

ПРОЧНОСТЬ И ПЛАСТИЧНОСТЬ

УДК 669.71'782:620.193

КОРРОЗИОННЫЙ ИЗНОС КОМПОЗИТОВ С МАТРИЦЕЙ ИЗ СПЛАВА Al–Si, УПРОЧНЕННЫХ ОКСИДОМ АЛЮМИНИЯ

© 2020 г. Д. Сабер^{a, b, *}, Х. Абд Эль-Азиз^{a, b}, Р. Абдель-Карим^c, А. А. Кандель^d

^aФакультет материаловедения, Загазигский университет, Загазиг, 44519 Египет

^bМашиностроительный факультет, Таифский университет, Таиф, 21974-888 Саудовская Аравия

^cНефтяной и металлургический факультет, Каирский университет, Каир, 12613 Египет

^dНефтяной и металлургический факультет, Университет Аль-Азхар, Каир, 11751 Египет

*e-mail: daliasaber13@yahoo.com

Поступила в редакцию 14.02.2019 г.

После доработки 20.03.2019 г.

Принята к публикации 22.07.2019 г.

Исследовано поведение при коррозионном износе композитов с матрицей из сплава Al–Si, упрочненных частицами Al₂O₃. Композиты с содержанием 0, 10, 15, 20 и 25 вес. % Al₂O₃ изготавливали литьем с перемешиванием. Испытание на коррозионный износ выполняли в электролите 3.5% NaCl при скоростях скольжения 10 и 15 см/с на установке для таких испытаний. Микроструктуру Al–Si матричного сплава и композитов исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа и энергодисперсионного рентгеновского анализа. Был сделан вывод, что коррозионная стойкость композитов с матрицей Al–Si в условиях коррозионного износа повышается при увеличении весовой доли Al₂O₃ и снижается при увеличении скорости скольжения. Испытания на коррозионный износ показали, что коррозионный потенциал смещается в сторону отрицательных значений по сравнению с результатами, полученными в стоячих условиях.

Ключевые слова: коррозия, коррозионный износ, сплав Al–Si, металломатричный композит, частицы Al₂O₃

DOI: 10.31857/S0015323019120143

1. ВВЕДЕНИЕ

Композиты с металлической матрицей (ММК) обладают высокой удельной прочностью и жесткостью и хорошей износостойкостью, что обусловило их широкое применение в аэрокосмической и автомобильной промышленности и биомедицинской технике. Различные упрочняющие частицы, такие как алюминиды, карбиды, нитриды, оксиды и бориды, внедрялись в ММК на основе Al различными методами [1–5]. Оксид алюминия (Al₂O₃), представляющий собой огнеупорную керамику и обладающий исключительными свойствами, был исследован на предмет применения в высокотемпературных конструкциях по причине его высокой прочности и низкого коэффициента теплового расширения [4]. Одним из способов изготовления дисперсно-упрочненных ММК является литье с перемешиванием (stir-casting). Преимуществами этого метода являются: легкий контроль структуры матрицы, технологическая простота, низкая стоимость и получение изделия, с формой, близкой к заданной [6].

Основной трудностью при использовании этого метода является несмачиваемость керамики, поэтому для получения прочной связи между матрицей и армирующей компонентой должна быть

достигнута хорошая смачиваемость. Например, Al₂O₃ является наиболее распространенной и широко используемой в ММК керамикой, перспективной для упрочнения композитов на основе алюминия, но смачиваемость Al₂O₃ расплавленным алюминием обычно очень плохая [7]. Для улучшения смачивания применялись различные способы, такие как, нанесение металлического покрытия на керамические частицы, термообработка частиц и добавление активных частиц, например, Mg [8].

Износ ММК при скольжении важен везде, где есть относительное движение, которое может быть преднамеренным, например, при перемещении поршня двигателя внутреннего сгорания или тормозного диска автомобильного двигателя. Опубликованные результаты по износу композитов, упрочненных Al₂O₃, различаются между собой и часто противоречивы [9]. С одной стороны, использование методов порошковой металлургии при изготовлении композита на основе Al–10% Zn, упрочненного оксидом алюминия, позволило получить повышение стойкости к износу на два порядка при оптимальном содержании Al₂O₃, составляющем 30 вес. %. Кроме того, степень износа композита A356 с 10 вес. % Al₂O₃ почти

в два раза ниже по сравнению с матричным сплавом. Напротив, стойкость к износу медного сплава, упрочненного Al_2O_3 , снизилась при увеличении содержания частиц [10]. Хотя износостойкость и коррозионные характеристики конструкционных материалов широко исследованы, количество литературных данных по коррозионному износу относительно невелико [11]. Взаимосвязь износа и коррозии важна в таких технических применениях, когда на износ металлических деталей дополнительно влияет коррозия, например, насосы для химреагентов, поршневые кольца, стенки цилиндра, механические уплотнения и компоненты морских конструкций. В большинстве случаев степень износа в растворе больше, чем при сухом износе. Из-за совместного механического и электрохимического воздействия потери объема, вследствие взаимоусиливающего влияния абразивной коррозии, часто превышают сумму отдельных потерь при абразивном и коррозионном износе [11–13].

