



ISSN 2712-8008
Том / Volume 23 №3 2023
Домашняя страница журнала: <http://vestnik.psturu.ru/>

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

УДК 622+544-971.2
Статья / Article
© ПНИПУ / PNRPU, 2023

Влияние параметров структуры материала на коррозионную стойкость нефтегазопромыслового оборудования

Р.А. Апакашев, М.Л. Хазин

Уральский государственный горный университет (Россия, 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30)

Material Structure Parameters Influence on Oil and Gas Field Equipment Corrosion Resistance

Raphael A. Apakashev, Mark. L. Khazin

Ural State Mining University (30 Kuybysheva st., Ekaterinburg, 620144, Russian Federation)

Получена / Received: 06.03.2023. Принята / Accepted: 28.08.2023. Опубликовано / Published: 25.03.2024

Ключевые слова:

алюминий, бронза, медь, композиционные материалы, коррозия, наноматериалы, нефтегазопромысловое оборудование, сталь.

Для повышения надежности и долговечности работы нефтегазопромыслового оборудования является перспективным применение микро- и наноструктурированных металлов и сплавов, а также металломатричных композитов. Исследовали обычные и наноструктурированные образцы алюминия, меди, бронзы БрА9ЖЗЛ, сплава АМг6 и алюмоматричный дисперсно армированный композит, содержащий 6,3 % (мас.) титана. Структурирующую обработку металлических материалов проводили в жидкофазном состоянии. Алюмоматричный композит синтезировали методом порошковой металлургии. В качестве коррозионной среды использовали модельный раствор электролита без принудительной циркуляции, содержащий 30 г/л NaCl и добавку уксусной кислоты до pH = 4,0. База испытаний составила 144 ч, температура +22 °С, объем раствора в ячейке с тремя образцами – 500 мл. Относительная расчетная погрешность испытаний составила 5 %. Для всех изученных образцов наблюдается сплошное равномерное распределение коррозионного поражения металлической поверхности. При этом скорость коррозии (П, мм/год) наноструктурированных образцов металлов и сплавов примерно на 11 % меньше, чем скорость коррозии образцов тех же металлов и сплавов, не подвергавшихся структурирующей обработке. Для алюмоматричного композита отмечено, что дисперсное армирование алюминия титаном обеспечивает повышение коррозионной стойкости матричного металла на 9,6 %. Результаты проведенных исследований свидетельствуют о повышенной коррозионной стойкости наноструктурированных металлических материалов и алюмоматричного композита, что важно при их применении в составе оборудования, эксплуатируемого в коррозионно-активной среде.

Keywords:

aluminum, bronze, composite materials, copper, corrosion, nanomaterials, oil and gas equipment, steel.

To improve the reliability and durability of oil and gas equipment, it is promising to use micro- and nanostructured metals and alloys, as well as metal-matrix composites. Conventional and nanostructured samples of aluminum, copper, BrA9ZhZL bronze, AMg6 alloy, and alumina-matrix dispersion-reinforced composite containing 6.3 wt % titanium were studied. Structuring treatment of metal materials was carried out in the liquid phase. The aluminum matrix composite was synthesized by powder metallurgy. A model electrolyte solution without forced circulation containing 30 g/L NaCl and an addition of acetic acid to pH = 4.0 was used as a corrosive medium. The test base was 144 h, the temperature was +22 °C, the volume of the solution in the cell with three samples was 500 ml. The relative calculated error of the tests was 5%. For all the studied samples, a continuous uniform distribution of corrosion damage to the metal surface is observed. At the same time, the corrosion rate (P, mm/year) of nanostructured samples of metals and alloys is approximately 11 % less than the corrosion rate of samples of the same metals and alloys that were not subjected to structuring treatment. For the aluminum matrix composite, it was noted that the dispersed reinforcement of aluminum with titanium provides an increase in the corrosion resistance of the matrix metal by 9.6 %. The results of the studies performed indicate an increased corrosion resistance of nanostructured metallic materials and an aluminum matrix composite, which is important when they are used as part of equipment operating in a corrosive environment.

© Апакашев Рафаил Абдрахманович (ORCID: 0000-0002-9006-3667) – доктор химических наук, профессор, проректор по научной работе (тел.: +007 (343) 257 45 25; e-mail: parknedra@yandex.com).

© Хазин Марк Леонтьевич (ORCID: 0000-0002-6081-4474) – доктор технических наук, профессор (тел.: +007 (343) 283 09 57; e-mail: Khasin@ursmu.ru). Контактное лицо для переписки.

© Raphael A. Apakashev (Author ID in Scopus: 6603092433, ORCID: 0000-0002-9006-3667) – Doctor of Chemical Sciences, Professor, Vice-Rector for Scientific Work (tel.: +007 (343) 257 45 25; e-mail: parknedra@yandex.com).

© Mark L. Khazin (Author ID in Scopus: 6506526940, ORCID: 0000-0002-6081-4474) – Doctor of Engineering, Professor (tel.: +007 (343) 283 09 57; e-mail: Khasin@ursmu.ru). The contact person for correspondence.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Апакашев Р.А., Хазин М.Л. Влияние параметров структуры материала на коррозионную стойкость нефтегазопромыслового оборудования // Недропользование. – 2023. – Т.23, №3. – С.133–140. DOI: 10.15593/2712-8008/2023.3.4

Please cite this article in English as:

Apakashev R.A., Khazin M.L. Material Structure Parameters Influence on Oil and Gas Field Equipment Corrosion Resistance. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2023, vol.23, no.3, pp.133-140. DOI: 10.15593/2712-8008/2023.3.4

Введение

Нефтегазовый сектор играет значительную роль в экономике России и составляет 15–25 % ВВП (в 2022 г. 20 %) (рис. 1). В других странах доля нефтегазового сектора в ВВП составляет, например, в Саудовской Аравии – 50 %, ОАЭ – 30 %, Норвегии – 14 %, Казахстане – 13,3 %, Канаде – менее 10 %, США – 8 % (РБК: <https://www.rbc.ru/economics/13/07/21/60ec40d39a7947f74aeb2aae>).

Металлическое оборудование и конструкции в нефтяной и газовой промышленности контактируют с сырой нефтью, природным газом, нефтепродуктами, растворителями, водой, почвой и атмосферой. Нефть и нефтепродукты современных месторождений содержат значительное количество агрессивных составляющих (хлориды, сероводород, углекислый газ, бактерии и др.), что осложняет эксплуатацию нефтедобывающего и транспортирующего оборудования [1–4].

Коррозия оборудования при добыче нефти и газа неизбежна и вызывается водой, двуокисью углерода (CO₂), сероводородом (H₂S) и может усугубляться в скважинах, где высокие температуры в сочетании с H₂S создают другие проблемы, связанные с коррозией и образованием отложений сульфида железа (FeS) [4, 5]. Поэтому коррозия нефтехимического оборудования является одной из причин, влияющих на безопасность процессов и устойчивость нефтехимической промышленности [3, 6–8].

