Недропользование. 2025. Т. 25, № 2. С.115-122. DOI: 10.15593/2712-8008/2025.2.8

ISSN 2712-8008
Том / Volume 25 №2 2025
Домашняя страница журнала: http://vestnik.pstu.ru/geo/

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

УДК 622+544-971.2
Статья / Article
© ПНИПУ / PNRPU, 2025

Исследование коррозионной стойкости образцов композиционных материалов для нефтяного оборудования

М.Л. Хазин, Р.А. Апакашев

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

Study of corrosion resistance of composite material samples for oil equipment

Mark L. Khazin, Raphael A. Apakashev

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

Получена / Received: 05.11.2024. Принята / Accepted: 05.12.2024. Опубликована / Published: 01.04.2025

Ключевые слова:
алюминий, композиционные материалы, карбид хрома, коррозия, магний, нефтегазопромысловое оборудование, сталь, плотность, твердость.

Для повышения коррозионной стойкости и эксплуатационной надежности нефтегазопромыслового оборудования является актуальным применение инструментальных и конструкционных металломатричных материалов, армированных различными функциональными наполнителями. Выполнено исследование коррозионной стойкости ряда алюмоматричных дисперсно армированных композитов, содержащих до 10 мас. % карбида хрома и магния. Экспериментальные образцы композиционных материалов синтезировали методом порошковой металлургии, спекая уплотненные прессованием исходные материалы в алундовом тигле под угольной засыпкой при температуре 640 °С в течение 1 ч. Фазовый состав полученных композитов изучали на рентгеновском дифрактометре XRD 7000 (Shimadzu) с приставкой для рентгеноспектрального микроанализа. Фотографии микроструктуры и карты распределения химических элементов получали на электронном сканирующем микроскопе VEGA LMS. Для измерений твердости композитов использовали твердомер ИТВ-30-АМВ. Коррозионные испытания проводили при комнатной температуре в течение 504 ч. Коррозионной средой служил модельный раствор электролита без принудительной циркуляции, содержащий 30 г/л хлорида натрия и добавку уксусной кислоты до pH = 4,0. Установлено, что скорость коррозии (П, мм/год) образцов уменьшается практически в два раза пропорционально повышению содержания карбида хрома в матричном алюминии. Дополнительное легирование композитов магнием увеличивает скорость коррозии относительно чистого алюминия пропорционально повышению содержания магния. Во всех случаях наблюдается сплошное равномерное распределение коррозионного поражения металлической поверхности образцов и снижение их твердости после испытаний на коррозионную стойкость. Результаты исследований свидетельствуют о повышенной коррозионной стойкости композита Al-Cr_3C_2, что важно для его применений в составе оборудования, эксплуатируемого в коррозионно-активной среде.

Keywords:
aluminum, composite materials, chromium carbide, corrosion, magnesium, oil and gas field equipment, steel, density, hardness.

The use of instrumental and structural metal matrix materials reinforced with various functional fillers is relevant to increase the corrosion resistance and operational reliability of oil and gas field equipment. A study of the corrosion resistance of a number of aluminum matrix dispersion-reinforced composites containing up to 10% (wt.) chromium carbide and magnesium was carried out. Experimental samples of composite materials were synthesized by powder metallurgy by sintering compacted starting materials in an alundum crucible under a coal powder at a temperature of 640 °C for 1 hour. The phase composition of the resulting composites was studied on an XRD 7000 X-ray diffractometer (Shimadzu) with an attachment for X-ray spectral microanalysis. Photographs of the microstructure and distribution maps of chemical elements were obtained using a VEGA LMS scanning electron microscope. To measure the hardness of the composites, an ITV-30-AMV hardness tester was used. Corrosion tests were carried out at room temperature for 504 hours. The corrosive medium was a model electrolyte solution without forced circulation, containing 30 g/l sodium chloride and the addition of acetic acid to pH = 4.0. It has been established that the corrosion rate (P, mm/year) of the samples decreases almost twofold in proportion to the increase in the content of chromium carbide in the matrix aluminum. Additional alloying of composites with magnesium increases the corrosion rate relative to pure aluminum in proportion to the increase in magnesium content. A continuous uniform distribution of corrosion damage to the metal surface of the samples and a decrease in their hardness after corrosion resistance tests are observed in all cases. The research results indicate increased corrosion resistance of the Al-Cr_3C_2 composite, which is important for its applications as part of equipment operated in a corrosive environment.

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

Mark L. Khazin (Author ID in Scopus: 6506526940, ORCID: 0000-0002-6081-4474) – Doctor in Engineering, Professor (tel.: +007 (343) 283 09 57, e-mail: Khasin@ursmu.ru). The contact person for correspondence.
Raphael A. Apakashev (Author ID in Scopus: 6603092433, ORCID: 0000-0002-9006-3667) – Doctor in Chemistry, Professor (tel.: +007 (343) 257 45 25, e-mail: parknedra@yandex.com).

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:
Хазин, М.Л. Исследование коррозионной стойкости образцов композиционных материалов для нефтяного оборудования / М.Л. Хазин, Р.А. Апакашев // Недропользование. – 2025. – Т.25, №2. – С. 115–122. DOI: 10.15593/2712-8008/2025.2.8

Please cite this article in English as:
Khazin M.L., Apakashev R.A. Study of corrosion resistance of composite material samples for oil equipment. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2025, vol.25, no.2, pp. 115-122. DOI: 10.15593/2712-8008/2025.2.8

Введение

Нефтяная промышленность является значимым элементом экономического развития многих стран. Для разведки месторождений нефти и ее последующей переработки задействуется большое количество различного оборудования, в том числе из материалов на металлической основе. Использование таких материалов инструментального и конструкционного назначения сопряжено с проблемой коррозии металлов. Развитие процесса коррозии обусловлено окислительно-восстановительными реакциями, в которых металл в результате взаимодействия с каким-либо веществом из своего окружения превращается в нежелательное соединение и теряет свои первоначальные функциональные свойства. При наличии воздействия агрессивной среды на металлический материал без принятия специальных мер защиты вероятность выхода оборудования из строя из-за коррозии может быть весьма высокой [1–4]. Причем повреждение отдельных компонентов оборудования может привести к его отказу в целом, что нарушит производство и приведет к серьезным экономическим потерям [5, 6].

В результате коррозии в мире теряется около 10 % общего объема производства металла [7], что затрагивает производственные предприятия, транспорт, атомные и военные объекты [3, 8–10]. Важность проблемы коррозии для нефтегазового сектора подтверждает большое количество научных работ, размещенных с 2000 по 2020 г. на поисковых платформах WOS SCIE, SSCI, A & HCI и CPCI-S [9, 11]. На основе проведенных исследований [7, 12] отмечено, что ежегодно экономические потери, связанные с коррозионным повреждением оборудования, в каждой стране варьируются в пределах 2–5 % от их ВВП [3, 8, 10, 12]. Кроме того, до 20–30 % простоев оборудования также происходят по причине коррозии.

