости коррозии, потенциала питтингообразования на основе построения поляризационных кривых, а также общепринятый гравиметрический метод определения скорости коррозии. Приведены используемые установки для проведения испытаний в движущейся (с изменяющейся скоростью потока) морской воде.

Ключевые слова: судостроительные материалы, морская вода, методы коррозионных испытаний, электрохимические исследования, питтинговая коррозия, коррозия в потоке морской воды, стендовые испытания, натурные испытания

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

Для цитирования: Альхименко А.А., Давыдов А.Д., Харьков А.А., Мушникова 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. Часть I. Лабораторные коррозионные испытания // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 1. С. 48–56. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-1-48-56>

Review article

METHODS OF CORROSION TESTING USED FOR DEVELOPMENT AND COMMERCIAL EXPLOITATION OF NEW SHIPBUILDING STEELS AND ALLOYS. PART I. LABORATORY CORROSION 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. Shipbuilding steels and alloys may be subjected to various types of corrosion damage when exposed to sea water. For reliable long-term operation of ships and marine structures, despite the use of corrosion protection, materials are chosen that, in addition to the required mechanical properties, have sufficient corrosion resistance to ensure a given service life. Evaluation of corrosion resistance of new materials for use in shipbuilding was made by carrying out mandatory delivery trials using methods that have been repeatedly tested experimentally and whose results have been confirmed in practice. The complex study of corrosion resistance of steels and alloys is based on step-by-step laboratory, bench, and field tests. The review provides a brief description of laboratory corrosion test methods that are part of mandatory delivery trials. Parameters determining the aggressiveness of seawater as a corrosive medium, including salinity, oxygen content are considered. Laboratory test methods include electrochemical studies with determination of potential and rate of corrosion, pitting potential on the basis of polarization curves construction, as well as the generally accepted gravimetric method of corrosion rate determination. Installations for testing in moving (with varying flow rate) seawater are given.

Keywords: shipbuilding materials, seawater, corrosion test methods, electrochemical studies, pitting corrosion, corrosion in seawater, bench tests, field tests

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 07.11.2020).

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. Part I. Laboratory corrosion tests. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 1, pp. 48–56. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-1-48-56>

ВВЕДЕНИЕ

Термин «морская коррозия» включает в себя многочисленные виды коррозии широкого спектра конструкционных металлических материалов, которые используются при строительстве и эксплуатации судов и сооружений различного назначения [1 – 3]. Источником морской коррозии может служить как непосредственно морская вода, представляющая собой водный раствор растворенных солей, так и морская атмосфера над водной поверхностью [4 – 13]. Кроме того, на коррозионные процессы оказывает воздействие жизнедеятельность морских организмов, главным образом в виде обрастания на поверхности судов и сооружений, а также в некоторых случаях возникновения биокоррозии, вызванной жизнедеятельностью микроорганизмов [14 – 17].

Поскольку морская вода является водным раствором солей, то она представляет собой электролит, и все коррозионные процессы протекают по электрохимическому механизму. В то же время морская вода имеет ряд отличительных особенностей. Установлено [18], что максимальная скорость коррозии железа в растворе хлористого натрия наблюдается при его концентрации 3,5 %, что соответствует солёности океанской морской воды, основным компонентом которой является NaCl.

В морской воде растворено до 8 мг/л кислорода, который является основным окислителем при коррозии металлов. Также из воздуха поступает углекислый газ, который при взаимодействии с водой образует анионы HCO_3^- и CO_3^{2-} , которые поддерживают величину pH около 8 [19 – 21], т. е. близкой к нейтральному значению.

Современные морские суда представляют собой сложнейшую техническую систему, для создания которой применяются всевозможные конструкционные материалы. Перечень металлических материалов, непосредственно соприкасающихся с морской водой, включает в себя корпусные стали и алюминиевые сплавы различных марок, отличающиеся по химическому

составу и свойствам, сплавы на медной и медно-никелевой основе и титановые сплавы для систем трубопроводов забортной воды и арматуры. Для изготовления лопастей гребных винтов применяются медные сплавы и коррозионностойкие стали [22 – 29].

Многообразие используемых материалов и условий воздействия на них морской воды позволяет считать, что в процессе эксплуатации будут возникать различные виды коррозионных поражений. Поэтому для определения чувствительности металлических материалов к определенному виду коррозии необходимо применение соответствующих методов и методик проведения коррозионных испытаний. Целью данного обзора является краткое описание методов лабораторных коррозионных испытаний, являющихся составной частью обязательных сдаточных испытаний, которые необходимо проводить при внедрении новых материалов в судостроение.

ЛАБОРАТОРНЫЕ КОРРОЗИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ

Несмотря на постоянное развитие новых методов коррозионных исследований, существует ряд обязательных общепринятых и многократно проверенных методов испытаний, которые необходимо применить для оценки коррозионной стойкости внедряемых новых сталей и сплавов. Научные основы и основные принципы методов коррозионных испытаний за последние 50 лет не претерпели существенных изменений, хотя с развитием измерительной техники появилась возможность получать исследуемые параметры, определяющие коррозионную стойкость, с большей точностью.