В настоящей статье исследуется коррозионный износ композитов с матрицей из сплава Al–Si, армированных частицами Al_2O_3 , при их содержании 0, 10, 15, 20 и 25 вес. %.

2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

2.1. Материалы и приготовление образцов для испытаний

С помощью литья с перемешиванием были получены композиты, состоящие из сплава Al–7% Si в качестве матрицы и частиц Al_2O_3 (со средним размером частиц 75 мкм) в качестве упрочняющих компонент. Были изготовлены композиты с содержанием частиц Al_2O_3 10, 15, 20, 25 вес. %. В данном исследовании сплав Al–Si имел следующий химический состав: 7.1% Si, 0.3% Mg, 0.01% Mn, 0.02% Cu, 0.01% Ni.

Отливки имели форму стрежней диаметром 10 мм и длиной 100 мм. Затем отливки обрабатывали до получения заготовки диаметром 9 мм и длиной 100 мм. Образцы для испытания на коррозионный износ вырезали из заготовок с помощью абразивного отрезного диска. Образцы имели форму цилиндров диаметром 9 мм и высотой 15 мм. Перед испытаниями поверхность образцов сначала грубо шлифовалась (с помощью наждачной бумаги на основе SiC, размером зернистости до 800) и полировалась для удаления всех мелких царапин на поверхности с последующей промывкой ацетоном. Микроструктуру образцов до и после испытания на коррозионный износ исследовали на оптическом микроскопе, на сканирующем электронном микроскопе (SEM) и с помощью энергодисперсионного рентгеновского анализа (EDS).

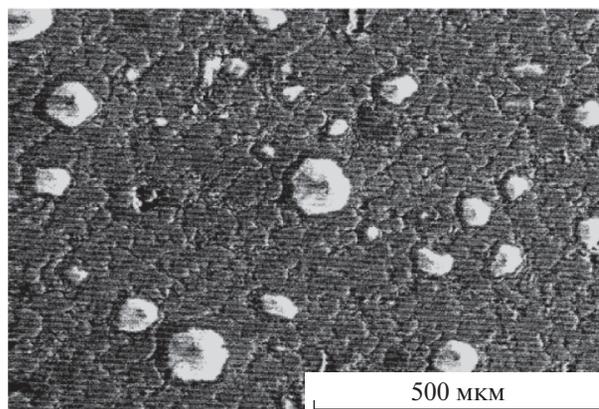


Рис. 1. Микроструктура композита с Al–Si матрицей и 25 вес. % Al_2O_3 (SEM).

2.2. Испытание на коррозионный износ

Испытания на коррозионный износ выполняли на установке для таких испытаний. При этих испытаниях образцы композита с матрицей Al–Si полностью погружались в электролит 3.5% NaCl. Испытания проводились при скорости скольжения 10 и 15 см/с, и результаты сравнивали с результатами, полученными в стоячих условиях. Электрохимические параметры (плотность коррозионного тока mA/cm^2 , скорость коррозии мм/год и коррозионный потенциал мВ) определяли с помощью потенциостата-гальваностата Minslberg, модель PS6. Обеспечивалась полная связь между ячейкой, потенциостатом/гальваностатом и компьютером. Первое измерение выполняли при потенциале разомкнутой цепи (ОСР), затем цепь замыкалась для получения поляризационной кривой. Потенциал на аноде повышался от (–200 мВ) ниже ОСР до (+500 мВ) выше ОСР со скоростью сканирования 0.5 мВ/с. Результатом каждого цикла измерений была поляризационная кривая, исходя из которой могут быть определены параметры коррозии методом тафелевской экстраполяции.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