Кислоты и газы, оксиды серы, органические пары разъедают материал и вызывают повреждения. Удаление различных газов из потока может осуществляться абсорбцией, электростатическими сепараторами и адсорбцией [9–11]. Сточные воды этих производств содержат различные химические вещества, поэтому эта вода также нуждается в очистке для защиты окружающей среды. Органические и неорганические примеси (фенол, уксусная кислота и органические вещества) могут быть удалены различными химическими и биологическими методами [2, 5, 10]. Удаление примесей помогает уменьшить коррозию, а некоторые из этих химикатов могут быть повторно использованы после отделения их от воды [5, 7, 8]. Сочетание многочисленных факторов делает нефтеперерабатывающее оборудование уязвимым для различных коррозионных явлений, которые могут привести к серьезным убыткам и авариям.

Большие потери от коррозии свойственны для всех стран, имеющих нефтехимическую и нефтеперерабатывающую отрасли промышленности (табл. 1).

Почти 80 % аварий и выходов технологического оборудования из строя на нефтедобывающих и нефтеперерабатывающих предприятиях России являются следствием его коррозионного разрушения. Например, удельная частота отказов трубопроводов (шт./км/год) вследствие коррозии для нефтяных компаний ПАО «Газпром нефть», ОАО «Дагнефть», ПАО «ЛУКОЙЛ», ПАО «НК «Роснефть», ООО «РН-Юганскнефтегаз», АО «Самаранефтегаз», ООО «РН-Сахалинморнефтегаз», ООО «РН-Ставропольнефтегаз» существенно превышает допустимые показатели надежности промышленных трубопроводных систем.

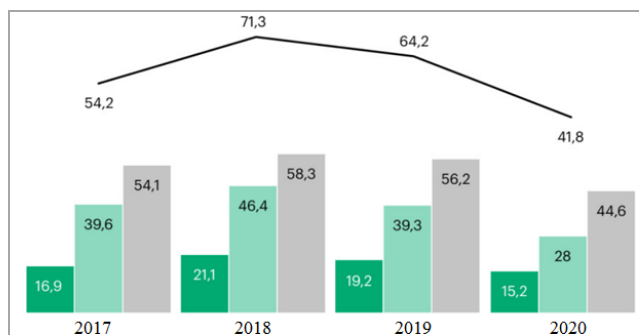


Рис. 1. Нефтегазовый сектор в экономике России (Росстат, Минфин, ФТС, Банк России, компания ВР: <https://www.rbc.ru/economics/13/07/2021/60ec40d39a7947f74aeb2aae>):

- – доля нефтегазового сектора в ВВП России, %
- – доля нефтегазовых доходов в федеральном бюджете, %
- – доля нефти и газа в товарном экспорте ВВП России, %
- – средние цены на нефть Brent, USD за баррель

Таблица 1

Потери от коррозии [3–7, 9, 10]

Страна	Общие потери от коррозии, млн USD/г	Затраты на защиту от коррозии, млн USD/г
Англия	440	
США	500	
Япония	575	340
Россия	390	370

На скважинах месторождений ООО «ЛУКОЙЛ-Коми», ООО «РНСтавропольнефтегаз», ОАО «Томскнефть» ВНК и др. срок эксплуатации подвески насосно-компрессорных труб не превышает 4–6 месяцев [1, 2, 9, 10].

Аварии по причине коррозии увеличивают стоимость плановых и неплановых ремонтов нефтепромыслового оборудования и уменьшают сроки его амортизации. Потери металлов вследствие коррозии составляют в России до 12 % общей массы металлофонда, что эквивалентно потере почти 30 % металла, выпускаемого металлургической промышленностью за год. Однако основной ущерб от коррозии состоит не в потере металла как материала, а в значительной стоимости повреждаемого коррозией оборудования и его ремонта, а также убытка вследствие простоев предприятия при добыче нефти и газа. Во многих странах общие потери от коррозии составляют до 30 % от затрат на добычу нефти и газа или 4–6 % национального дохода [1, 4, 5, 12].

Защита от коррозии

Коррозия является одной из наиболее серьезных проблем, с которыми сталкиваются нефтедобывающие предприятия и нефтеперерабатывающие заводы. Ежегодные затраты на коррозию оцениваются в миллиарды долларов, поэтому защита деталей и конструкций от коррозионного разрушения является актуальной задачей, что определяет необходимость разработки новых коррозионно-стойких материалов и средств их защиты [2–4, 14–17]. Важность этой проблемы подтверждает 1887 исследований, опубликованных с 2000 по 2020 г.

на поисковых платформах WOS SCIE, SSCI, A & HCI и CPCI-S [2–4, 7, 13].

Для защиты оборудования от коррозии применяют различные методы: использование ингибиторов коррозии и современных материалов, катодную защиту и нанесение защитных покрытий. Каждому методу присущи свои достоинства, особенности и недостатки.

Ингибиторы коррозии обычно используют для уменьшения коррозионного воздействия металлов [14–17]. Но большинство ингибирующих соединений оказывают вредное воздействие на окружающую среду, а также являются дорогостоящими и токсичными. Поэтому растет осознание необходимости замены нефтяных ингибиторов экологически чистыми [17–20].

Сталь и алюминий являются основными металлами, используемыми почти во всех отраслях нефтегазовой промышленности. Углеродистые и низколегированные углеродистые стали являются первой альтернативой, которую следует учитывать при выборе материала не только с точки зрения стоимости, но и из-за их доступности. Поэтому предпринимаются значительные усилия для повышения коррозионной стойкости углеродистых и низколегированных сталей. Когда окружающая среда слишком агрессивна для углеродистых сталей, одним из способов уменьшить проблемы с коррозией является использование ингибиторов. Однако в условиях высокой агрессивности окружающей среды и высоких температур могут потребоваться более дорогие материалы, например, коррозионно-стойкие сплавы [21–23]. Еще одним ключевым фактором является чистота стали, поскольку включения могут служить местами зарождения трещин. Кроме того, содержание таких элементов, как P и S, должно быть сведено к минимуму.

Производство нержавеющих сталей и сплавов связано со значительным расходом дефицитных и дорогостоящих материалов и компонентов. Поэтому все промышленно развитые страны не увеличивают выпуск этих материалов, а используют современные технологии для нанесения покрытий и повышения коррозионной стойкости деталей [24–26], а также ведут исследования по разработке и созданию коррозионно-стойких и недорогих материалов [8, 26, 27].

Для снижения воздействия агрессивной среды применяются различные антикоррозионные, износостойкие покрытия [23, 25], и нанопокрyтия [27, 28].

Проблема использования специализированных пассивирующих металлов и сплавов заключается в достаточно узком диапазоне характеристик защитной пленки. При незначительном изменении условий эксплуатации пленка разрушается и в месте разрыва пленки начинается лавинообразный процесс локальной коррозии [24].