При разработке новых судостроительных конструкционных материалов и технологий их производства, прежде, чем осуществлять внедрение в эксплуатацию в составе судовых конструкций и систем или морских сооружений, создаваемые стали и сплавы проходят обязательные коррозионные испытания трех уровней:

- лабораторные – на простейших образцах;
- стендовые – на сварных образцах натуральной толщины применяемого металла и на моделях, имитирующих реальные узлы и элементы конструкций;
- натурные – на крупногабаритных образцах и моделях в природной морской воде в условиях эксплуатации или максимально к ним приближенным.

В статье рассмотрены только применяемые методы лабораторных коррозионных испытаний с кратким изложением теоретических основ электрохимической коррозии металлов в морской воде.

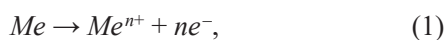
Лабораторные испытания должны занимать немного времени, т. е. быть ускоренными. При этом, не изменяя механизма коррозионных процессов, происходящих в реальной эксплуатации, ускоренные испытания должны дать ответ о сопротивлении исследуемого материала тому или иному виду коррозии по сравнению с уже известным материалом, опробованным при эксплуатации в составе судовых конструкций.

Первым необходимым и чрезвычайно важным этапом лабораторных испытаний являются электрохимические исследования, которые заключаются в измерении потенциала коррозии металлического образца и построении поляризационных кривых [30 – 32].

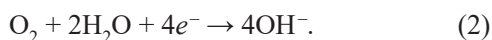
Для измерения потенциала коррозии необходимо иметь высокоомный вольтметр постоянного тока, позволяющий измерять потенциал металлического образца с точностью до 1 мВ относительно электрода сравнения. Для морской воды и раствора NaCl чаще всего применяют стандартный хлорсеребряный электрод сравнения, который имеет собственный электродный потенциал +0,200 В относительно нормального водородного электрода, потенциал которого условно принят за ноль.

Потенциал коррозии является важной коррозионной характеристикой сталей и сплавов, определяющей термодинамическую возможность их взаимодействия с морской водой.

Определение скорости взаимодействия металла с морской водой можно осуществить с помощью поляризационных кривых. Известно [33], что электрохимический процесс коррозии представляет собой две взаимосвязанные реакции, которые осуществляются путем переноса заряженных частиц – ионов и электронов, т. е. связаны с переносом электрического тока. Для морской воды коррозионный процесс можно описать в виде двух сопряженных реакций – анодной и катодной. Анодная реакция растворения металла



катодная реакция восстановления кислорода



Это означает, что, измерив значение тока, можно определить скорость коррозии. Для определения вели-

чины тока, характеризующего скорость коррозии, строят анодную и катодную поляризационные кривые, показывающие как изменяется ток при принудительном смещении потенциала в анодную и катодную сторону от потенциала коррозии, осуществляемого с помощью специального прибора – потенциостата.

В морской воде скорость катодного процесса восстановления кислорода определяется скоростью диффузионного подвода к поверхности корродирующего металла и является более медленной реакцией по сравнению с анодной. Она лимитирует скорость коррозии сталей, не обладающих пассивностью. Такие стали служат основным материалом при строительстве практически всех корпусных конструкций судов. Для определения тока (скорости коррозии) по поляризационным кривым пользуются графическим методом, основанном на определении точки пересечения касательных к линейным участкам кривых, построенных в координатах «плотность тока – потенциал» (рис. 1) [34] или логарифм плотности тока – потенциал [35]. При этом для оценки коррозионной стойкости сталей и сплавов в подкисленных средах наиболее эффективно применение метода Стерна-Гири [36 – 38], разработанного для условий, не связанных с анодным или катодным ограничением процесса коррозии. Графический метод более нагляден и дает возможность определять скорость коррозии материала в конкретных условиях (при заданной температуре и скорости движения морской воды). Метод Стерна-Гири показывает максимально возможные скорости коррозии исследуемого материала. Он удобен для определения скорости коррозии низколегированных корпусных сталей в движущейся с достаточно высокой скоростью морской воде, но не применим для испытаний сталей и сплавов, обладающих пассивностью из-за ограничений процесса анодного растворения.

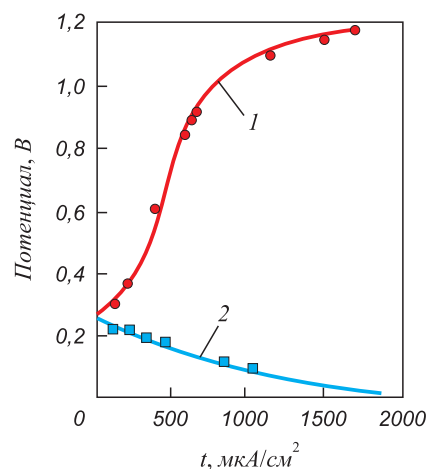


Рис. 1. Катодная (1) и анодная (2) поляризационные кривые стали D40S в морской воде

Fig. 1. Cathode (1) and anode (2) polarization curves of steel D40S in seawater

Кроме того, с помощью поляризационных кривых, используя метод пересечения касательных, можно определить, как изменится скорость коррозии двух металлов, отличающихся по потенциалам коррозии и находящихся в контакте друг с другом, т. е. создающих гальваническую пару [35, 39] (рис. 2).

В такой паре всегда металл с более отрицательным потенциалом коррозии будет растворяться с большей скоростью, а металл с положительным потенциалом – с меньшей. На этом принципе основано применение протекторной защиты [40].