3.1. Микроструктура

Микроструктура композита (SEM) с матрицей из сплава Al–Si и 25 вес. % Al_2O_3 , изображена на рис. 1, где видно, что достигается приблизительно равномерное распределение частиц. Наблюдаемая микроструктура и результаты EDS-анализа матрицы Al–Si и композита с 25 вес. % Al_2O_3 приведены на рис. 2. Из рис. 2а и 2в, видно, что микроструктура матричного сплава состоит из первичных дендритов α -Al и междендритных областей, представляющих собой либо эвтектическую фазу, обогащенную Si, либо усадочные поры. На

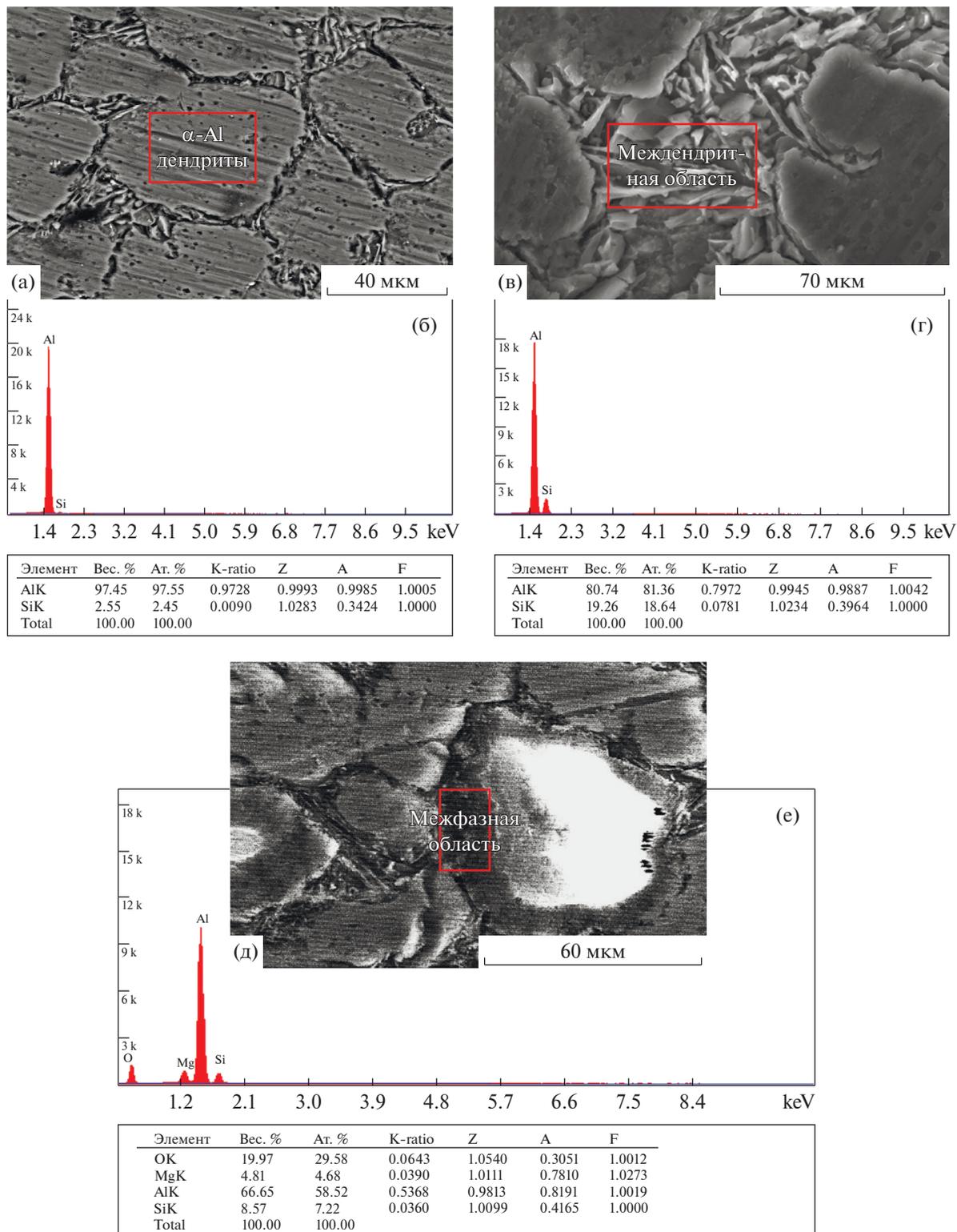


Рис. 2. Микроструктура (SEM) и результаты EDS-анализа Al–Si матрицы и композита с 25 вес. % Al_2O_3 : (а), (в), (д) – микроструктура; (б), (г), (е) – результаты EDS анализа α -Al дендритов, междендритной области и межфазной области соответственно.