Нефтегазовая отрасль предъявляет к материалам повышенные требования: агрессивная среда, высокие температуры и давления, и др. Таким требованиям в значительной мере удовлетворяют функциональные наноструктурные и металломатричные композиционные материалы. В последние десятилетия был достигнут значительный прогресс в улучшении композитных материалов с матрицей из легких

металлов с целью их использования в наиболее ответственных областях применения [29–31]. Существенную часть таких материалов составляют композиты на основе меди, алюминия и их сплавов. Диспергирование функционального наполнителя в металлической матрице позволяет достичь уровня свойств, обеспечивающих возможность разработки материалов для специализированного применения [32–35].

Во многих работах изучалось коррозионное поведение алюмоматричных композитов, армированных карбидами [29], огнеупорами [34], графитом [31] и другими наполнителями [30].

Методология проведения исследований

В настоящей работе исследовали влияние параметров структуры на коррозионную стойкость алюминия, меди и сплавов на их основе. Испытывали обычные и наноструктурированные образцы алюминия, меди, бронзы БрА9ЖЗЛ, сплава АМг6 и сплава Al-Ti, содержащего 6,3 % (мас.) титана. Для синтеза композита использовали порошки металлов: первичного алюминия (марка А0), меди М1 и технического титана (ВТ1-00). Порошки металлов при шихтовании перетирали в агатовой ступке до однородного состояния. Достижение однородности шихты контролировали с помощью оптического микроскопа. Плавку металлов и сплавов проводили в тиглях из диоксида циркония в восстановительной атмосфере электрической печи сопротивления с графитовым нагревателем. Структурирующую обработку исследуемых металлических материалов проводили в жидкофазном состоянии по ранее разработанной методике [36]. Нанокристаллический характер образцов металлов и сплавов фиксировали с помощью двулучевого электронно-ионного микроскопа ZEISS CrossBeam AURIGA и атомно-силовой микроскопии (АСМ), используя сканирующий зондовый микроскоп NEXТ с кантилевером NSG30.

Сравнительные испытания коррозионной стойкости проводили на трех образцах синтезированного наноструктурного и композиционного материала и трех образцах аналогичных геометрических размеров алюминия марки А0 и меди марки М1. Испытания проводили в статических условиях, без принудительной циркуляции коррозионной среды. В качестве испытательной коррозионной среды использовали модельный раствор электролита, содержащий 30 г/л NaCl с добавкой уксусной кислоты до pH = 4,0. Итоговые значения скорости коррозии рассчитывали как среднее арифметическое значение результатов трех соответствующих испытаний с относительной погрешностью, не превышающей 5 %. Перед испытанием образцы цилиндрической формы полировали до зеркального блеска, промывали этиловым спиртом и после просушивания взвешивали с точностью $\pm 0,0001$ г. Затем по три образца одного металла или сплава с одинаковой предысторией в отношении потоковой обработки помещали в одну ячейку, обеспечивая полное погружение в раствор и отсутствие контакта поверхности образцов. Для крепления (подвеса) образцов использовали нить из синтетического материала.

После окончания испытаний образцы извлекали из ячейки, промывали теплой дистиллированной

Результаты исследования коррозионной стойкости меди, алюминия и металломатричных композиционных материалов

№ п/п	Материал	Образец	V_k , г/(м ² ·ч)	Π, мм/г	$\bar{\Pi}$, мм/г
1	Al	1	0,1318	0,4279	0,4397
		2	0,1371	0,4415	
		3	0,1377	0,4496	
2	Al/Ti	1	0,8251	2,7514	0,3974
		2	0,1232	0,3812	
		3	0,1321	0,4089	
3	AMg6	1	0,8251	2,7514	2,729
		2	0,8011	2,6582	
		3	0,8377	2,7775	
4	Cu (M1)	1	0,2045	0,2005	0,1983
		2	0,1964	0,1926	
		3	0,2061	0,2019	
5	BrA9ЖЗЛ	1	0,0760	0,0878	0,0875
		2	0,0741	0,0855	
		3	0,0772	0,0893	

водой и этиловым спиртом, просушивали и взвешивали. Дополнительно фиксировали внешний вид образцов и проводили оценку состояния их поверхности. База испытаний составила 144 ч, температура +22 °С, объем раствора в ячейке с тремя образцами – 500 мл.

Итоговые значения скорости коррозии рассчитывали как среднее арифметическое значение результатов трех соответствующих испытаний с относительной погрешностью, не превышающей 5 %.

При сплошной равномерной коррозии металлических материалов коррозионную стойкость характеризуют такими количественными показателями коррозии, как потеря массы на единицу площади поверхности и глубина проникновения коррозии. Соответственно рассчитывают скорость убыли массы и линейную скорость коррозии [37].

Скорость убыли массы – величина V_k , представляющая собой отношение:

$$V_k = \frac{m_1 - m_2}{St}, \quad (1)$$

где m_1 , m_2 – масса образца до и после коррозии соответственно, г; t – время коррозионного разрушения, ч; S – площадь поверхности образца, м².

Массовые потери при коррозии могут быть пересчитаны в скорость коррозии, выраженную в мм/г:

$$\Pi = \frac{8,76V_k}{\rho}, \quad (2)$$

где Π – скорость коррозии, мм/год; ρ – плотность металла, г/см³; V_k – скорость коррозии, г/(м²·ч); 8,76 – коэффициент.

Плотность металлических материалов для использования в расчетах скорости коррозии определяли методом гидростатического взвешивания.

Обсуждение результатов

Результаты исследований коррозионной стойкости алюминия, меди, их сплавов и металломатричного сплава Al/Ti представлены в табл. 2.

В результате проведенных исследований установлено, что для всех исследованных образцов наблюдается сплошная равномерная коррозия, характеризующаяся равномерным распределением коррозионного поражения металлической поверхности (рис. 2).

На основании величины Π можно произвести оценку коррозионной стойкости металлов по десятибалльной шкале согласно ГОСТ 9.908-85 «Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы и сплавы. Методы определения показателей коррозии и коррозионной стойкости» [37].

Коррозионная стойкость образцов бронзы С95200 оценивается в 4 балла, образцов алюминия – в 5 баллов. При этом скорость коррозии (Π , мм/год) образцов металлов и сплавов, испытывавших потоковую обработку в расплавленном состоянии, примерно на 11 % меньше, чем скорость коррозии образцов тех же металлов и сплавов, но не подвергавшихся потоковой обработке в расплавленном состоянии.

Отметим, что наибольшее расчетное значение относительной погрешности результатов коррозионных испытаний, составляющее 4,8 %, получено для 518,0 aluminum-magnesium alloy, подвергавшегося потоковой обработке в расплавленном состоянии (рис. 3).

При этом дисперсное армирование алюминия титаном обеспечивает повышение коррозионной стойкости матричного металла на 9,6 %, что имеет значение при использовании композита в качестве металлического конструкционного материала.