Первые представления о склонности к питтинговой коррозии в морской воде, например, нержавеющей стали, также можно получить, построив анодную поляризационную кривую. Нержавеющие стали на воздухе и в водных средах образуют на поверхности защитную оксидную пленку, которая препятствует анодному процессу растворения металла, переводя стали в пассивное состояние [41 – 45]. Поэтому анодная поляризационная кривая, построенная для морской воды или раствора хлористого натрия, идет параллельно оси плотности тока и начинает расти при достижении определенного приложенного потенциала. Это значение потенциала называется потенциалом питтингообразования (рис. 3) [46].

Чем больше разность между потенциалом питтингообразования и потенциалом коррозии, которая называется областью пассивности, тем более устойчива сталь к питтинговой коррозии в морской воде. Электрохимический метод определения склонности сталей и сплавов к питтинговой коррозии подробно представлен в ГОСТ 9.912 [47].

Электрохимические методы исследований позволяют достаточно быстро оценить коррозионное поведение стали или сплава в морской воде, но полученные величины скорости коррозии показывают завышенные

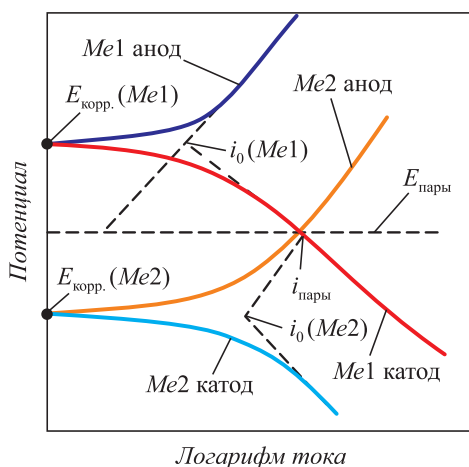


Рис. 2. Применение поляризационных кривых для оценки скорости контактной коррозии

Fig. 2. Application of polarization curves for evaluation of contact corrosion rate

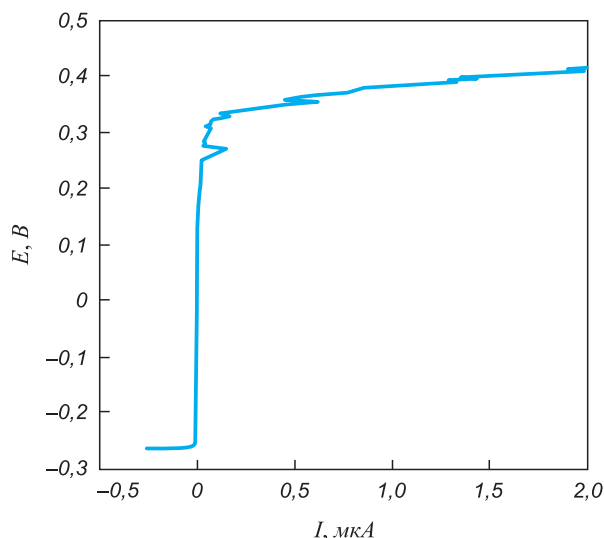


Рис. 3. Определение потенциала питтингообразования нержавеющей стали 316L при построении поляризационной кривой

Fig. 3. Determination of pitting potential of stainless steel 316L in polarization curve construction

значения для заданных условий. На практике в большинстве случаев скорость коррозии снижается со временем, так как на поверхности образуется слой продуктов коррозии, который в какой-то степени защищает металл от воздействия коррозионной среды. Для более точной оценки скорости коррозии проводят лабораторные испытания образцов продолжительностью 720 – 1000 ч. Подготовка образцов, проведение испытаний на общую коррозию в морской воде и обработка результатов осуществляются в полном соответствии с ГОСТ 9.905 и ГОСТ 9.908 [48, 49].

Известно [34 – 51], что скорость коррозии в движущейся морской воде в разы выше, чем в спокойной среде. Данный факт объясняется повышением подачи кислорода к поверхности не пассивирующегося металла, вследствие чего протекание катодной реакции облегчается, и она перестает быть лимитирующей. Кроме того, в потоке морской воды происходит механическое удаление разного рода защитных пленок, образующихся на поверхности металла из продуктов коррозии, также металл может подвергаться кавитационно-эрозионному разрушению [34, 52].

Существуют специальные установки, на которых проводятся исследования в потоке морской воды, отличающиеся способом крепления образцов [53]. Установка для коррозионных испытаний с круговым пробегом образцов размером 50×30×(3 – 5) мм представляет собой ванну, которая заполняется 3,5 %-ным раствором хлористого натрия, а также диска, по окружности которого закрепляются образцы, и осевого вала, соединенного с электродвигателем. Максимальная скорость вращения образцов зависит от диаметра диска и числа оборотов вращения вала и может меняться от 10 до 14 м/с. Продолжительность испытаний 1000 ч. На та-