Исследование IMPACT показало [3, 12], что путем внедрения методов борьбы с коррозией может быть достигнута значительная экономия – от 15 до 35 % стоимости ущерба, которая эквивалентна уменьшению глобальных затрат на коррозию.

При работе с различными коррозионно-активными веществами требуется надлежащий материал конструкции. Нефтегазовая промышленность традиционно использует сталь по всей цепочке создания стоимости углеводородов, от строительства скважин и буровых установок до наземных трубопроводов и резервуаров для хранения продукции. Тем не менее сталь, являясь универсальным конструкционным материалом, имеет определенные недостатки, среди которых возможность коррозии и значительный вес изготавливаемого из стали оборудования.

В поисках высокотехнологичной и недорогой альтернативы для стали как основного конструкционного материала многие исследователи рассматривают композитные системы [2, 3, 12, 15–17]. В последнее время в этом направлении были предприняты значительные усилия по разработке различных составов металломатричных композитов (ММК). Среди ММК наиболее перспективными конструкционными материалами считаются композиты на основе алюминия из-за их высокой коррозионной стойкости, износостойкости, удельного модуля упругости и низкой плотности. Алюминиевые ММК могут быть изготовлены с помощью многих технологических процессов с использованием различных частиц для армирования, таких как бориды, карбиды, оксиды, нитриды и их комбинаций. Благодаря наличию стабильных армирующих частиц алюминиевые ММК

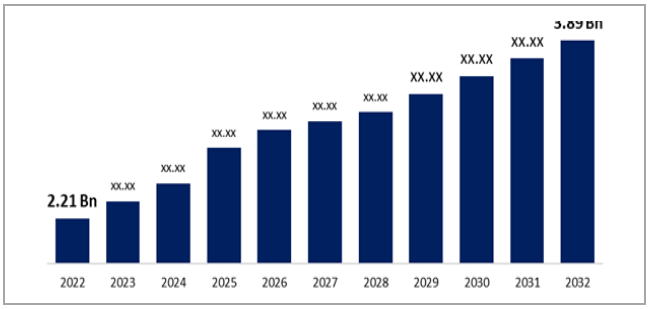


Рис. 1. Мировой рынок композитов в нефтегазовой промышленности [20]

показывают отличные механические и износостойкие характеристики [18, 19].

Применение композитов приводит к уменьшению общего веса конструкции, обеспечивает лучшую коррозионную стойкость, снижает общие эксплуатационные расходы и обеспечивает большую гибкость проектирования. В настоящее время композиты начинают использоваться в нефтегазовой промышленности для производства стояков, сосудов под давлением, резервуаров, бурильных труб и трубопроводных конструкций, настилов и др.

Ожидается, что к 2032 г. объем мирового рынка композитных материалов в нефтегазовой промышленности превысит 3,89 млрд долларов США, а среднегодовой темп роста составит 5,8 % в период с 2022 по 2032 г. [20]. Конкурентоспособные свойства композитных материалов, такие как малый вес, коррозионная стойкость, хорошая механическая прочность, способны поддерживать этот темп роста (рис. 1).

В нефтегазовой промышленности уже применяются композиты с металлической, эпоксидной, фенольной и полимерной матрицей [21–23]. В качестве наполнителей наиболее часто используются стекловолокно, углеродное или арамидное волокно. Значительную долю металломатричных материалов составляют композиты на основе алюминия, армированного графитом [24], огнеупорами [25], карбидами [26, 27] и другими наполнителями [28–30].

Методология проведения исследований

Для изготовления алюмоматричных композитов применяли порошок алюминия ПА-3 чистотой 99 % (ГОСТ 6058 – 73) со средним размером частиц 250–450 мкм. В качестве дисперсного наполнителя использовали порошки карбида хрома (Cr_3C_2) (ГОСТ 28377 – 89) с размером частиц 40–100 мкм и оксида магния (ГОСТ 4526-75) с размером частиц 10–50 мкм.

Навески порошков алюминия, карбида хрома и оксида магния, взятые в заданном соотношении, перемешивали механической мешалкой. Полученную однородную порошковую смесь прессовали холодным способом в пресс-форме из закаленной стали на одноосном прессе ПГР400 при давлении 980 МПа и выдержке в течение 2 мин. В качестве смазки стенок пресс-формы использовали индустриальное масло. Уплотненные образцы спекали в алундовом тигле под слоем угольного порошка при температуре 640 °С в течение 1 ч [31].

Фазовый состав полученного композита исследовали на рентгеновском дифрактометре XRD 7000 (Shimadzu) с приставкой для рентгеноспектрального микроанализа XFlash Detector 630M (Bruker Nano GmbH). Фотографии микроструктуры алюмоматричного композиционного

материала и карты распределения химических элементов получали на электронном сканирующем микроскопе VEGA LMS фирмы TESCAN. Визуальное исследование структуры проводили на оптическом микроскопе Olympus BX61.

Измерения твердости по Виккерсу проводили на твердомере ИТВ-30-АМ под нагрузкой 25 Н с выдержкой 15 с. Согласно ГОСТ 2999-751 измерения проводили в пяти точках вдоль поверхности образцов.

Коррозионные испытания проводили в статических условиях, без принудительной циркуляции коррозионной среды. В качестве испытательной коррозионной среды использовали модельный раствор электролита, содержащий 30 г/л NaCl и добавку 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 %. База испытаний составила 504 ч, температура – +22 °С, объем раствора в ячейке с тремя образцами – 500 мл.

Перед испытанием образцы формы полировали до зеркального блеска, промывали этиловым спиртом и после просушивания взвешивали с точностью ±0,0001 г. Затем по три образца одного состава помещали в одну ячейку, обеспечивая полное погружение в раствор и отсутствие контакта поверхности образцов. Для крепления (подвеса) образцов использовали нить из синтетического материала [32].

После окончания испытаний образцы извлекали из ячейки, промывали теплой дистиллированной водой и этиловым спиртом, просушивали и взвешивали. Дополнительно фиксировали внешний вид образцов и проводили оценку состояния их поверхности.