рис. 2д показана межфазная область между матрицей и частицами Al_2O_3 . Энергодисперсионные спектры и массовая доля элементов в различных

областях, показанные на рис. 2б, 2г, 2е, соответствуют фазам, присутствующим в изображенной выше микроструктуре. Явное нарушение сцепле-

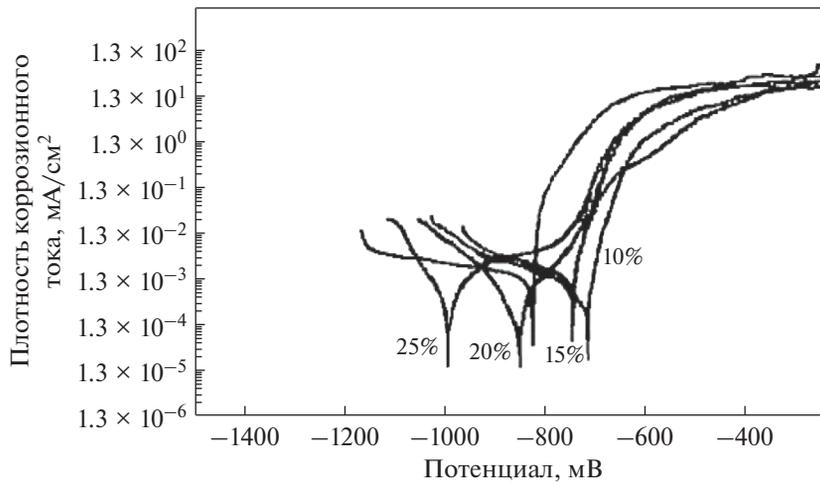


Рис. 3. Поляризационные кривые для сплава Al–Si и его композитов с различными вес. % Al₂O₃ при испытании в растворе 3.5% NaCl в стоячих условиях.

ния между частицами Al₂O₃ и матрицей Al–Si отсутствует и, следовательно, может сформироваться отчетливая граница раздела из-за взаимодействия между частицами Al₂O₃ и жидким сплавом Al–Si в процессе изготовления, как показано на рис. 2д. Результаты EDS анализа межфазной области между матрицей и оксидом алюминия, приведенные на рис. 2е, могут считаться подтверждением возникновения взаимодействия между Al₂O₃ и жидким сплавом Al–Si в процессе изготовления. Однако для более детального определения характеристик фаз, присутствующих в межфазной области, необходимы приборы с исключительно высоким разрешением.

Согласно предыдущему исследованию [14], взаимодействие частица/матрица в композитах, содержащих частицы Al₂O₃ и алюминиевую матрицу с Mg, может быть обусловлено образованием шпинели MgAl₂O₄ или MgO на границе раздела. Образование либо MgO, либо шпинели MgAl₂O₄ зависит от содержания Mg в расплаве. Если содержание Mg меньше, чем 7 вес. %, как в данном случае, предпочтительным является образование

шпинели MgAl₂O₄, присутствующей, в основном, на границе раздела частица/матрица [15].

3.2. Коррозионное поведение сплава Al–Si и его композитов

3.2.1. В стоячих условиях. На рис. 3 показаны кривые поляризации композитов с матрицей Al–Si и матричного сплава в стоячих условиях при использовании раствора 3.5% NaCl.

Данные по коррозии приведены в табл. 1.

Из рис. 3, можно сделать вывод, образец матричного сплава Al–Si подвержен общему анодному растворению. Композит с матрицей Al–Si и 25 вес. % Al₂O₃ имеет явный интервал пассивации (~275 мВ), тогда как композит с 20 вес. % Al₂O₃ имеет ограниченный интервал пассивации (~50 мВ).

Согласно табл. 1, наиболее отрицательный коррозионный потенциал (–975 мВ) получен для композита с матрицей Al–Si и 25 вес. % Al₂O₃, тогда как наименее отрицательный потенциал (–725 мВ) наблюдался для композита с матрицей Al–Si и 10 вес. % Al₂O₃. Также видно, что скорость корро-

Таблица 1. Коррозионное поведение матричного сплава Al–Si и его композитов с различными вес. % частиц Al₂O₃ в стоячих условиях

Образец	Потенциал разомкнутой цепи ОСП, мВ	Скорость коррозии, мм/год × 10 ^{–2}	Коррозионный потенциал E _{корр.} , мВ
Сплав Al–Si	–930	0.68	–850
Al–Si–10% Al ₂ O ₃	–748	0.35	–725
Al–Si–15% Al ₂ O ₃	–752	0.4	–750
Al–Si–20% Al ₂ O ₃	–825	0.38	–875
Al–Si–25% Al ₂ O ₃	–907	0.57	–975