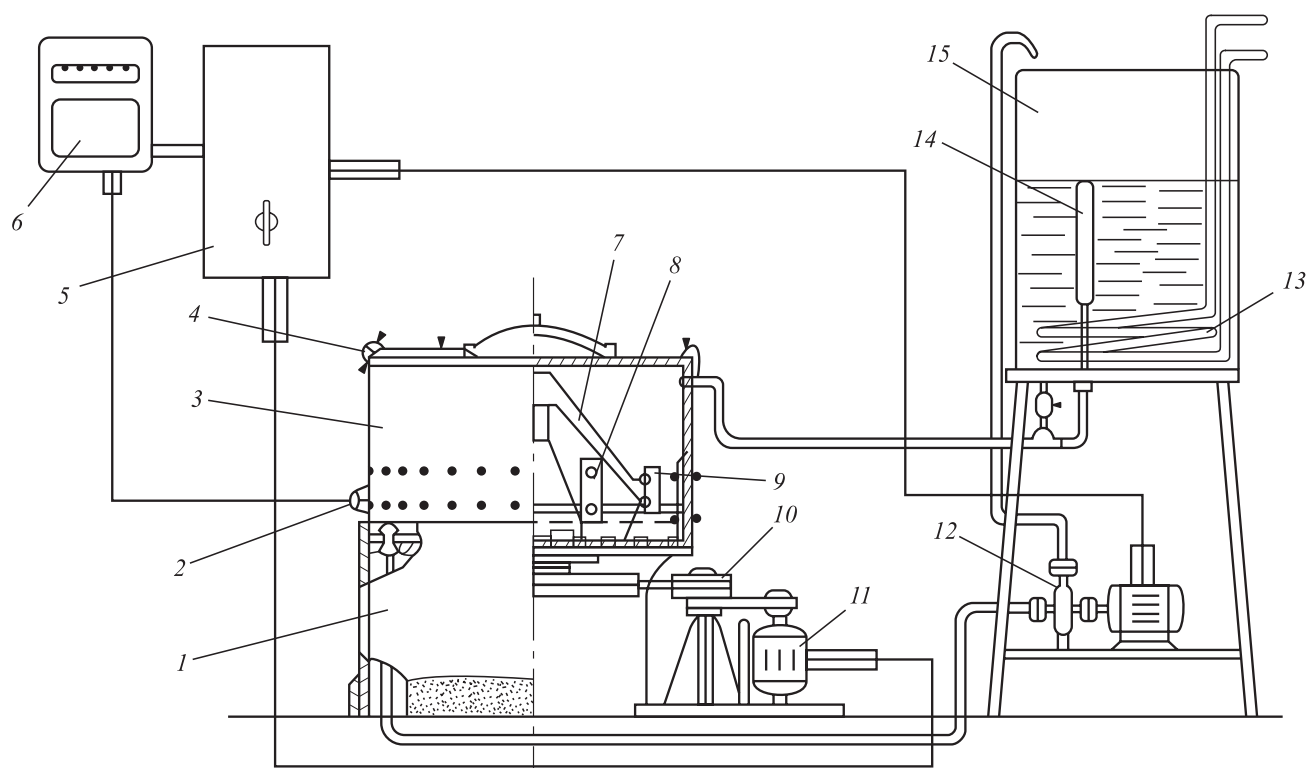


Рис. 4. Принципиальная схема установки для коррозионных испытаний образцов в быстродвижущейся среде:

1 – основание установки; 2 – термометр сопротивления; 3 – ванна; 4 – накидной болт; 5 – щит управления; 6 – самопишущий и регулирующий прибор; 7 – крылатка; 8 – испытуемый образец; 9 – морская вода; 10 – привод; 11 – электродвигатель; 12 – насос; 13 – змеевик; 14 – приспособление для установки уровня воды; 15 – бак для коррозионного раствора

Fig. 4. Scheme of the installation for corrosion tests of the samples in a fast-moving environment:

1 – base; 2 – resistant temperature detector; 3 – bath; 4 – swivel bolt; 5 – control panel; 6 – self-recording and regulating device; 7 – impeller; 8 – test sample; 9 – seawater; 10 – drive; 11 – electric motor; 12 – pump; 13 – coil; 14 – device for water level setting; 15 – tank for corrosion solution

кой установке испытывают образцы сталей и сплавов, предназначенных для изготовления конструкций, которые при эксплуатации имеют вращательное движение (гребные винты, валы).

Если стали и сплавы в реальных условиях подвергаются поступательным движениям (обшивка корпуса судна), то испытания образцов проводят на специальном стенде (рис. 4) [54].

Стенд состоит из ванны диаметром 1100 мм, на внутреннюю стенку которой устанавливаются образцы. Движение среды осуществляется с помощью трехлопастной крылатки, установленной по центру ванны, вращение которой производится электродвигателем. Подбором диаметра шкивов можно менять скорость движения среды вдоль поверхности образца от 5 до 20 м/с. Для ускорения коррозионных процессов испытания проводят при температуре 30 – 35 °С. На стенде испытывают монолитные или сварные образцы размером 200×80×(3 – 15) мм.

Выводы

Таким образом, лабораторные испытания, входящие в состав программы сдаточных испытаний новых материалов, внедряемых в судостроение, состоят из электрохимических исследований и коррозионных испытаний.

По потенциалу коррозии и скорости коррозии, рассчитанной по поляризационным кривым, получают представление о возможности использования выбранного материала в морской воде, в том числе в контакте с другим материалом, и о необходимости проведения дальнейших длительных испытаний.

Скорость коррозии, полученная гравиметрическим методом (по потере массы), дает конкретное представление о коррозионной стойкости материала в морской воде и позволяет принимать решение, например, о выборе толщины обшивки корпуса судна с учетом запаса на коррозионные потери и о применении средств защиты от коррозии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Материалы для судостроения и морской техники. Справочник в 2-х томах / Под редакцией И.В. Горынина. Санкт-Петербург: НПО «Профессионал», 2009. Т. 1. 776 с.