Обсуждение результатов

Особенностью алюминия и сплавов на его основе являются хорошая обрабатываемость, коррозионная стойкость, малая плотность, высокая теплопроводность. Основным недостатком алюминия является низкая твердость и прочность. Для повышения физико-механических свойств матрицу упрочняют различными наполнителями. Иногда армирование одним функциональным веществом может не дать требуемых свойств для конкретных применений алюмоматричных материалов. В этом случае используют два или более различных армирующих компонентов для создания гибридной композитной системы. Исследования [33] показали, что такие гибридные композитные системы обладают лучшими свойствами, чем обычные композиты. Их преимущества, по сравнению с обычными композитами, состоят в сбалансированной прочности и жесткости, повышенной ударопрочности и прочности на изгиб, высокой и стабильной термической стойкости, меньшей стоимости, лучшей усталостной прочности и повышенной вязкости разрушения, меньшей чувствительности к надрезам и способности препятствовать росту трещин. Поэтому в настоящей работе был рассмотрен вариант моно- и полиармирования алюминиевой матрицы.

Для получения алюмоматричных композитов использовали метод порошковой металлургии, позволяющий синтезировать композиционный материал с равномерным распределением частиц наполнителя в объеме металлической матрицы. Применение порошка алюминия с высоким содержанием чистого металла позволило нивелировать влияние примесей на формирование структуры, свойств и межфазных связей

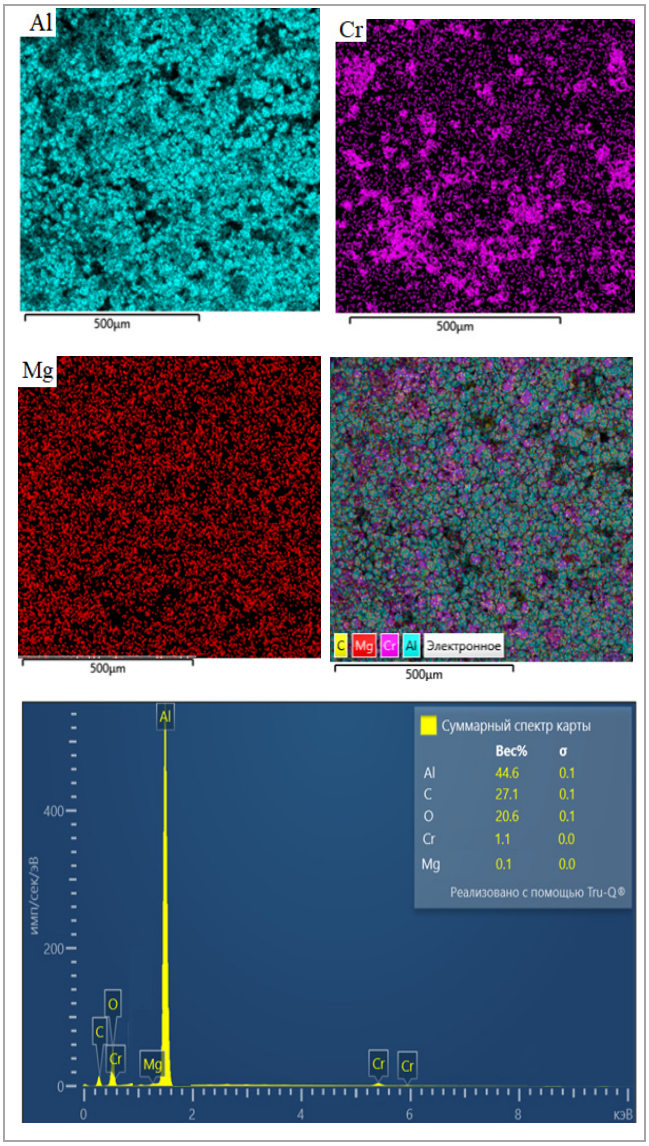


Рис. 2. Карты распределения элементов поверхности исходного образца состава Al + 5 % Cr_3C_2 + 10 % Mg

между армирующими частицами и основой. Морфология поверхности полученных образцов и распределение элементов показаны на рис. 2. Во всех случаях наблюдается ровная и относительно гладкая поверхность. Согласно полученным картам распределение элементов по объему образцов достаточно равномерное.

Плотность и пористость материала являются одними из основных параметров, учитываемых при его применении. Плотность образцов определяли методом гидростатического взвешивания. С повышением доли наполнителя (карбида хрома) плотность и пористость образцов увеличивались. В гибридных композитах увеличение доли Mg от 5 до 10 % (при содержании карбида хрома в количестве 5 %) привело к уменьшению плотности образцов и повышению пористости (рис. 3). В то же время перемешивание и деформационное упрочнение приводят к появлению электрохимических неоднородностей, обусловливающих появление локальной коррозии. Вследствие этого в сплавах алюминия существует некоторый компромисс между механическими и коррозионными свойствами.

Коррозионная стойкость литых алюминиевых сплавов исследовалась во многих работах, например, [34–36]. С точки зрения кинетики коррозионных процессов алюминиевые сплавы являются

короткозамкнутой системой многоэлектродных элементов [37]. Наличие дисперсной фазы приводит к наличию на поверхности сплава зон с различными потенциалами. В зонах поверхности, достигших потенциала пробоя и имеющих повышенную адсорбционную активность и электропроводность, адсорбируются активные ионы. В результате образуется комплекс «металл – анион», который переходит в раствор и вытесняет кислород. Поскольку растворимость многих легирующих элементов в алюминии достаточно ограничена, то образование вторичных фаз приводит к локальной коррозии, что неизбежно при использовании традиционных методов обработки [31, 32].

Коррозионная стойкость характеризует способность металла или сплава сопротивляться коррозионному воздействию среды и может быть определена по массовому или скоростному показателям. Массовый показатель коррозии определяли по убыли массы, а затем пересчитывали в линейную скорость коррозии (ГОСТ 9.908-85). Скорость убыли массы (V_k), определяли по отношению:

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

где m_1, m_2 – масса образца до и после коррозии соответственно, г; t – время коррозионного разрушения, ч; S – площадь поверхности образца, м^2.

Массовые потери при коррозии затем пересчитывали в скорость коррозии, выраженную в мм/год:

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

где П – скорость коррозии, мм/год; 8,76 – коэффициент; V_k – скорость коррозии, г/(м^2·ч); ρ – плотность металла, г/см^3.

В результате проведенных исследований установлено, что для всех исследованных образцов наблюдается сплошная равномерная коррозия.

На основании величины П провели оценку коррозионной стойкости металлов по десятибалльной шкале (ГОСТ 9.908-85). В соответствии с данной шкалой в условиях проведенного эксперимента образцы Al-Cr_3C_2 обладают коррозионной стойкостью – 6 баллов (таблица).