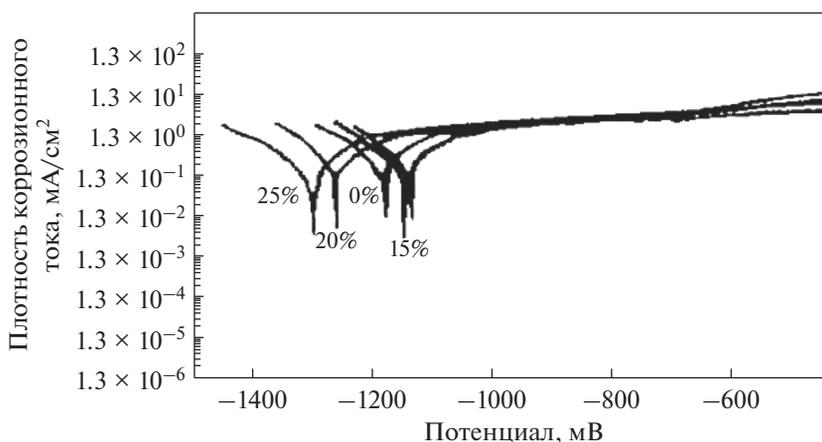


Рис. 4. Поляризационные кривые для сплава Al–Si и его композитов с различными вес. % Al_2O_3 при испытании в условиях коррозионного износа при скорости скольжения 10 см/с.

зии для всех образцов композита с матрицей Al–Si ниже, чем скорость коррозии для матричного сплава.

Наименьшая скорость коррозии ($0.35 \text{ мм/г} \times 10^{-2}$) получена для композита с 10 вес. % Al_2O_3 с показателем улучшения 48.5%, тогда как минимальный показатель улучшения составил 16.2% для композита с 25 вес. % Al_2O_3 . Повышение стойкости к коррозии может быть обусловлено хорошим сцеплением матрицы с упрочняющими частицами [16].

Значение pH для раствора NaCl составляет 7.5 и из диаграммы Пурбе (потенциал – pH) видно, что алюминий пассивируется при pH в интервале 4.0–8.0 за счет быстрого образования Al_2O_3 [17].

Кроме того, частицы кремния, также как частицы Al_2O_3 , имеют плохую проводимость и не могут действовать, как катод в коррозионной реакции [18–22]. Гупта с сотр. [9] исследовал образцы ММК композитов Fe– Al_2O_3 (5% и 10%). Коррозионное поведение образцов с содержанием Al_2O_3 5 и 10% указывает на то, что из-за частиц Al_2O_3 кривые Тафеля смещаются в сторону областей с более низким током, что свидетельствует о

повышении коррозионной стойкости образцов. Антикоррозионная эффективность всех образцов оказалась выше 90%.

3.2.2. В условиях коррозионного износа. На рис. 4 показаны кривые поляризации композитов с матрицей Al–Si и матричного сплава в условиях коррозионного износа в растворе 3.5% NaCl при скорости 10 см/с. Из рис. 4 можно видеть, что анодная и катодная области аналогичны для всех испытанных образцов. Все испытанные образцы подвержены непрерывному анодному растворению. Данные по коррозии приведены в табл. 2. Видно, что наиболее отрицательный коррозионный потенциал (–1300 мВ) получен для композита с матрицей Al–Si и 25 вес. % Al_2O_3 , тогда как наименее отрицательный потенциал (–1175 мВ) наблюдался для композита с 10 вес. % Al_2O_3 . Скорость коррозии композита с 25 вес. % Al_2O_3 составила $2.21 \text{ мм/г} \times 10^{-2}$. При этом скорость коррозии матричного сплава Al–Si составляет $2.78 \text{ мм/г} \times 10^{-2}$.