Чистый алюминий демонстрирует хорошую коррозионную стойкость, но плохие механические свойства и поэтому его легируют другими элементами для повышения прочности. Упрочнение твердого

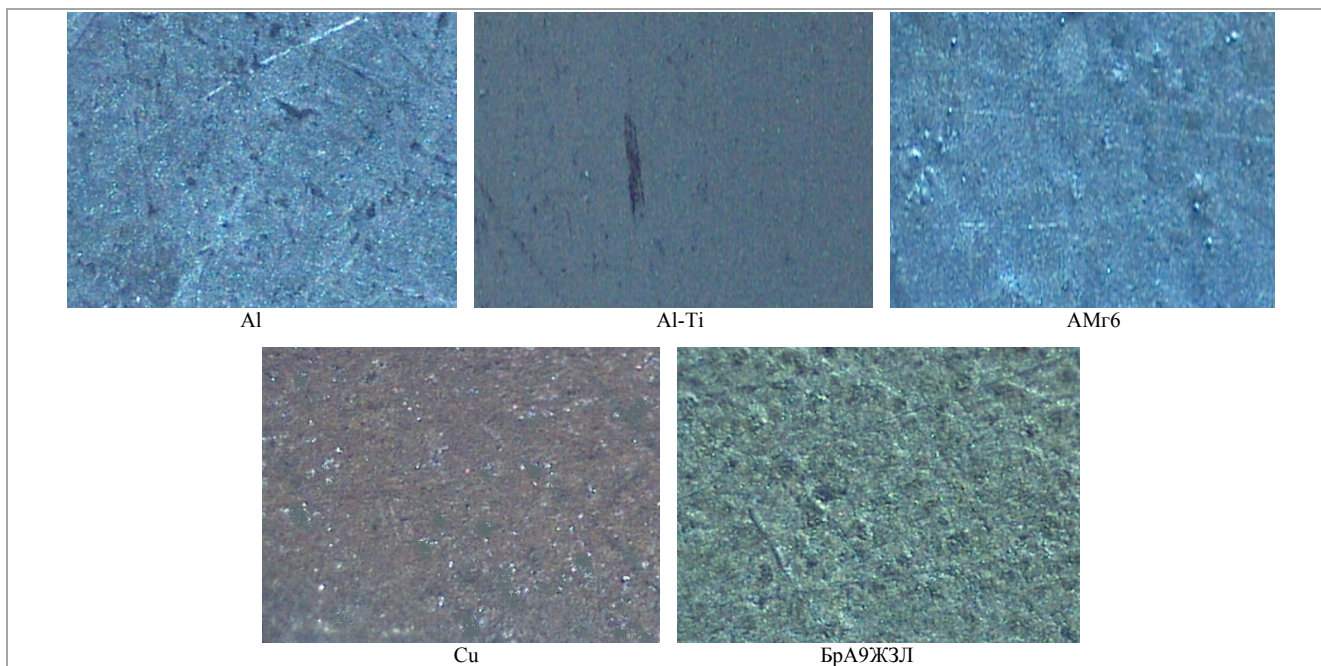


Рис. 2. Поверхность образцов после испытаний коррозионной стойкости (× 200)

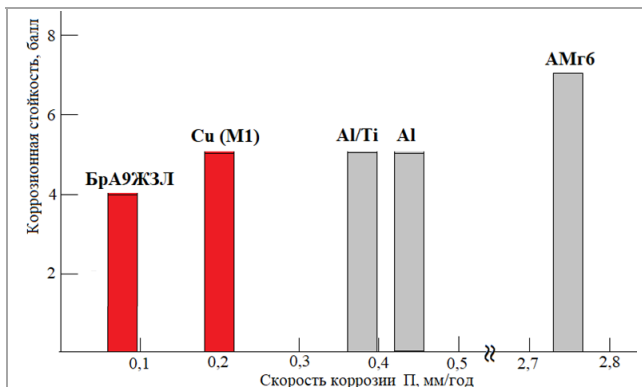


Рис. 3. Относительная коррозионная стойкость образцов

раствора, дисперсионное упрочнение, измельчение зерна и деформационное упрочнение являются основными механизмами упрочнения алюминиевых сплавов. Однако получение и деформационное упрочнение вызывают электрохимические неоднородности, вызывающие локальную коррозию. Следовательно, в сплавах Al существует компромисс между механическими и коррозионными свойствами. Характеристики матрицы и вторичных фаз (т.е. состав, количество, морфология и распределение) играют жизненно важную роль в определении коррозионных характеристик.

Коррозионная стойкость литых алюминиевых сплавов изучалась многими исследователями, например, [39–41], и др. С точки зрения кинетики коррозионных процессов алюминиевые сплавы являются короткозамкнутой системой многоэлектродных элементов [42]. Поверхность металла содержит участков с различными величинами потенциалов. Участки поверхности, достигшие потенциала пробоя, имеют повышенную адсорбционную активность и электропроводимость. На этих участках адсорбируются активные ионы, при этом вытесняется кислород и образуется комплекс «металл – анион», переходящий в раствор. Поскольку растворимость большинства легирующих

элементов в Al достаточно ограничена, образование вторичных фаз вызывает локальную коррозию, что неизбежно при использовании традиционных методов обработки. Например, сплавы Al-5 at.% Cr и Al-5at.% Ti, полученные литьем, показали наличие крупных кристаллов интерметаллидов и высокую скорость коррозии без значительного увеличения прочности. Поэтому желательны нетрадиционные способы производства сплавов, позволяющие повысить растворимость легирующих элементов в твердом состоянии. Например, импульсное электроосаждение или напыление. Исследование порошковых сплавов Al-5 at.% Mg, полученных холодным прессованием 0,01 M NaCl, показали хорошую коррозионную стойкость сплава, что объясняется одновременным влиянием границ зерен и упрочнения твердого раствора [34]. Испытания в морской воде сплавов AMg6, Д16-Т и стали 08Х17 показали 100%-ные коррозионное поражение поверхности, но отсутствие межкристаллитной коррозии и малую потерю массы [43]. Исследование отливок алюминиевых сплавов показало низкую коррозионную стойкость в основных солевых и кислых средах. В сплавах Al-Mg наблюдалась точечная, равномерная, усталостная и межкристаллитная коррозия [39, 44].

Исследование коррозионной стойкости меди и бронзы в растворе 3,5 % NaCl показало, что бронза имела среднюю коррозионную стойкость (0,43265 мм/г), которая была выше, чем у латуни и меди (0,43265 мм/г) [44, 45].

Известны исследования взаимодействия между титаном и алюминием, когда сплавы получали различными путями: армированием алюминием титановой матрицы и армированием титаном алюминиевой матрицы [29, 34].

Исследования относительной влажности, температуры, осадков и pH на атмосферную коррозию показали, что наиболее значительный вклад к коррозии всего процесса имеет величина pH [21, 34, 43, 46].

Заключение

Необходимость своевременного проведения мероприятий по повышению коррозионной стойкости материалов подтверждается снижением количества аварийных ситуаций и увеличением срока стабильной работы нефтегазопромыслового оборудования. Применение деталей из алюмоматричных материалов позволяет повысить срок службы деталей без применения дорогих и дефицитных металлов.