Хорошо известно, что пассивирующие свойства пленки оксида алюминия значительно улучшают коррозионную стойкость алюминиевых сплавов в нормальных условиях. Хотя оксидная пленка алюминия относительно стабильна, оксид алюминия разрушается в агрессивной среде, богатой ионами, вызывая точечную коррозию. Добавление других элементов к чистому алюминию улучшает его механические свойства, но снижает коррозионную стойкость из-за неоднородности структуры. Например, когда магний добавляется к алюминию, атомы Mg диффундируют к границе зерен, образуя вторичную фазу, называемую фазой β-(Al_3Mg_2) [38, 39]. Это прямая причина межкристаллитной коррозии, которая

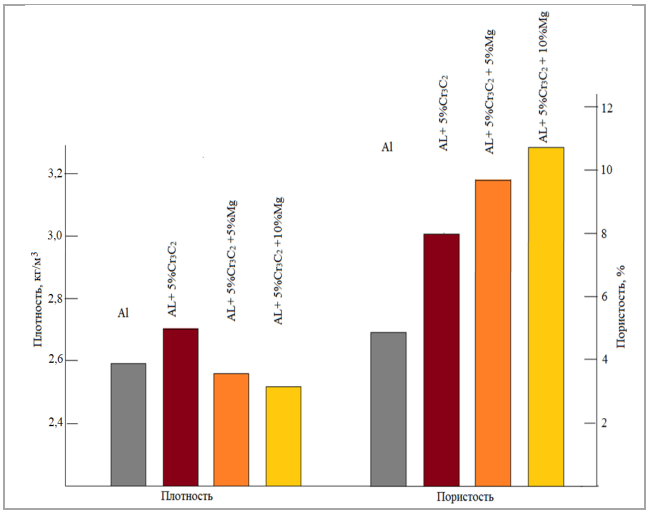


Рис. 3. Изменение плотности и пористости образцов в зависимости от состава

Коррозионная стойкость образцов композитов

Материал	Время испытаний, ч	m_0, г	Δm, г	V_k, г/(м^2·час)	П мм/год	Балл по ГОСТ 9.908-85
Al + 0 % Cr_3C_2	192	1,4042	0,0108	0,1377	0,4646	6
Al + 4 % Cr_3C_2		1,4151	0,0101	0,1288	0,4224	6
Al + 7 % Cr_3C_2		1,4451	0,0087	0,1110	0,3500	6
Al + 10 % Cr_3C_2		1,4502	0,0041	0,0523	0,1591	6
Al + 5 % Cr_3C_2 + 5 % Mg		1,4551	0,0089	0,1135	0,1246	6
Al + 5 % Cr_3C_2 + 10 % Mg		1,3802	0,0083	0,1058	0,3657	6
Al + 0 % Cr_3C_2	336	1,4042	32,5	0,2369	0,7994	7
Al + 4 % Cr_3C_2		1,4151	22,5	0,1640	0,5378	7
Al + 7 % Cr_3C_2		1,4451	15,9	0,1359	0,4285	6
Al + 10 % Cr_3C_2		1,4502	13,7	0,0998	0,3037	6
Al + 5 % Cr_3C_2 + 5 % Mg		1,4551	49,5	0,3608	1,2113	8
Al + 5 % Cr_3C_2 + 10 % Mg		1,3802	84,6	0,6167	2,0698	8
Al + 0 % Cr_3C_2	504	1,4042	0,0485	0,2375	0,8014	7
Al + 4 % Cr_3C_2		1,4151	0,0447	0,2189	0,7114	7
Al + 7 % Cr_3C_2		1,4451	0,0443	0,2169	0,6839	7
Al + 10 % Cr_3C_2		1,4502	0,0266	0,1303	0,3964	6
Al + 5 % Cr_3C_2 + 5 % Mg		1,4551	0,0849	0,4157	1,3512	7
Al + 5 % Cr_3C_2 + 10 % Mg		1,3802	0,1395	0,6831	2,3612	7

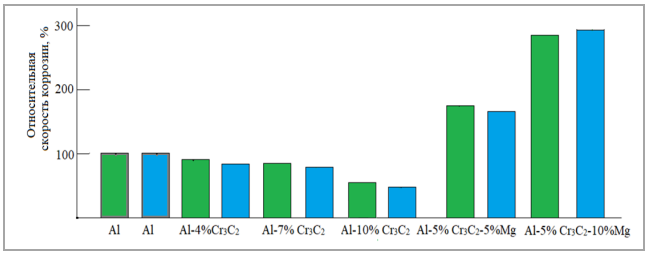


Рис. 4. Относительная скорость коррозии образцов на базе испытаний 504 ч: ■ V_k, г/(м^2·ч); ■ П, мм/год

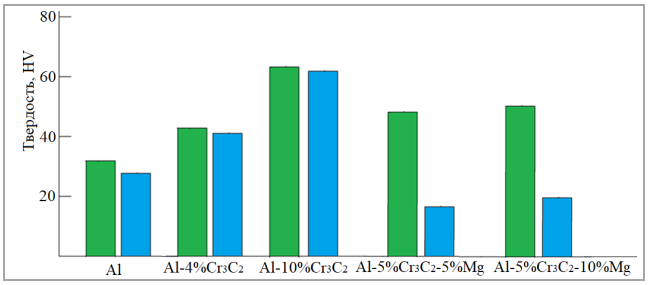


Рис. 5. Твердость образцов до ■ и после ■ испытания на коррозионную стойкость

приводит к коррозионному растрескиванию. Коррозионная точечная коррозия предотвращается добавлением небольших количеств металлов из-за образования вторичной фазы, которая создает разность потенциалов с алюминиевой матрицей. Однако коррозионная стойкость имеет тенденцию к снижению, когда содержание вторичной фазы превышает определенное количество. Это видно при сравнении скорости коррозии образцов Al + 4 % Cr_3C_2, Al + 5 % Cr_3C_2 + 5 % Mg и Al + 5 % Cr_3C_2 + 10 % Mg. Повышение содержания магния от 5 до 10 % увеличило скорость коррозии от 0,2189 до 0,4157 и далее до 0,6831 г/(м^2·ч), понижая коррозионную стойкость материала (рис. 4). Поэтому для получения высоко коррозионностойких алюминиевых сплавов важно подобрать оптимальное содержание дополнительных металлов.

В процессе коррозии также изменяются и механические свойства материалов. После испытаний на коррозионную стойкость твердость всех образцов уменьшилась (рис. 5).

Проблемы с коррозией, которые могут возникнуть в алюмоматричных композиционных материалах, можно классифицировать следующим образом:

– гальваническая связь между армирующей фазой и матрица;

– селективная коррозия межфазной границы матрица/наполнитель;

– коррозия дефектов матрицы в композите.