Из табл. 3 видно, что добавление частиц Al_2O_3 приводит к смещению коррозионного потенциала в сторону отрицательных значений в условиях

Таблица 2. Коррозионное поведение матричного сплава Al–Si и его композитов с различными вес. % частиц Al_2O_3 в условиях коррозионного износа при скорости скольжения 10 см/с

Образец	Потенциал разомкнутой цепи ОСП, мВ	Скорость коррозии, мм/год $\times 10^{-2}$	Коррозионный потенциал $E_{\text{соп}}$, мВ	Гравиметрический анализ/потеря веса, %
Сплав Al–Si	–930	2.78	–1190	33.0
Al–Si–10% Al_2O_3	–748	2.45	–1175	23.6
Al–Si–15% Al_2O_3	–752	2.40	–1180	20.7
Al–Si–20% Al_2O_3	–825	2.25	–1275	18.1
Al–Si–25% Al_2O_3	–907	2.21	–1300	15.7

Таблица 3. Коррозионное поведение матричного сплава Al–Si и его композитов с различными вес. % частиц Al₂O₃ в условиях коррозионного износа при скорости скольжения 15 см/с

Образец	Потенциал разомкнутой цепи ОСР, мВ	Скорость коррозии, мм/год × 10 ⁻²	Коррозионный потенциал E _{сопр} , мВ	Гравиметрический анализ/потеря веса, %
Сплав Al–Si	–930	3.21	–1130	35.4
Al–Si–10% Al ₂ O ₃	–748	3.19	–1250	24.8
Al–Si–15% Al ₂ O ₃	–752	3.18	–1260	22.5
Al–Si–20% Al ₂ O ₃	–825	3.168	–1300	21.2
Al–Si–25% Al ₂ O ₃	–907	3.165	–1350	17.5

коррозионного износа при скорости скольжения 15 см/с. Наиболее отрицательный коррозионный потенциал (–1350 мВ) отмечается у композита с матрицей Al–Si и 25 вес. % Al₂O₃, при этом наименее отрицательный потенциал (–1130 мВ) соответствует матричному сплаву. Согласно табл. 3 можно утверждать, что наибольшая скорость коррозии (3.21 мм/г × 10⁻²) наблюдалась для матричного сплава Al–Si, тогда как наименьшее значение (3.165 мм/г × 10⁻²) установлено для композита с 25 вес. % Al₂O₃.

Динамика потенциала не указывает на значительное увеличение стойкости к коррозии испытанных образцов ММК, однако об изменении стойкости к коррозии можно судить по результатам гравиметрического анализа.

Из табл. 2 видно, что наибольшая стойкость к коррозии отмечается для ММК с 25 вес. % Al₂O₃ (потеря веса 15.7%) при показателе улучшения 51.5%, при этом потеря веса для матричного сплава составляет 33% при скорости скольжения 10 см/с. Как следует из табл. 3, при скорости скольжения 15 см/с потеря веса в % для испытанных образцов ММК также несколько ниже, чем для образца матричного сплава. Потеря веса для матричного сплава составляет 35.4%, но уменьшается на 44.4% для испытанных образцов ММК с 25 вес. % Al₂O₃ (потеря веса 17.5%).

На рис. 5 приведены микрофотографии (SEM) корродированной поверхности матричного сплава Al–Si и композита после испытания в растворе 3.5% NaCl в условиях коррозионного износа при скорости скольжения 10 и 15 см/с, соответственно.

На рис. 5а отчетливо видны широкие полосы следов износа и крупных локальных зон растворения зерен матричного сплава вследствие удаления материала с поверхности образца. Для композита с матрицей Al–Si и 25 вес. % Al₂O₃ (рис. 5б) ширина полос уменьшается, что свидетельствует о минимизации коррозии.

Из данного исследования следует, что коррозионный потенциал матричного сплава Al–Si и

его композитов в условиях коррозионного износа является более отрицательным, чем в стоячих условиях. В стоячих условиях наиболее отрицательный коррозионный потенциал зафиксирован для композита с матрицей Al–Si и 25 вес. % Al₂O₃, тогда как наименее отрицательный коррозионный потенци-

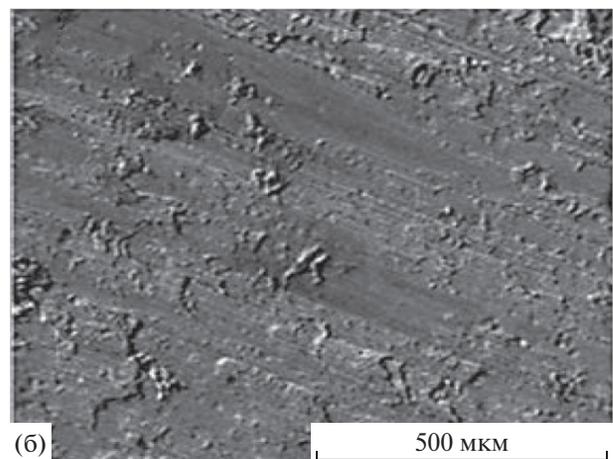
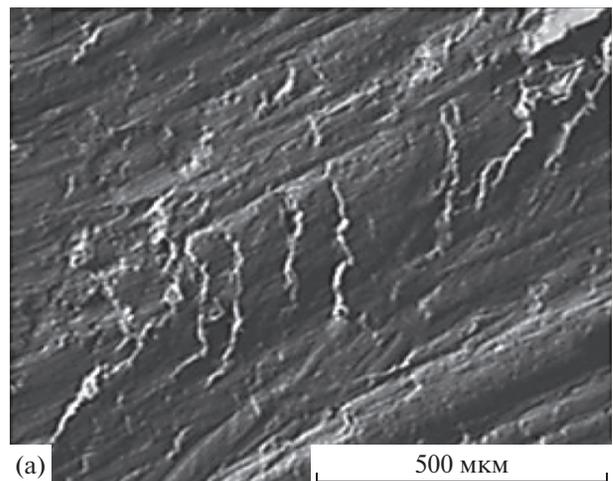