Для оценки состояния нефтегазопромыслового оборудования необходимо регулярно выполнять коррозионный контроль. При этом в целях минимизации расходов коррозионный контроль должен осуществляться лишь в местах, наиболее подверженных коррозионному воздействию.

Повышение потребности нефтегазовой промышленности в материалах с уникальными физическими, механическими и химическими свойствами увеличивает области применения композиционных материалов.

Библиографический список

1. Болотова Ю.В., Ручкина О.И. Коррозия теплообменного оборудования нефтехимических производств // Вестник ПНИПУ. – 2015. – Т. 17, № 4. – С. 102–119. DOI: 10.15593/2224-9877/2015.4.08
2. Поварова Л.В., Мунтян В.С., Скиба А.С. Анализ современных методов защиты нефтепромыслового оборудования от коррозии // Булатовские чтения. – 2020. – Т. 4. – С. 125–129.
3. Corrosion Strategy in Oil Field System / I.A. Abdalsamed, I.A. Amar, F.A. Altohami, F.A. Salih, M.S. Mazek, M.A. Ali, A.A. Sharif // Journal of Chemical Reviews. – 2020. – Vol. 2, no. 1. – P. 28–39. DOI: 10.33945/SAMI/JCR.2020.1.2
4. Al-Moubaraki A.H., Obot I.B. Corrosion challenges in petroleum refinery operations: Sources, mechanisms, mitigation, and future outlook // Journal of Saudi Chemical Society. – 2021. – Vol. 25, no. 12. – P. 101370. DOI: 10.1016/J.JSCS.2021.101370
5. Kadhim M.G., Ali M.T. A Critical Review on Corrosion and its Prevention in the Oilfield Equipment // Journal of Petroleum Research and Studies. – 2021. – Vol. 7, no. 2. – P. 162–189. DOI: 10.52716/JPRS.V7I2.195
6. Solovyeva V.A., Almuhamadi K.H., Badeghaish W.O. Current Downhole Corrosion Control Solutions and Trends in the Oil and Gas Industry: A Review // Materials. – 2023. – Vol. 16, no. 5. – P. 1795. DOI: 10.3390/ma16051795
7. Mapping the knowledge domains of research on corrosion of petrochemical equipment: An informetrics analysis-based study / Z. Lang, D. Wang, H. Liu, X. Gou // Engineering Failure Analysis. – 2021. – Vol. 129. – P. 105716. DOI: 10.1016/J.ENGFAILANAL.2021.105716
8. Corrosive Environment Assessment and Corrosion-Induced Rockbolt Failure Analysis in a Coastal Underground Mine / Q. Guo, J. Pan, M. Wang, M. Cai, X. Xi // International Journal of Corrosion. – 2021. – Vol. – 2019. – P. 9. DOI: 10.1155/2019/2105842
9. Выборщик М.А., Иоффе А.В. Научные основы разработки и методологии создания сталей для производства нефтепромысловых труб повышенной прочности и коррозионной стойкости // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2019. – № 1 (47). – С. 13–20. DOI: 10.18323/2073-5073-2019-1-13-20
10. Двадненко М.В., Маджигатов Р.В., Ракиятский Н.А. Воздействие нефти на окружающую среду // Международный журнал экспериментального образования. – 2017. – № 3-1. – С. 89–90.
11. Минина Н.Н., Дьяконова Д.Е., Изилиянов А.Ю. Экологические проблемы при добыче нефти и пути их решения // Заметки ученого. – 2020. – № 7. – С. 103–107.
12. Современная практика применения противокоррозионной защиты оборудования нефтедобывающих скважин / А.А. Даминов, В.В. Рагулин, А.И. Волошин, А.Г. Телин // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2020. – № 6 (128). – С. 30–44. DOI: 10.17122/ntj-oil-2020-6-30-44
13. Серебряков А.Н., Мотузов И.С. Коррозия нефтепромыслового оборудования и мероприятия по противокоррозионной защите на нефтяном месторождении Каракудук (западный Казахстан) // Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования. – 2017. – Т. 18, № 2. – С. 174–181. DOI: 10.22363/2312-8143-2017-18-2-174-181
14. Fayomi O.S.I., Akande I.G., Odigie S. Economic Impact of Corrosion in Oil Sectors and Prevention: An Overview // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1378. – P. 022037. DOI: 10.1088/1742-6596/1378/2/022037
15. Downhole corrosion inhibitors for oil and gas production – a review / M. Askari, M. Aliofkhaezraei, R. Jafari, P. Hamghalam, A. Hajizadeh // Applied Surface Science Advances. – 2021. – Vol. 6. – P. 100128. DOI: 10.1016/j.apsadv.2021.100128
16. Tamalmani K., Husin H. Review on Corrosion Inhibitors for Oil and Gas Corrosion Issues // Applied Science. – 2020. – Vol. 10. – P. 3389. DOI: 10.3390/app10103389 www.mdpi
17. Мукатдисов Н.И., Фархутдинова А.Р., Елпидинский А.А. Методы борьбы с коррозией и преимущества ингибиторной защиты нефтепромыслового оборудования // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – № 3. – С. 279–282.
18. Mitigation of corrosion in petroleum oil well/tubing steel using pyrimidines as efficient corrosion inhibitor: Experimental and theoretical investigation / T.K. Sarkar, V. Saraswat, R.K. Mitra, I.B. Obot, M. Yadav // Materialstoday communications. – 2021. – Vol. 26. – P. 101862. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2020.101862
19. Sanni O., Iwarere S.A., Daramola M.O. Investigation of Eggshell Agro-Industrial Waste as a Potential Corrosion Inhibitor for Mild Steel in Oil and Gas Industry // Sustainability. – 2023. – Vol. 15, no. 7. – P. 6155. DOI: 10.3390/SU15076155
20. Tamalmani K., Husin H. Review on Corrosion Inhibitors for Oil and Gas Corrosion Issues // Applied Science. – 2020. – Vol. 10. – P. 3389. DOI: 10.3390/app10103389 www.mdpi
21. Коррозия стали в сероводородсодержащих модельных средах нефтяных месторождений / А.С. Гузенкова, И.В. Артамонова, С.А. Гузенков, С.С. Иванов // Металлург. – 2021. – № 5. – С. 36–39. DOI: 10.52351/00260827_2021_05_36
22. Erosion-Corrosion of AISI 304L Stainless Steel Affected by Industrial Copper Tailings / Á. Soliz, L. Cáceres, F. Pineda, F. Galleguillos // Metals. – 2020. – Vol. 10. – P. 1005–1021. DOI: 10.3390/met10081005
23. Anti-corrosion wear-resistant coatings on parts of oil field equipment / E.N. Eremin, V.M. Yurov, M.K. Ibatov, S.A. Guchenko, V.Ch. Laurynas // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 152. – P. 594–600. DOI: 10.1016/J.PROENG.2016.07.661
24. Heavy Loaded Parts of Petrochemical Equipment Destruction Cause Investigation / A.B. Laptev, S.A. Naprienko, R.ZH. Akhiyarov, A.V. Golubev // WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics. – 2022. – Vol. 17. – P. 1–7. DOI: 10.37394/232011.2022.17.1
25. Kovalev M., Alekseeva E., Shaposhnikov N. Investigation of hydroabrasive resistance of internal anti-corrosion coatings used in the oil and gas industry // 2020 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2020. – Vol. 889, no. 012020. DOI: 10.1088/1757-899X/889/1/012020
26. Olorundaisi E., Jamiru T., Adegbola A.T. Mitigating the effect of corrosion and wear in the application of high strength low alloy steels (HSLA) in the petrochemical transportation industry-a review // Materials Research Express. – 2019. – Vol. 6. – P. 1265k9. DOI: 10.1088/2053-1591/ab65e7
27. A Review on the Corrosion Behaviour of Nanocoatings on Metallic Substrates / D.H. Abdeen, M.El. Hachach, M. Koc, M.A. Atieh // Materials. – 2019. – Vol. 12. – P. 210–252. DOI: 10.3390/ma12020210
28. Effect of structure: A new insight into nanoparticle assemblies from inanimate to animate / C. Huang, X. Chen, Z. Xue, T. Wang // Science advances. – 2020: eaba1321. DOI: 10.1126/sciadv.aba1321
29. Fabrication and Corrosion Behaviour of Aluminium Metal Matrix Composites – A Review / R.A. Kumar, S.J. Akash, S. Arunkumar, V. Balaji, M. Balamurugan, A.J. Kumar // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 923. – P. 012056. DOI: 10.1088/1757-899X/923/1/012056
30. Nanjan S., Murali J.G. Analysing the Mechanical Properties and Corrosion Phenomenon of Reinforced Metal Matrix Composite // Mat. Res. – 2020. – Vol. 23, no. 2. DOI: 10.1590/1980-5373-MR-2019-0681
31. Corrosion Resistance of Al-CNT Metal Matrix Composites / V.V. Popov, A. Pismenny, N. Larianovsky, A. Lapteva, D. Safranchik // Materials. – 2021. – Vol. 14. – P. 3530–3542. DOI: 10.3390/ma14133530
32. Викмухаметов М.В., Житников Д.С. Композиционные материалы как двигатель прогресса // Интернаука. – 2020. – № 45-2 (174). – С. 19–20.