1. *Materials for Shipbuilding and Marine Engineering. Handbook in 2 vols.* Gorynin I.V. ed. Vol. 1. St. Petersburg: Professional, 2009, 776 p. (In Russ.).

2. Farrell R., Barras C., Goodwin R.A. Modern chemical tankers // *SNAME Transactions*. 1994. Vol. 102. P. 325–365.
3. Davis J.R. Corrosion of Weldments. ASM International, 2006. 230 p.
4. Шумахер М.М. Морская коррозия. М.: Металлургия, 1983. 512 с.
5. Альхименко А.А., Колышев И.Е., Харьков А.А., Шапошников Н.О., Цветков А.С. Коррозионная стойкость стальных свайных опор в морской воде // *Коррозия: материалы, защита*. 2020. № 2. С. 16–20.
6. Ковалев М., Альхименко А., Шапошников Н., Алексеева Е. Переход от натурных коррозионных испытаний цинковых покрытий к ускоренным через расчет коэффициента ускорения // *Современные материалы и передовые производственные технологии (СМПТТ-2019)*. 2019. С. 108–109.
7. Маркович Р.А., Кан М.К., Михайлов С.В. Коррозия и методы защиты зоны переменного смачивания металлоконструкций гидротехнических сооружений эстакадного типа // *Гидротехника*. 2014. № 4. С. 73–80.
8. Corrosion: Understanding the Basics / Ed. J.R. Davis. ASM International, 2000. 563 p.
9. Marcus P. Corrosion Mechanisms in Theory and Practice. CRC Press, 2011. 941 p.
10. Oldfield J.W., Todd B. Room temperature stress corrosion cracking of stainless steels in indoor swimming pool atmospheres // *British Corrosion Journal*. 1991. Vol. 26. No. 3. P. 173–182. <https://doi.org/10.1179/000705991798269233>
11. Sjong A., Eiselstein L. Marine atmospheric SCC of unsensitized stainless steel rock climbing protection // *Journal of Failure Analysis and Prevention*. 2008. Vol. 8. P. 410–418. <https://doi.org/10.1007/s11668-008-9158-1>
12. Wallen B. Corrosion of duplex stainless steels in seawater // *ACOM. Avesta Sheffield AB*. 1998. No. 1. P. 1–11.
13. Compere C., Le Bozec N. Behaviour of stainless steel in natural seawater // *The First Stainless Steel Congress in Thailand, Bangkok*. December 1997.
14. 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.
15. Зевина Г.Б. Биология морского обрастания. Москва: Издательство МГУ, 1994. 135 с.
16. Харченко У.В. Физико-химические аспекты микробиологического воздействия морской воды на коррозионную устойчивость некоторых сплавов: Дис. ... канд. хим. наук. Владивосток. Институт химии ДВО РАН. 2006. 130 с.
17. Corrosion. ASM Handbook. Vol. 13. ASM International, 1992. 3455 p.
18. Uhlig H.H., Revie R.W. Corrosion and Corrosion Control. 3rd Edition. Wiley, 1985, 441p.
19. Riley J.P., Skirrow G. Chemical Oceanography. Vol. 2. 2nd Edition. Academic Press. 1975.
20. Kaesche H. Corrosion of Metals. Physicochemical Principles and Current Problems. Springer, 2003. 604 p.
21. Refait P., Grolleau A.-M., Jeannin M., Rémaizeilles C., Sabot R. Corrosion of carbon steel in marine environments: Role of the corrosion product Layer // *Corrosion and Materials Degradation*. 2020. Vol. 1. No. 1. P. 198–218. <https://doi.org/10.3390/cmd1010010>
22. 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.
23. Горынин И.В., Малышевский В.А., Рыбин В.В., Хлусова Е.И. Создание и внедрение новых конкурентоспособных хладостойких сталей для морских арктических конструкций и судов ледового плавания // *Морские интеллектуальные технологии*. 2009. № 1. С. 23–27.
2. Farrell R., Barras C., Goodwin R.A. Modern chemical tankers. *SNAME Transactions*. 1994, vol. 102, pp. 325–365.
3. Davis J.R. *Corrosion of Weldments*. ASM International, 2006, 230 p.
4. Shumakher M.M. *Marine Corrosion*. Moscow: Metallurgiya, 1983, 512 p. (In Russ.).
5. Al'khimenko A.A., Kolyushev I.E., Khar'kov A.A., Shaposhnikov N.O., Tsvetkov A.S. Corrosion resistance of steel pile supports in seawater. *Korroziya: materialy, zashchita*. 2020, no. 2, pp. 16–20. (In Russ.).
6. Kovalev M., Al'khimenko A., Shaposhnikov N., Alekseeva E. Transition from natural corrosion testing of zinc coatings to accelerated ones through calculation of acceleration factor. In: *Modern Materials and Advanced Manufacturing Technology (MMAMT-2019)*. 2019, pp. 108–109. (In Russ.).
7. Markovich R.A., Kan M.K., Mikhailov S.V. Corrosion and methods of protection of wetting area of steel metal structures of hydraulic rack buildings. *Gidrotehnika*. 2014, no. 4, pp. 73–80. (In Russ.).
8. *Corrosion: Understanding the Basics*. Davis J.R. ed. ASM International, 2000, 563 p.
9. Marcus P. *Corrosion Mechanisms in Theory and Practice*. CRC Press, 2011, 941 p.
10. Oldfield J.W., Todd B. Room temperature stress corrosion cracking of stainless steels in indoor swimming pool atmospheres. *British Corrosion Journal*. 1991, vol. 26, no. 3, pp. 173–182. <https://doi.org/10.1179/000705991798269233>
11. Sjong A., Eiselstein L. Marine atmospheric SCC of unsensitized stainless steel rock climbing protection. *Journal of Failure Analysis and Prevention*. 2008, vol. 8, pp. 410–418. <https://doi.org/10.1007/s11668-008-9158-1>
12. Wallen B. Corrosion of duplex stainless steels in seawater. *ACOM. Avesta Sheffield AB*. 1998, no. 1, pp. 1–11.
13. Compere C., Le Bozec N. Behaviour of stainless steel in natural seawater. In: *The First Stainless Steel Congress in Thailand, Bangkok*. December 1997.
14. Karpov V.A., Koval'chuk Yu.L., Poltarukha O.P., Il'in I.N. *Comprehensive Approach to Protection against Marine Fouling and Corrosion*. Moscow: KMK Publ., 2007, 156 p. (In Russ.).
15. Zevina G.B. *Marine Fouling Biology*. Moscow: Izd-vo MSU, 1994, 135 p. (In Russ.).
16. Kharchenko U.V. *Physicochemical aspects of the microbiological effect of sea water on corrosion resistance of some alloys: Cand. Chem. Sci. Diss.* Vladivostok: Institute of Chemistry, Far Eastern Branch, RAS, 2006, 130 p. (In Russ.).
17. *Corrosion. ASM Handbook*. Vol. 13. ASM International, 1992, 3455 p.
18. Uhlig H.H., Revie R.W. *Corrosion and Corrosion Control*. 3rd Ed. Wiley, 1985, 441 p.
19. Riley J.P., Skirrow G. *Chemical Oceanography*. Vol. 2. 2nd Ed. Academic Press, 1975.
20. Kaesche H. *Corrosion of Metals. Physicochemical Principles and Current Problems*. Springer, 2003, 604 p.
21. Refait P., Grolleau A.-M., Jeannin M., Rémaizeilles C., Sabot R. Corrosion of carbon steel in marine environments: Role of the corrosion product layer. *Corrosion and Materials Degradation*. 2020, vol. 1, no. 1, pp. 198–218. <https://doi.org/10.3390/cmd1010010>
22. Malyshevskii V.A., Semicheva T.G., Vladimirov N.F., Khlusova E.I. Cold-resistant steels for shipbuilding and marine equipment. *Nauchno-tehnicheskii sbornik Rossiiskogo morskogo registra sudokhodstva*. 2004, no. 27, pp. 134–149. (In Russ.).
23. Gorynin I.V., Malyshevskii V.A., Rybin V.V., Khlusova E.I. Creation and implementation of new competitive cold-resistant steels for marine Arctic structures and ice navigation vessels. *Morskie intellektual'nye tekhnologii*. 2009, no. 1, pp. 23–27. (In Russ.).