Рис. 5. Микрофотографии (SEM) корродированных поверхностей при коррозионном износе в растворе 3.5% NaCl для: (а) сплав Al–Si и (б) композит с матрицей Al–Si и 25 вес. % Al₂O₃.

ал соответствует композиту с 10 вес. % Al_2O_3 . Как в стоячих условиях, так и в условиях коррозионного износа упрочняющие частицы Al_2O_3 положительно влияют на стойкость к коррозии сплава Al–Si.

Фан с сотр. [12] исследовали коррозионный износ в растворе 3.5 вес. % NaCl композита с матрицей из алюминиевого сплава 6061, упрочненного оксидом алюминия. Они сообщают, что при коррозионном износе коррозионный потенциал смещается в активную сторону и плотность тока уменьшается при повышении объемной доли Al_2O_3 в материале. Влияние объемной доли Al_2O_3 на скорость коррозионного износа может быть связано с уменьшением площади поверхности металла, подвергающейся воздействию коррозионной среды, при увеличении количества добавляемых частиц Al_2O_3 . Рамачандра и Радхакришна [23] исследовали коррозионный износ ММК из сплава Al–7% Si, упрочненного 5, 10 и 15 вес. % SiC. Они сообщают, что стойкость к коррозии повышается при увеличении доли SiC. Образование пассивирующих слоев на поверхности образцов снижает потери металла из-за износа за счет формирования защитных слоев, стойких к воздействию суспензии. Сарех Мослех с сотрудниками [24] исследовали влияние содержания наноразмерных частиц SiC на коррозионный износ нанокompозитов Al/SiC. Было показано, что стойкость к коррозионному износу этих композитов повышается при увеличении содержания SiC. Был сделан вывод, что это связано с действием раствора, как смазки, уменьшающей коэффициент трения и теплоту трения. Кроме того, повышенная прочность нанокompозитов в сочетании с лучшей стойкостью к коррозии способствуют повышению их стойкости к коррозионному износу, по сравнению с основным сплавом.

ВЫВОДЫ

В настоящей работе был исследован коррозионный износ в растворе 3.5% NaCl матричного сплава Al–Si и его композитов с различным содержанием (10, 15, 20, 25 вес. %) Al_2O_3 . По результатам работы сделаны следующие основные выводы:

1. Все композиты с матрицей Al–Si и различным содержанием упрочняющих частиц Al_2O_3 имеют более высокую стойкость к коррозии, как в стоячих условиях, так и в условиях коррозионного износа, по сравнению с матричным сплавом.

2. Наибольшую стойкость к коррозии в стоячих условиях имеет композит с матрицей Al–Si и 10 вес. % частиц Al_2O_3 .

3. Скорость коррозионного износа снижается при увеличении содержания частиц Al_2O_3 при скоростях скольжения 10 и 15 см/с.

4. Скорость коррозионного износа повышается при увеличении скорости скольжения.

5. Испытания на коррозионный износ показали, что коррозионный потенциал смещается в сторону отрицательных значений по сравнению с результатами, полученными в стоячих условиях.