33. Использование композитных материалов в нефтегазовой отрасли / А.В. Исанова, А.А. Долгих, С.А. Петров, Р.А. Задвицкий // Градостроительство. Инфраструктура. Коммуникации. – 2020. – № 2 (19). – С. 39–44.
34. Microstructure and Corrosion Performance of Aluminium Matrix Composites Reinforced with Refractory High-Entropy Alloy Particulates / E. Ananiadis, K.T. Argyris, T.E. Matikas, A.K. Sfikas, A.E. Karantzalis // *Appl. Sci.* – 2021. – Vol. 11. – P. 1300. DOI: 10.3390/app11031300
35. Ненахов А.И., Сергеев Е.В. Возможности применения композитных материалов в области энергетики для нефтепроводов и продуктопроводов // Энергетическая политика. – 2022. – № 10 (176). – С. 54–65. DOI: 10.46920/2409-5516.2022.10176.54
36. Apakshv R.A., Khazin M.L., Krasikov S.A. Effect of Nanostructuring of Aluminum, Copper, and Alloys on Their Basis Wear for Resistance and Hardness // *Journal of Friction and Wear.* – 2020. – Vol. 41, no. 5. – P. 428–431. DOI: 10.3103/s1068366620050037R.A
37. ГОСТ 9.908-85. Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы и сплавы. Методы определения показателей коррозии и коррозионной стойкости. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1999. – 17 с.
38. Rohatgi P.K., Xiang C., Gupta N. Aqueous corrosion of metal matrix composites // *In Comprehensive Composite Materials II.* – 2017. – P. 287–312. DOI: 10.1016/B978-0-12-803581-8.09985-9
39. Berlanga-Labari C., Biezma-Moraleda M.V., Rivero P.J. Corrosion of Cast Aluminum Alloys: A Review // *Metals.* – 2020. – Vol. 10, no. 10. – P. 1384. DOI: 10.3390/met10101384C
40. Excellent corrosion resistance and hardness in Al alloys by extended solid solubility and nanocrystalline structure / J. Esquivel, H.A. Murdoch, K.A. Darling, R.K. Gupta // *Materials Research Letters.* – 2018. – Vol. 6, no. 1 – P. 79–83. DOI: 10.1080/21663831.2017.1396262
41. Corrosion behavior of aluminum alloy in sulfur-associated petrochemical equipment H2S environment / X. Cao, Y. Lu, Z. Wang, H. Wei, L. Fan, R. Yang, W. Guo // *Chemical Engineering Communications.* – 2023. – Vol. 210, no. 2. – P. 233–246. DOI: 10.1080/00986445.2022.2030729
42. Синявский В.С., Вальков В.Д., Калинин В.Д. Коррозия и защита алюминиевых сплавов. – М.: Металлургия, 1979. – 224 с.
43. Варченко Е.А., Курс М.Г. Щелевая коррозия алюминиевых сплавов и нержавеющей сталей в морской воде // ТРУДЫ ВИАМ. – 2018. – № 7 (67). – С. 96–105. DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-7-96-105
44. Corrosion characterization of Cu-based alloy in different environment / R. Soenoko, P.H. Setyarin, S. Hidayatullah, M.S. Ma'arif, F. Gapsari // *Metallurgija.* – 2020. – Vol. 59, no. 3. – P. 373–376. <https://hrcak.srce.hr/237045>
45. Surface Characterization and Corrosion Behavior of 90/10 Copper-Nickel Alloy in Marine Environment / T. Jin, W. Zhang, N. Li, X. Liu, L. Han, W. Dai // *Materials.* – 2019. – Vol. 12. – P. 1869–1884. DOI: 10.3390/ma12111869
46. Mechanical and Corrosion Behavior of Al7075 (Hybrid) Metal Matrix Composites by Two Step Stir Casting Process / M. Sambathkumar, P. Navaneethkrishnan, K. Ponappa, K.S.K. Sasikumar // *Lat. Am. j. solids struct.* – 2017. – Vol. 14, no. 2. – P. 243–255. DOI: 10.1590/1679-78253132