24. Горынин И.В., Ушков С.С., Хатунцев А.Н., Лошакова Н.Н. Титановые сплавы для морской техники. Санкт-Петербург: Издательство Политехнического университета, 2007. 387 с.
25. Белецкий В.М., Кривов Г.А. Алюминиевые сплавы (состав, свойства, технология, применение): Справочник. Киев: Коминтех, 2005. 365 с.
26. Вайнерман А.Е. Сплавы на медной основе для судового машиностроения и их сварка // Материалы для судостроения и морской техники: Справочник / Под редакцией И.В. Горынина. Санкт-Петербург: НПО «Профессионал», 2009. С. 224–295.
27. Steinsmo U., Rogne T., Drugli J.M. Aspects of testing and selecting stainless steels for seawater applications // *Corrosion*. 1997. Vol. 53. No. 12. P. 955–964. <https://doi.org/10.5006/1.3290280>
28. Lu Y.C., Clayton C.R., Brooks A.R. A bipolar model of the passivity of stainless steels – II. The influence of aqueous molybdate // *Corrosion Science*. 1989. Vol. 29. No. 7. P. 863–880. [https://doi.org/10.1016/0010-938X\(89\)90058-9](https://doi.org/10.1016/0010-938X(89)90058-9)
29. Mudali U.K., Shankar P., Ningshen S., Dayal R.K., Khatak H.S., Raj B. On the pitting corrosion resistance of nitrogen alloyed cold worked austenitic stainless steels // *Corrosion Science*. 2002. Vol. 44. No. 10. P. 2183–2198. [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(02\)00035-5](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(02)00035-5)
30. Цупак Т.Е. Лабораторный практикум по коррозии и защите металлов. 2-е издание. Москва: ИЦ РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2003. 172 с.
31. ASTM G5-2013 Standard Reference Test Method for Marking Potentiostatic and Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2021, 9 p.
32. Corrosion Test and Standards: Application and Interpretation / Baboian R. ed. USA: ASTM-1995, 730 p.
33. Томашов Н.Д. Теория коррозии и защиты металлов. Москва: Издательство АН СССР, 1959. 527 с.
34. Богорад И.Я., Искра Е.В., Климова В.А., Кузьмин Ю.Л. Коррозия и защита морских судов. Ленинград: Судостроение, 1973. 392 с.
35. Розенфельд И.Л. Коррозия и защита металлов. Москва: Металлургия, 1969. 448 с.
36. Stern M., Geary A.L. Electrochemical polarization: I. A theoretical analysis of the shape of polarization curves // *Journal of The Electrochemical Society*. 1957. Vol. 104. No. 1. P. 56–63. <https://doi.org/10.1149/1.2428496>
37. Stern M. A method for determining corrosion rate from linear polarization dates // *Corrosion*. 1958. Vol. 14. No. 9. P. 440–444. <https://doi.org/10.5006/0010-9312-14.9.60>
38. ASTM G59-2020 Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020, 4 p.
39. Скорчеллетти В.В. Теоретическая электрохимия. Ленинград: Госхимиздат, 1963. 609 с.
40. Кузьмин Ю.Л., Орыщенко А.С. Коррозия и электрохимическая защита морских судов. Санкт-Петербург: АНО ЛА «Профессионал», 2017. 288 с.
41. Szklarska-Smialowska Z. Pitting corrosion of aluminum // *Corrosion Science*. 1999. Vol. 41. No. 9. P. 1743–1767. [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(99\)00012-8](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(99)00012-8)
42. Soltis J. Passivity breakdown, pit initiation and propagation of pits in metallic materials // *Corrosion Science*. 2015. Vol. 9. P. 5–22. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2014.10.006>
43. Hamada E., Yamada K., Nagoshi M., Makiishi N., Sato K., Ishii T., Fukuda K., Ishikawa S., Ujiro T. Direct imaging of native passive film on stainless steel by aberration corrected STEM // *Corrosion Science*. 2010. Vol. 52. No. 12. P. 3851–3854. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.08.025>
44. Massoud T., Maurice V., Klein L.H., Marcus P. Nanoscale morphology and atomic structure of passive films on stainless steel // *Journal of The Electrochemical Society*. 2013. Vol. 160. No. 6. P. 232–238. <https://doi.org/10.1149/2.067306jes>
45. Malik A.U., Andijani I., Mobin M., Al-Fozan S., Al-Muaili F., Al-Hajiri M. An overview of the localized corrosion problems in sea-