При обработке композитов может возникнуть реакция между частицами наполнителя и матрицей с образованием новой фазы. Если окислительно-восстановительный потенциал этой фазы заметно отличается от соответствующего потенциала матрицы, композит может подвергаться избирательной коррозии в области контакта новой фазы и матрицы.

Коррозия алюминиевых сплавов по сути является микрогальваническим процессом между этими фазами и матричными сплавами [40]. Коррозия происходит быстро только тогда, когда пассивная пленка разрушается, и на это в основном влияют pH и концентрация ионов Cl^-. Когда это происходит, коррозия с выделением водорода протекает относительно легко. Питтинговая коррозия в присутствии агрессивного хлорида железа локализована. Ямки инициируются

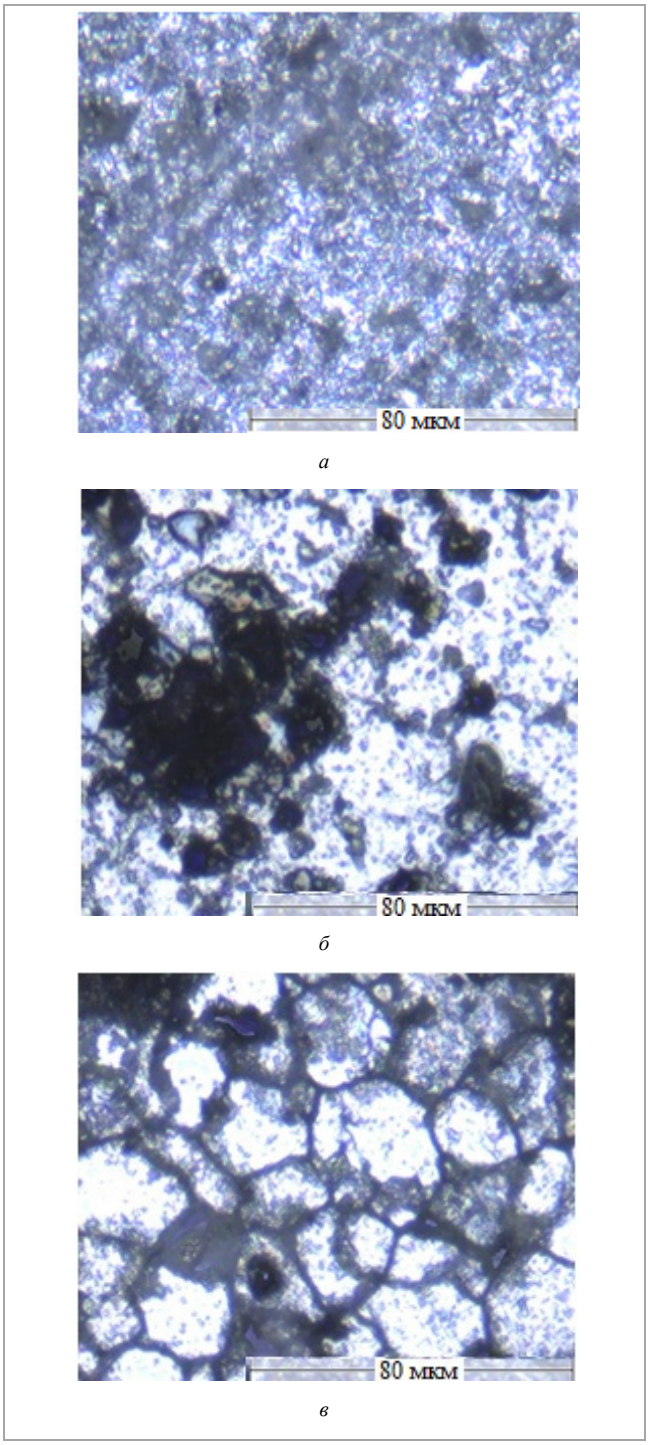


Рис. 6. Морфология поверхности образцов после испытаний на коррозию в течении 504 ч: *а* – Al; *б* – Al + 10 % Cr_3C_2; *в* – Al + 5 % Cr_3C_2 – 10 % Mg

в слабых местах в оксидной пленке при хлоридной атаке. Инициирование ямок включает абсорбцию ионов Cl^- на дефектах в поверхностной оксидной пленке с последующей химической реакцией. Присутствие ионов Cl^- препятствует репассивации. При развитии питтинга основную роль играют неоднородности в сплаве или композите.

В нашем случае все образцы показывают (рис. 6), что их поверхность не имеет каких-либо признаков возникновения питтинговой коррозии. Для всех исследованных образцов наблюдается сплошная равномерная коррозия, и во всех случаях характерно равномерное распределение коррозионного поражения металлической поверхности.

Наблюдалось образование тонкого слоя продуктов коррозии на основе алюминия (оксиды или оксигидроксиды). Наличие хлора может быть связано как с ионами NaCl, так и с ионами Cl^-, адсорбированными на пассивной пленке. На микрофотографиях (см. рис. 6) видны твердые частицы внутри ямок, где продукт растворения $AlCl_x$ привел к образованию твердой соли; это согласуется с результатами предыдущих исследований [40–43], и соляная пленка могла стабилизировать некоторые ямки.

О формировании защитного слоя оксида алюминия сообщалось во многих исследовательских работах, например, [42, 44], а присутствие Al и Cl^- может быть связано с $AlCl_3$, образующимся при взаимодействии пленки $Al(OH)_3$ с ионами Cl^-, которое происходит после пробоя пассивного состояния Al в солевой среде.

Добавление в состав композиционного материала магния увеличило скорость коррозии. Алюминий продемонстрировал процесс псевдопассивации, но с другой стороны, сплавы Al-Mg подверглись коррозии без образования защитных составов на границе раздела. Поэтому такие элементы, как Zn, Mg и Hg, добавляют к чистому алюминию для катодной защиты. Введение в состав композита магния привело к его растворению в коррозионной среде.

Можно сделать вывод, что добавки карбидов хрома в сплавы на основе алюминия повышают коррозионную стойкость сплавов, тогда как введение в состав композита магния не улучшает коррозионную стойкость сплавов.

Проведенные исследования литых сплавов АМг6, Д16-Т и стали 08Х17 в морской воде показали малую потерю массы, 100%-ное коррозионное поражение поверхности, но отсутствие межкристаллитной коррозии [45]. Испытания отливок алюминиевых сплавов в основных солевых и кислых средах показало их низкую коррозионную стойкость. В сплавах Al-Mg наблюдалась точечная, равномерная, усталостная и межкристаллитная коррозия [46, 47].