References

- Bolotova Iu.V., Ruchkinova O.I. Korroziia teploobmennogo oborudovaniia neftekhimicheskikh proizvodstv [Corrosion of the heatexchange equipment of petrochemical productions]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta*, 2015, vol. 17, no. 4, pp. 102-119. DOI: 10.15593/2224-9877/2015.4.08
- Povarova L.V., Muntian V.S., Skiba A.S. Analiz sovremennykh metodov zashchity neftepromyslovogo oborudovaniia ot korrozii [Analysis of modern methods for protecting oilfield equipment from corrosion]. *Bulatovskie chteniia*, 2020, vol. 4, pp. 125-129.
- Abdalsamed I.A., Amar I.A., Altohami F.A., Salih F.A., Mzakek M.S., Ali M.A., Sharif A.A. Corrosion Strategy in Oil Field System. *Journal of Chemical Reviews*, 2020, vol. 2, no. 1, pp. 28-39. DOI: 10.33945/SAMI/JCR.2020.1.2
- Al-Moubaraki A.H., Obot I.B. Corrosion challenges in petroleum refinery operations: Sources, mechanisms, mitigation, and future outlook. *Journal of Saudi Chemical Society*, 2021, vol. 25, no. 12, 101370 p. DOI: 10.1016/J.JSCS.2021.101370
- Kadhim M.G., Ali M.T. A Critical Review on Corrosion and its Prevention in the Oilfield Equipment. *Journal of Petroleum Research and Studies*, 2021, vol. 7, no. 2, pp. 162-189. DOI: 10.52716/JPRS.V7I2.195
- Solovyeva V.A., Almuhamadi K.H., Badeghaish W.O. Current Downhole Corrosion Control Solutions and Trends in the Oil and Gas Industry: A Review. *Materials*, 2023, vol. 16, no. 5, 1795 p. DOI: 10.3390/ma16051795
- Lang Z., Wang D., Liu H., Gou X. Mapping the knowledge domains of research on corrosion of petrochemical equipment: An informetrics analysis-based study. *Engineering Failure Analysis*, 2021, vol. 129, 105716 p. DOI: 10.1016/J.ENGFAILANAL.2021.105716
- Guo Q., Pan J., Wang M., Cai M., Xi X. Corrosive Environment Assessment and Corrosion-Induced Rockbolt Failure Analysis in a Costal Underground Mine. *International Journal of Corrosion*, 2019, pp. 1-9. DOI: 10.1155/2019/2105842
- Vyboishchik M.A., Ioffe A.V. Nauchnye osnovy razrabotki i metodologiya sozdaniia staley dlia proizvodstva neftepromyslovykh trub povyshennoi prochnosti i korrozionnoi stoikosti [Scientific basis of development and the methodology of creation of steels for the production of oilfield casing and tubular goods with the increased strength and corrosion resistance]. *Vektor nauki Tol'iattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2019, no. 1(47), pp. 13-20. DOI: 10.18323/2073-5073-2019-1-13-20
- Dvadnenko M.V., Madzhigatov R.V., Rakitianskii N.A. Vozdeistvie nefi na okruzhaiushchuiu srediu [Impact of oil on the environment]. *Mezhdunarodnyi zhurnal eksperimental'nogo obrazovaniia*, 2017, no. 3-1, pp. 89-90.
- Minina N.N., D'iaikonova D.E., Izilianov A.Iu. Ekologicheskie problemy pri dobyche nefi i puti ikh resheniia [Environmental problems in oil production and ways to solve them]. *Zametki uchenogo*, 2020, no. 7, pp. 103-107.
- Daminov A.A., Ragulin V.V., Voloshin A.I., Telin A.G. Sovremennaia praktika primeneniia protivokorroziionnoi zashchity oborudovaniia neftedobyvaiushchikh skvazhin [Current practice of anti-corrosion protection of oil well equipment]. *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefi i nefteproduktov*, 2020, no. 6(128), pp. 30-44. DOI: 10.17122/ntj-oil-2020-6-30-44
- Serebriakov A.N., Motuzov I.S. Korroziia neftepromyslovogo oborudovaniia i meropriiatiia po protivokorroziionnoi zashchite na neftianom mestorozhdenii Karakuduk (zapadnyi Kazakhstan) [Corrosion of oilfield equipment and anticorrosion techniques applied on the Karakuduk oilfield (Western Kazakhstan)]. *Vestnik Rossiiskogo universiteta druzhby narodov. Inzhenernye issledovaniia*, 2017, vol. 18, no. 2, pp. 174-181. DOI: 10.22363/2312-8143-2017-18-2-174-181
- Fayomi O.S.I., Akande I.G., Odigie S. Economic Impact of Corrosion in Oil Sectors and Prevention: An Overview. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1378, 022037 p. DOI: 10.1088/1742-6596/1378/2/022037
- Askari M., Aliofkhaezai M., Jafari R., Hamghalam P., Hajizadeh A. Downhole corrosion inhibitors for oil and gas production - a review. *Applied Surface Science Advances*, 2021, vol. 6, 100128 p. DOI: 10.1016/j.apsadv.2021.100128
- Tamalmani K., Husin H. Review on Corrosion Inhibitors for Oil and Gas Corrosion Issues. *Applied Science*, 2020, vol. 10, 3389 p. DOI: 10.3390/app10103389 www.mdpi
- Mukadtsiov N.I., Farkhutdinova A.R., Elpidinskii A.A. Metody bor'by s korroziiei i preimushchestva ingibitornoi zashchity neftepromyslovogo oborudovaniia [Methods of combating corrosion and the benefits of inhibitor protection for oilfield equipment]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2014, no. 3, pp. 279-282.
- T.K. Sarkar, V. Saraswat, R.K. Mitra, I.B. Obot, M. Yadav Mitigation of corrosion in petroleum oil well/tubing steel using pyrimidines as efficient corrosion inhibitor: Experimental and theoretical investigation. *Materialstoday communications*, 2021, vol. 26, 101862 p. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2020.101862
- Sanni O., Iwarere S.A., Daramola M.O. Investigation of Eggshell Agro-Industrial Waste as a Potential Corrosion Inhibitor for Mild Steel in Oil and Gas Industry. *Sustainability*, 2023, vol. 15, no. 7, 6155 p. DOI: 10.3390/SU15076155
- Tamalmani K., Husin H. Review on Corrosion Inhibitors for Oil and Gas Corrosion Issues. *Applied Science*, 2020, vol. 10, 3389 p. DOI: 10.3390/app10103389 www.mdpi
- Guzenkova A.S., Artamonova I.V., Guzenkov S.A., Ivanov S.S. Korroziia stali v serovodorodsoderzhashchikh model'nykh sredakh neftiannykh mestorozhdenii [Corrosion of steel in hydrogen sulfide containing model mediums of oil fields]. *Metallurg*, 2021, no. 5, pp. 36-39. DOI: 10.52351/00260827.2021.05.36
- Soliz A., Cáceres L., Pineda F., Galleguillos F. Erosion-Corrosion of AISI 304L Stainless Steel Affected by Industrial Copper Tailings. *Metals*, 2020, vol. 10, pp. 1005-1021. DOI: 10.3390/met10081005
- Eremin E.N., Yurov V.M., Ibatov M.K., Guchenko S.A., Laurynas V.Ch. Anti-corrosion wear-resistant coatings on parts of oil field equipment. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 152, pp. 594-600. DOI: 10.1016/J.PROENG.2016.07.661
- Lapte A.B., Naprienko S.A., Akhmyarov R.ZH., Golubev A.V. Heavy Loaded Parts of Petrochemical Equipment Destruction Cause Investigation. *WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics*, 2022, vol. 17, pp. 1-7. DOI: 10.37394/232011.2022.17.1