24. Gorynin I.V., Ushkov S.S., Khatuntsev A.N., Loshakova N.N. *Titanium Alloys for Marine Machinery*. St. Petersburg: Izd. Politekh-nicheskogo universiteta, 2007, 387 p. (In Russ.)
25. Beletskii V.M., Krivov G.A. *Aluminium Alloys (Composition, Properties, Technology, Application): Reference book*. Kiev: Komin-tekh, 2005, 365 p. (In Russ.)
26. Vainerman A.E. *Copper-Based Alloys for Ship Machinery and Their Welding. Materials for Shipbuilding and Marine Engineering. Handbook*. Gorynin I.V. ed. St. Petersburg: Professional, 2009, pp. 224–295. (In Russ.)
27. Steinsmo U., Rogne T., Drugli J.M. Aspects of testing and selecting stainless steels for seawater applications. *Corrosion*. 1997, vol. 53, no. 12, pp. 955–964. <https://doi.org/10.5006/1.3290280>
28. Lu Y.C., Clayton C.R., Brooks A.R. A bipolar model of the passivity of stainless steels – II. The influence of aqueous molybdate. *Corrosion Science*. 1989, vol. 29, no. 7, pp. 863–880. [https://doi.org/10.1016/0010-938X\(89\)90058-9](https://doi.org/10.1016/0010-938X(89)90058-9)
29. Mudali U.K., Shankar P., Ningshen S., Dayal R.K., Khatak H.S., Raj B. On the pitting corrosion resistance of nitrogen alloyed cold worked austenitic stainless steels. *Corrosion Science*. 2002, vol. 44, no. 10, pp. 2183–2198. [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(02\)00035-5](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(02)00035-5)
30. Tsupak T.E. *Laboratory Manual on Corrosion and Metal Protection*. 2nd Edition. Moscow: D. Mendeleev University, 2003, 172 p. (In Russ.)
31. *ASTM G5-2021 Standard Reference Test Method for Marking Potentiostatic and Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2021, 9 p.
32. *Corrosion Test and Standards: Application and Interpretation*. Baboian R. ed. USA: ASTM, 1995, 730 p.
33. Tomashov N.D. *Theory of Corrosion and Protection of Metals*. Izd. AN SSSR, 1959, 527 p. (In Russ.)
34. Bogorad I.Ya., Iskra E.V., Klimova V.A., Kuz'min Yu.L. *Corrosion and Protection of Marine Vessels*. Leningrad: Sudostroenie, 1973, 392 p. (In Russ.)
35. Rozenfel'd I.L. *Corrosion and Protection of Metals*. Moscow: Metallurgiya, 1969, 448 p. (In Russ.)
36. Stern M., Geary A.L. Electrochemical polarization: I. A theoretical analysis of the shape of polarization curves. *Journal of The Electrochemical Society*. 1957, vol. 104, no. 1, pp. 56–63. <https://doi.org/10.1149/1.2428496>
37. Stern M. A method for determining corrosion rate from linear polarization dates. *Corrosion*. 1958, vol. 14, no. 9, pp. 440–444. <https://doi.org/10.5006/0010-9312-14.9.60>
38. *ASTM G59-2014 Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020, 4 p.
39. Skorchelletti V.V. *Theoretical Electrochemistry*. Leningrad: Goskhimizdat, 1963, 609 p. (In Russ.)
40. Kuz'min Yu.L., Oryshchenko A.S. *Corrosion and Electrochemical Protection of Marine Vessels*. SPb.: LA Professional, 2017, 288 p. (In Russ.)
41. Szklarska-Smialowska Z. Pitting corrosion of aluminum. *Corrosion Science*. 1999, vol. 41, no. 9, pp. 1743–1767. [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(99\)00012-8](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(99)00012-8)
42. Soltis J. Passivity breakdown, pit initiation and propagation of pits in metallic materials. *Corrosion Science*. 2015, vol. 9, pp. 5–22. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2014.10.006>
43. Hamada E., Yamada K., Nagoshi M., Makiishi N., Sato K., Ishii T., Fukuda K., Ishikawa S., Ujiro T. Direct imaging of native passive film on stainless steel by aberration corrected STEM. *Corrosion Science*. 2010, vol. 52, no. 12, pp. 3851–3854. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.08.025>
44. Massoud T., Maurice V., Klein L.H., Marcus P. Nanoscale morphology and atomic structure of passive films on stainless steel. *Journal of The Electrochemical Society*. 2013, vol. 160, no. 6, pp. 232–238. <https://doi.org/10.1149/2.067306jes>
45. Malik A.U., Andijani I., Mobin M., Al-Fozan S., Al-Muaili F., Al-Hajiri M. An overview of the localized corrosion problems in sea-