Заключение

Необходимость защиты оборудования нефтедобывающих и перерабатывающих предприятий от коррозионных повреждений связана с существенными материальными затратами. Таким образом, для технологического обеспечения процессов добычи как нефти, так и природного газа требуется разработка современных материалов, способных к продолжительной эксплуатации в агрессивной среде. В связи с повышением потребности в материалах с улучшенными физико-механическими и физико-химическими свойствами применение композиционных материалов в нефтегазовой отрасли является перспективным.

Новые алюминиевые матричные композиты, армированные частицами карбида хрома, успешно производятся методом порошковой металлургии. Микроструктура полученных композитов является однородной, с низким содержанием пористости, малодефектности с равномерным распределением армирующей фазы в алюминиевой матрице. На границе раздела не образовывалось вторичных интерметаллидных фаз, матрица и армирование показали хорошее сцепление без каких-либо признаков реактивности. Коррозионное поведение полученных композитов, по-видимому, в основном контролируются коррозией матрицы. Введение карбида хрома в алюминиевую матрицу позволяет повысить твердость и коррозионную стойкость материала, тогда как дополнительное легирование магнием понижает коррозионную стойкость материала. Изготовление деталей из доступных алюмоматричных материалов позволяет повысить срок службы оборудования без применения дорогих и дефицитных металлов.

Библиографический список

1. Болотова, Ю.В. Коррозия теплообменного оборудования нефтехимических производств / Ю.В. Болотова, О.И. Ручкинова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. – 2015. – Т. 17, № 4. – С. 102–119. DOI: 10.15593/2224-9877/2015.4.08
2. Поварова, Л.В. Анализ современных методов защиты нефтепромыслового оборудования от коррозии / Л.В. Поварова, В.С. Мунтян, А.С. Скиба // 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. Kulkarni, S.J. An Insight into Studies and Research on Corrosion in Petroleum Industries and Refineries / S.J. Kulkarni // International Journal of Petroleum and Petrochemical Engineering (IJPPE). – 2016. – Vol. 2, no. 2. – P. 1–3. DOI: 10.20431/2454-7980.0202001
5. Vakili, M. Addressing Hydrogen Sulfide Corrosion in Oil and Gas Industries: A Sustainable Perspective / M. Vakili, P. Koutník, J. Kohout // Sustainability. – 2024. – Vol. 16, no. 4. – P. 1661. DOI: 10.3390/su16041661
6. Key parameters affecting sweet and sour corrosion: Impact on corrosion risk assessment and inhibition / I.B. Obot, A.A. Sorour, C. Verma, T.A. Al-Khaldi, A.S. Rushaid // Eng. Fail. Anal. – 2023. – Vol. 145. – P. 107008. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2022.107008
7. Economic Impact of Corrosion in Oil Sectors and Prevention: An Overview / J. Akpan, O.S.I. Fayomi, I.G. Akande, S. Odigie // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – No. 1378. – P. 022037. DOI: 10.1088/1742-6596/1378/2/022037
8. Solovyeva, V.A. Current Downhole Corrosion Control Solutions and Trends in the Oil and Gas Industry: A Review / V.A. Solovyeva, K.H. Almuhammadi, W.O. Badeghaish // Materials. – 2023. – Vol. 16, no. 5. – P. 1795. DOI: 10.3390/ma16051795
9. 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
10. Corrosive Environment Assessment and Corrosion-Induced Rockbolt Failure Analysis in a Costal Underground Mine / Q. Guo, J. Pan, M. Wang, M. Cai, X. Xi1 // International Journal of Corrosion. – 2021. – Vol. 2019. – P. 9. DOI: 10.1155/2019/2105842
11. Анализ трендов перспективных материалов для нефтегазовой отрасли. PRONEFTЬ / В.В. Жуков, А.А. Карпов, И.А. Карпов, Е.М. Кокцинская, Р.Р. Хусаинов // Профессионально о нефти. – 2022. – Т. 7, № 3. – С. 136–147. DOI: 10.51890/2587-7399-2022-7-3-136-147
12. Al-Moubaraki, A.H. Corrosion challenges in petroleum refinery operations: Sources, mechanisms, mitigation, and future outlook / A.H. Al-Moubaraki, I.B. Obot // Journal of Saudi Chemical Society. – 2021. – Vol. 25, no. 12. – P. 101370. DOI: 10.1016/J.JSCS.2021.101370
13. Kadhim, M.G. A Critical Review on Corrosion and its Prevention in the Oilfield Equipment / M.G. Kadhim, M.T. Ali // Journal of Petroleum Research and Studies. – 2021. – Vol. 7, no. 2. – P. 162–189. DOI: 10.52716/JPRS.V7I2.195
14. Выбойщик, М.А. Научные основы разработки и методология создания сталей для производства нефтепромысловых труб повышенной прочности и коррозионной стойкости / М.А. Выбойщик, А.В. Иоффе // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2019. – № 1 (47). – С. 13–20. DOI: 10.18323/2073-5073-2019-1-13-20
15. Fayomi, O.S.I. Economic Impact of Corrosion in Oil Sectors and Prevention: An Overview / O.S.I. Fayomi, I.G. Akande, S. Odigie // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1378. – P. 022037. DOI: 10.1088/1742-6596/1378/2/022037
16. Downhole corrosion inhibitors for oil and gas production - a review / M. Askari, M. Aliofkhazraei, R. Jafari, P. Hamghalam, A. Hajizadeh // Applied Surface Science Advances. – 2021. – Vol. 6. – P. 100128. DOI: 10.1016/j.apsadv.2021.100128
17. Бикмухаметов М.В. Композиционные материалы как двигатель прогресса / М.В. Бикмухаметов, Д.С. Житников // Интернаука. – 2020. – № 45–2 (174). – С. 19–20.
18. Recent progress in aluminum metal matrix composites: A review on processing, mechanical and wear properties / P. Samal, P.R. Vundavilli, A. Meher, M.M. Mahapatra // Journal of Manufacturing Processes. – 2020. – Vol. 59. – P. 131–152. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.09.010
19. Akinwamide, S.O. Microstructural evolution, mechanical and nanoindentation studies of stir cast binary and ternary aluminium based composites / S.O. Akinwamide, O.J. Akinribide, P.A. Olubambi // J. Alloys Compd. – 2021. – Vol. 850. – P. 156586. DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.156586