25. Kovalev M., Alekseeva E., Shaposhnikov N. Investigation of hydroabrasive resistance of internal anti-corrosion coatings used in the oil and gas industry. *2020 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2020, vol. 889, no. 012020. DOI: 10.1088/1757-899X/889/1/012020
26. Olorundaisi E., Jamiru T., Adegbola A.T. Mitigating the effect of corrosion and wear in the application of high strength low alloy steels (HSLA) in the petrochemical transportation industry-a review. *Materials Research Express*, 2019, vol. 6, 1265k9 p. DOI: 10.1088/2053-1591/ab65e7
27. Abdeen D.H., Hachach M.El., Koc M., Atieh M.A. A Review on the Corrosion Behaviour of Nanocoatings on Metallic Substrates. *Material*, 2019, vol. 12, pp. 210-252. DOI: 10.3390/ma12020210
28. Huang C., Chen X., Xue Z., Wang T. Effect of structure: A new insight into nanoparticle assemblies from inanimate to animate. *Science advances*, 2020: eaba1321. DOI: 10.1126/sciadv.aba1321
29. Kumar R.A., Akash S.J., Arunkumar S., Balaji V., Balamurugan M., Kumar A.J. Fabrication and Corrosion Behaviour of Aluminium Metal Matrix Composites - A Review. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 923, 012056 p. DOI: 10.1088/1757-899X/923/1/012056
30. Nanjan S., Murali J.G. Analysing the Mechanical Properties and Corrosion Phenomenon of Reinforced Metal Matrix Composite. *Mat. Res*, 2020, vol. 23, no. 2. DOI: 10.1590/1980-5373-MR-2019-0681
31. Popov V.V., Pismenny A., Larianovsky N., Lapteva A., Safranchik D. Corrosion Resistance of Al-CNT Metal Matrix Composites. *Materials*, 2021, vol. 14, pp. 3530-3542. DOI: 10.3390/ma14133530
32. Bikmukhametov M.V., Zhitnikov D.S. Kompozitsionnye materialy kak dvigatel' progressa [Composite materials as the engine of progress]. *Internauka*, 2020, no. 45-2 (174), pp. 19-20.
33. Isanova A.V., Dolgikh A.A., Petrov S.A., Zadvitskii R.A. Ispol'zovanie kompozitnykh materialov v neftegazovoi otrasli [Use of composite materials in the oil and gas industry]. *Gradostroitel'stvo. Infrastruktura. Kommunikatsii*, 2020, no. 2(19), pp. 39-44.
34. Ananiadis E., Argyris K.T., Matikas T.E., Sfikas A.K., Karantzalis A.E. Microstructure and Corrosion Performance of Aluminium Matrix Composites Reinforced with Refractory High-Entropy Alloy Particulates. *Appl. Sci.*, 2021, vol. 11, 1300 p. DOI: 10.3390/app11031300
35. Nakhov A.I., Sergeenkova E.V. Vozmozhnosti primeneniia kompozitnykh materialov v oblasti energetiki dlia nefteprovodov i produktoprovodov [The possibilities of using composite materials in the field of energy for oil pipelines and product pipelines]. *Energeticheskaiia politika*, 2022, no. 10(176), pp. 54-65. DOI: 10.46920/2409-5516.2022_10176.54
36. Apakashev R.A., Khazin M.L., Krasikov S.A. Effect of Nanostructuring of Aluminum, Copper, and Alloys on Their Basis Wear for Resistance and Hardness. *Journal of Friction and Wear*, 2020, vol. 41, no. 5, pp. 428-431. DOI: 10.3103/s1068366620050037R.A
37. GOST 9.908-85. Edinaia sistema zashchity ot korrozii i starenii. Metally i splavy. Metody opredeleniia pokazatelei korrozii i korroziionnoi stoikosti [GOST 9.908-85. Unified system of protection against corrosion and aging. Metals and alloys. Methods for determining corrosion indicators and corrosion resistance]. Moscow: IPK Izdatel'stvo standartov, 1999, 17 p.
38. Rohatgi P.K., Xiang C., Gupta N. Aqueous corrosion of metal matrix composites. In *Comprehensive Composite Materials II*, 2017, pp. 287-312. DOI: 10.1016/B978-0-12-803581-8.09985-9
39. Berlanga-Labari C., Biezma-Moraleda M.V., Rivero P.J. Corrosion of Cast Aluminum Alloys: A Review. *Metals*, 2020, vol. 10, no. 10, 1384 p. DOI: 10.3390/met10101384C
40. Esquivel J., Murdoch H.A., Darling K.A., Gupta R.K. Excellent corrosion resistance and hardness in Al alloys by extended solid solubility and nanocrystalline structure. *Materials Research Letters*, 2018, vol. 6, no. 1, pp. 79-83. DOI: 10.1080/21663831.2017.1396262
41. Cao X., Lu Y., Wang Z., Wei H., Fan L., Yang R., Guo W. Corrosion behavior of aluminum alloy in sulfur-associated petrochemical equipment H2S environment. *Chemical Engineering Communications*, 2023, vol. 210, no. 2, pp. 233-246. DOI: 10.1080/00986445.2022.2030729
42. Siniavskii V.S., Val'kov V.D., Kalinin V.D. Korroziia i zashchita aluminievnykh splavov [Corrosion and protection of aluminum alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1979, 224 p.
43. Varchenko E.A., Kurs M.G. Shchelevaia korroziia aluminievnykh splavov i nerzhavieushchikh stali v morskoi vode [Crevice corrosion of aluminum alloys and stainless steel in marine water]. *TRUDY VIAM*, 2018, no. 7(67), pp. 96-105. DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-7-96-105
44. Soenoko R., Setyarini P.H., Hidayatullah S., Ma'arif M.S., Gapsari F. Corrosion characterization of Cu-based alloy in different environment. *Metalurgija*, 2020, vol. 59, no. 3, pp. 373-376. <https://hrcak.srce.hr/237045>
45. Jin T., Zhang W., Li N., Liu X., Han L., Dai W. Surface Characterization and Corrosion Behavior of 90/10 Copper-Nickel Alloy in Marine Environment. *Materials*, 2019, vol. 12, pp. 1869-1884. DOI: 10.3390/ma12111869
46. Sambathkumar M., Navaneethakrishnan P., Ponappa K., Sasikumar K.S.K. Mechanical and Corrosion Behavior of Al7075 (Hybrid) Metal Matrix Composites by Two Step Stir Casting Process. *Lat. Am. j. solids struct.*, 2017, vol. 14, no. 2, pp. 243-255. DOI: 10.1590/1679-78253132

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов равноценен.