- water desalination plants – Some recent case studies // *Desalination and Water Treatment*. 2010. Vol. 20. No. 1–3. P. 22–34.
<https://doi.org/10.5004/dwt.2010.1479>
46. Томашов Н.Д., Чернова Г.П. Теория коррозии и коррозионно-стойкие конструкционные сплавы. Москва: Metallurgiya, 1986. 359 с.
 47. ГОСТ 9.912 – 89. Единая система защиты от коррозии и старения. Стали и сплавы коррозионно-стойкие. Методы ускоренных испытаний на стойкость к питтинговой коррозии. Москва: Издательство стандартов, 1990. 19 с.
 48. ГОСТ Р 9.905 – 2007. Единая система защиты от коррозии и старения. Методы коррозионных испытаний. Общие требования. Москва: Стандартинформ, 2007. 20 с.
 49. ГОСТ 9.908 – 85. Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы и сплавы. Методы определения показателей коррозии и коррозионной стойкости. Москва: Издательство стандартов, 1985. 17 с.
 50. Коррозия и защита судов: Справочник / Под редакцией Е.Я. Люблинского, В.Д. Пирогова. Ленинград: Судостроение, 1987.
 51. Melchers R.F., Jeffrey 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>
 52. Коррозия. Справочное издание / Под ред. Л.Л. Шрайера / Пер. с англ. Москва: Metallurgiya, 1981. 632 с.
 53. Маркович Р.А., Супрун Л.А. О коррозионной стойкости и кинетике разрушения углеродистой стали в движущейся морской воде // *Защита металлов*. 1970. Т. VI. № 5. С. 19–25.
 54. Климова В.А. Методика лабораторных коррозионных испытаний сварных соединений // *Технология судостроения*. 1959. № 6. С. 71–78.
 - water desalination plants – Some recent case studies. *Desalination and Water Treatment*. 2010, vol. 20, no. 1–3, pp. 22–34.
<https://doi.org/10.5004/dwt.2010.1479>
 46. Tomashov N.D., Chernova G.P. *Corrosion Theory and Corrosion-Resistant Structural Alloys*. Moscow: Metallurgiya, 1986, 359 p. (In Russ.).
 47. GOST 9.912 – 89. *Uniform system of protection from corrosion and aging. Corrosion-resistant steels and alloys. Methods of accelerated tests for resistance to pitting corrosion*. Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1990, 19 p. (In Russ.).
 48. GOST R 9.905 – 2007. *Uniform system of protection from corrosion and aging. Corrosion test methods. General requirements*. Moscow: Standartinform, 2007, 20 p. (In Russ.).
 49. GOST 9.908 – 85. *Uniform system of protection from corrosion and aging. Metals and alloys. Methods for determination of corrosion performance and corrosion resistance*. Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1985, 17 p. (In Russ.).
 50. *Corrosion and Protection of Ships: Handbook*. Lyublinskii E.Ya., Pirogov V.D. eds. Leningrad: Sudostroenie, 1987. (In Russ.).
 51. Melchers R.F., Jeffrey 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>
 52. *Corrosion*. Shraier L.L. ed. Butterworths and Co Publishers Ltd., Canada, 1976.
 53. Markovich R.A., Suprun L.A. On corrosion resistance and destruction kinetics of carbon steel in moving seawater. *Zashchita metallov*. 1970, vol. VI, no. 5, pp. 19–25. (In Russ.).
 54. Klimova V.A. Procedure for laboratory corrosion tests of welded joints. *Tekhnologiya sudostroeniya*. 1959, no. 6, pp. 71–78. (In Russ.).

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

Арте́м Дми́триевич Давы́дов, 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

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

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, data analysis.

O. A. Khar'kov – writing, 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 25.11.2021

Received 09.06.2021

Revised 27.09.2021

Accepted 25.11.2021