20. Глобальный рынок композитов в нефтегазовой отрасли идентификатор отчета SI2411 [Электронный ресурс]. – 2023. – 200 с. – URL: https: //www.sphericalinsights.com/reports/composites-in-oil-gas-industry-market/ (07.09.2024).
21. Abdulrahman, J. Biopolymer Composite Materials in Oil and Gas Sector / J. Abdulrahman, W.S. Ebhota, P.Y. Tabakov // International Journal of Polymer Science. – 2024. - Vol. 2024, art. ID 8584879. – P. 18. DOI: 10.1155/2024/8584879
22. 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.
23. Ненахов, А.И. Возможности применения композитных материалов в области энергетики для нефтепроводов и продуктопроводов / А.И. Ненахов, Е.В. Сергеенкова // Энергетическая политика. – 2022. – № 10 (176). – С. 54–65. DOI: 10.46920/2409-5516.2022_10176.54
24. 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
25. 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
26. 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
27. Карпухин, С.Д. Комплекс свойств композиционных материалов, применяемых в нефтегазовой промышленности / С.Д. Карпухин, О.И. Манаев, С.А. Пахомова // Булатовские чтения. – 2020. – Т. 6. – С. 124–129.
28. Nanjan, S. Analysing the Mechanical Properties and Corrosion Phenomenon of Reinforced Metal Matrix Composite / S. Nanjan, J.G. Murali // Mat. Res. – 2020. – Vol. 23, no. 2. – P. e20190681. DOI: 10.1590/1980-5373-MR-2019-0681
29. Kar, A. A Critical Review on Recent Advancements in Aluminium-Based Metal Matrix Composites / A. Kar, A. Sharma, S. Kumar // Crystals. – 2024. – No. 14. – P. 412. DOI: 10.3390/cryst14050412
30. Tensile Properties of Aluminum Matrix Composites Produced via a Nitrogen-Induced Self-Forming Process / K.-B. Lee, K.C. Nayak, C.-H. Shim, H.-I. Lee, S.-H. Kim, H.-J. Choi, J.-P. Ahn // J. Compos. Sci. – 2023. – No. 7. – P. 457. DOI: 10.3390/jcs7110457
31. Хазин, М.Л. Новые материалы для деталей горных машин / М.Л. Хазин, Р.А. Апакашев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 12–1. – С. 149–163. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_121_0_149
32. Апакашев, Р.А. Влияние параметров структуры материала на коррозионную стойкость нефтегазопромыслового оборудования / Р.А. Апакашев, М.Л. Хазин // Недропользование. – 2023. – Т. 23, № 3. – С.133–140. DOI: 10.15593/2712-8008/2023.3.4
33. Akinwamide, S.O. Microstructural evolution, mechanical and nanoindentation studies of stir cast binary and ternary aluminium based composites / S.O. Akinwamide, O.J. Akinribide, P.A. Olubambi // J. Alloys Compd. – 2021. – Vol. 850. – P. 156586. DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.156586
34. Berlanga-Labari, C. Corrosion of Cast Aluminum Alloys: A Review / C. Berlanga-Labari, M.V. Biezma-Moraleda, P.J. Rivero // Metals. – 2020. – Vol. 10, no. 10. – P. 1384. DOI: 10.3390/met10101384C
35. 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
36. 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
37. Синявский, В.С. Коррозия и защита алюминиевых сплавов / В.С. Синявский, В.Д. Вальков, В.Д. Калинин. – М.: Металлургия, 1979. – 224 с.
38. Controlled optimization of Mg and Zn in Al alloys for improved corrosion resistance via uniform corrosion / J. Lim, G. Jeong, K. Seo [et al.] // Mater. Adv. – 2022. – Vol. 3. – P. 4813–4823. DOI: 10.1039/D1MA01220G
39. Corrosion behavior and mechanism of Al–Zn–Mg–Cu alloy based on the characterization of the secondary phases / L. Jiang, Z. Zhang, H. Fu, S. Huang, D. Zhuang, J. Xie // Materials Characterization. – 2022. – Vol. 189. – P. 111974. DOI: 10.1016/j.matchar.2022.111974
40. 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. 1300–1312. DOI: 10.3390/app11031300
41. Corrosion Properties in Sodium Chloride Solutions of Al–TiC Composites in situ Synthesized by HFIHF / E-S.M. Sherif, H.S. Abdo, K.A. Khalil, A.M. Nabawy // Metals. – 2015. – Vol. 5. – P. 1799–1811. DOI: 10.3390/met5041799
42. Corrosion Behavior of Al Modified with Zn in Chloride Solution / J.P. Calderón, J.L.R. Barragán, J.I.B. Fierro [et al.] // Materials (Basel). – 2022. – Vol. 15, no. 12. – P. 4229–4248. DOI: 10.3390/ma15124229
43. Kaewmaneekul, T. Effect of aluminium on the passivation of zinc–aluminium alloys in artificial seawater at 80 °C / T. Kaewmaneekul, G. Lothongkum // Corros. Sci. – 2013. – Vol. 66. – P. 67–77. DOI: 10.1016/j.corsci.2012.09.004
44. El-Hadad, S. Effects of Alloying with Sn and Mg on the Microstructure and Electrochemical Behavior of Cast Aluminum Sacrificial Anodes / S. El-Hadad, M.E. Moussa, M. Waly // Inter Metalcast. – 2021. – Vol. 15. – P. 548–565. DOI: 10.1007/s40962-020-00483-6
45. Corrosion characterization of Cu-based alloy in different environment / R. Soenoko, P.H. Setyarini, S. Hidayatullah, M.S. Ma'arif, F. Gapsari // Metalurgija. – 2020. – Vol. 59, no. 3. – P. 373–376.
46. 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
47. 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

References

1. 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. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2015, vol. 17, no. 4, pp. 102-119. DOI: 10.15593/2224-9877/2015.4.08
2. 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.
3. Abdalsamed I.A. Amar, I.A., Altohami F.A., Salih F.A., Mazek 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
4. Kulkarn S.J. An Insight into Studies and Research on Corrosion in Petroleum Industries and Refineries. *International Journal of Petroleum and Petrochemical Engineering (IJPPE)*, 2016, vol. 2, no. 2, pp. 1-3. DOI: 10.20431/2454-7980.0202001
5. Vakili M., Koutník P., Kohout J. Addressing Hydrogen Sulfide Corrosion in Oil and Gas Industries: A Sustainable Perspective. *Sustainability*, 2024, vol. 16, no. 4, 1661 p. DOI: 10.3390/su16041661
6. Obot I.B., Sorour A.A., Verma C., Al-Khaldi T.A., Rushaid A.S. Key parameters affecting sweet and sour corrosion: Impact on corrosion risk assessment and inhibition. *Eng. Fail. Anal.*, 2023, vol. 145, 107008 p. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2022.107008
7. Akpan J., 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, no. 1378, 022037 p. DOI: 10.1088/1742-6596/1378/2/022037
8. Solovyeva V.A., Almuhammadi 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
9. 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
10. Guo Q., Pan J., Wang M., Cai M., Xi1 X. Corrosive Environment Assessment and Corrosion-Induced Rockbolt Failure Analysis in a Costal Underground Mine. *International Journal of Corrosion*, 2021, vol. 2019, 9 p. DOI: 10.1155/2019/2105842
11. Zhukov V.V., Karpov A.A., Karpov I.A., Koktsinskaia E.M., Khusainov R.R. Analiz trendov perspektivnykh materialov dlia neftegazovoi otrasli. PRONEFT" [Analysis of perspective materials trends for the oil and gas industry]. *Professional'no o nefti*, 2022, vol. 7, no. 3, pp. 136-147. DOI: 10.51890/2587-7399-2022-7-3-136-147
12. 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
13. 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
14. Vyboishchik M.A., Ioffe A.V. Nauchnye osnovy razrabotki i metodologiia sozdaniia stalei 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
15. 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
16. Askari M., Aliofkhazraei 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
17. Bikmukhametov M.V., D.S. Zhitnikov Kompozitsionnye materialy kak dvigatel' progressa [Composite materials as an engine of progress]. *Internauka*, 2020, no. 45-2 (174), pp. 19-20.

18. Samal P., Vundavilli P.R., Meher A., Mahapatra M.M. Recent progress in aluminum metal matrix composites: A review on processing, mechanical and wear properties. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, vol. 59, pp. 131-152. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.09.010
19. Akinwamide S.O., Akinribide O.J., Olubambi P.A. Microstructural evolution, mechanical and nanoindentation studies of stir cast binary and ternary aluminium based composites. *J. Alloys Compd.*, 2021, vol. 850, 156586 p. DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.156586
20. Global'nyi rynok kompozitov v neftegazovoi otrasli identifikator otcheta SI2411 [Global Composites Market in Oil and Gas Industry Report ID SI2411], 2023, 200 p., available at: https://www.sphericalinsights.com/reports/composites-in-oil-gas-industry-market/ (accessed 07 September 2024).
21. Abdulrahman J., Ebhota W.S., Tabakov P.Y. Biopolymer Composite Materials in Oil and Gas Sector. *International Journal of Polymer Science*, 2024, vol. 2024, art. ID 8584879, 18 p. DOI: 10.1155/2024/8584879
22. 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.
23. Nenakhov 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]. *Energeticheskaia politika*, 2022, no. 10 (176), pp. 54-65. DOI: 10.46920/2409-5516.2022_10176.54
24. 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
25. 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
26. 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
27. Karpukhin S.D., Manaev O.I., Pakhomova S.A. Kompleks svoistv kompozitsionnykh materialov, primeniaemykh v neftegazovoi promyshlennosti [Complex of composite materials properties used in the oil and gas industry]. *Bulatovskie chteniia*, 2020, vol. 6, pp. 124-129.
28. Nanjan S., Murali J.G. Analysing the Mechanical Properties and Corrosion Phenomenon of Reinforced Metal Matrix Composite. *Mat. Res.*, 2020, vol. 23, no. 2, e20190681 p. DOI: 10.1590/1980-5373-MR-2019-0681
29. Kar A., Sharma A., Kumar S. A Critical Review on Recent Advancements in Aluminium-Based Metal Matrix Composites. *Crystals*, 2024, no. 14, 412 p. DOI: 10.3390/cryst14050412
30. Lee K.-B., Nayak K.C., Shim C.-H., Lee H.-I., Kim S.-H., Choi H.-J., Ahn J.-P. Tensile Properties of Aluminum Matrix Composites Produced via a Nitrogen-Induced Self-Forming Process. *J. Compos. Sci.*, 2023, no. 7, 457 p. DOI: 10.3390/jcs7110457
31. Khazin M.L., Apakashev R.A. Novye materialy dlia detalei gornykh mashin [New materials in mining engineering]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten'*, 2023, no. 12-1, pp. 149-163. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_121_0_149
32. Apakashev R.A., Khazin M.L. Vliianie parametrov struktury materiala na korrozionnuiu stoikost' neftegazopromyslovogo oborudovaniia [Material Structure Parameters Influence on Oil and Gas Field Equipment Corrosion Resistance]. *Nedropol'zovanie*, 2023, vol. 23, no. 3, pp. 133-140. DOI: 10.15593/2712-8008/2023.3.4
33. Akinwamide S.O., Akinribide O.J., Olubambi P.A. Microstructural evolution, mechanical and nanoindentation studies of stir cast binary and ternary aluminium based composites. *J. Alloys Compd.*, 2021, vol. 850, 156586 p. DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.156586
34. 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
35. 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
36. 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
37. Siniavskii V.S., Val'kov V.D., Kalinin V.D. Korroziia i zashchita aliuminievykh splavov [Corrosion and protection of aluminum alloys]. Moscow: Metallurgiia, 1979, 224 p.
38. Lim J., Jeong G., Seo K. et al. Controlled optimization of Mg and Zn in Al alloys for improved corrosion resistance via uniform corrosion. *Mater. Adv.*, 2022, vol. 3, pp. 4813-4823. DOI: 10.1039/D1MA01220G
39. Jiang L., Zhang Z., Fu H., Huang S., Zhuang D., Xie J. Corrosion behavior and mechanism of Al-Zn-Mg-Cu alloy based on the characterization of the secondary phases. *Materials Characterization*, 2022, vol. 189, 111974 p. DOI: 10.1016/j.matchar.2022.111974
40. 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, pp. 1300-1312. DOI: 10.3390/app11031300
41. Sherif E-S.M., Abdo H.S., Khalil K.A., Nabawy A.M. Corrosion Properties in Sodium Chloride Solutions of Al-TiC Composites in situ Synthesized by HFIHF. *Metals*, 2015, vol. 5, pp. 1799-1811. DOI: 10.3390/met5041799
42. Calderón J.P., Barragán J.L.R., Fierro J.I.B. et al. Corrosion Behavior of Al Modified with Zn in Chloride Solution. *Materials (Basel)*, 2022, vol. 15, no. 12, pp. 4229-4248. DOI: 10.3390/ma15124229
43. Kaewmaneekul T., Lothongkum G. Effect of aluminium on the passivation of zinc–aluminium alloys in artificial seawater at 80 °C. *Corros. Sci.*, 2013, vol. 66, pp. 67-77. DOI: 10.1016/j.corsci.2012.09.004
44. El-Hadad S., Moussa M.E., Waly M. Effects of Alloying with Sn and Mg on the Microstructure and Electrochemical Behavior of Cast Aluminum Sacrificial Anodes. *Inter Metalcast*, 2021, vol. 15, pp. 548-565. DOI: 10.1007/s40962-020-00483-6
45. 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.
46. 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
47. 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

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.
Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Вклад авторов равноценен.