Авторы выражают благодарность сотрудникам инженерного факультета Каирского университета за помощь в выполнении ряда экспериментальных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Li G.R., Zhao Y.T.* Fabrication and properties of in situ ($\text{Al}_3\text{Zr} + \text{Al}_2\text{O}_3$) p/A356 composites cast by permanent mould and squeeze casting // *J. Alloys Compounds*. 2009. V. 471. P. 530–535.
2. *Pradeep Kumar Yadav, Gajendra Dixit.* Erosive–Corrosive Wear of Aluminium–Silicon Matrix (AA336) and SiCp/TiB2p Ceramic Composites // *Silicon*. 2018. V. 11. № 3. P. 1649–1660 on line. <https://doi.org/10.1007/s12633-018-9981-2>
3. *Yu S.Y., Ishii H., Chuang T.H.* Corrosive Wear of SiC Whisker- and 6061 Aluminum Alloy Composites Particulate-Reinforced // *Mater. Trans. A*. 1996. V. 27A. P. 2653–2662.
4. *Ahmad F., Jason Lo S.H., Aslam M., Haziq A.* Tribology Behaviour of Alumina Particles Reinforced Aluminium Matrix Composites and Brake Disc Materials // *Procedia Engineering*. 2013. V. 68. P. 674–680.
5. *Akbari M.K., Mirzaee O., Baharvandi H.R.* Fabrication and study on mechanical properties and fracture behavior of nanometric Al_2O_3 particle-reinforced A356 composites focusing on the parameters of vortex method // *Mater. Design*. 2013. V. 46. P. 199–205.
6. *Bobić B., Mitrović S., Babić M., Bobić I.* Corrosion of Metal-Matrix Composites with Aluminium Alloy Substrate // *Tribology in industry*. 2010. V. 32. P. 3–11.
7. *Abd El-Aziz Kh., Abo El-Nasr A.A., Elfasakhany A., Saber D., Helal M.* Influence of casting mould wall thickness on the properties and microstructure of A356 alloy reinforced with micro/nanoalumina particles // *ARCTIC J*. 2018. V. 71. P. 26–39.
8. *Shao N., Dai J.W., Li G.Y., Hane T.* Effect of La on wettability of Al_2O_3 by molten aluminum // *Mater. Letters*. 2004. V. 58. P. 2041–2044.
9. *Gupta P., Kumar D., Quraishi M.A., Parkash O.* Corrosion Behavior of Al_2O_3 Reinforced Fe Metal Matrix Nanocomposites Produced by P/M Technique // *Adv. Sci. Eng. Med*. 2013. V. 5. P. 366–370.
10. *Abd El-Aziz Kh., Zohdy Kh., Saber D., Sallam H.E.M.* Wear and Corrosion Behavior of High-Cr White Cast Iron Alloys in Different Corrosive Media // *J. Bio. Tribol. Corros*. 2015. V. 1. P. 25–37.
11. *Toptan F. Alves A.C., Kerti I., Ariza E., Rocha L.A.* Corrosion and tribocorrosion behaviour of Al–Si–Cu–Mg alloy and its composites reinforced with B_4C particles in 0.05 M NaCl solution // *Wear*. 2013. V. 306. P. 27–35.
12. *Fang C.K.* Synergistic Effects of Wear and Corrosion for Al_2O_3 Particulate–Reinforced 6061 Aluminum Matrix

- Composites // *Metal. Mater. Trans. A*. 1999. V. 30. P. 643–651.
13. *Abd El-Aziz Kh., Saber D., Sallam H.E.M.* Wear and Corrosion Behavior of Al–Si matrix composite reinforced with Alumina // *J. Bio. Tribo. Corros.* 2015. V. 1. P. 1–10.
14. *Megahed M., Saber D., Agwa M.A.* Modeling of wear behavior of Al–Si/Al₂O₃ metal matrix composites // *Phys. Met. Metal.* 2019. в печати.
15. *Daoud A., Reif W.* Influence of Al₂O₃ Particulate on the Aging Response of A356 Al-Based Composites // *J. Mater. Proces. Techn.* 2002. V. 123. P. 313–318.
16. *Dobrzanski L.A., Włodarczyk A., Adamiak M.* Structure, Properties and Corrosion Resistance of PM Composite Materials Based on EN AW-2124 Aluminum Alloy Reinforced With the Al₂O₃ Ceramic Particles // *J. Mater. Proces. Techn.* 2005. V. 162–163. P. 27–32.
17. *Das S., Saraswathi Y.L., Mondal D.P.* Erosive–Corrosive Wear of Aluminum Alloy Composites: Influence of Slurry Composition and Speed // *Wear.* 2006. V. 261. P. 180–190.
18. *Saber D., Abd El-Aziz Kh., Fathy A.* A study of corrosion behavior of copper-alumina nanocomposites in different corrosive media // *Intern. J. Mechan. Eng.* 2016. V. 5. P. 1–10.
19. *Sun H.H., Chen D., Li X.F., Ma N.H., Wang H.W.* Electrochemical Corrosion Behavior of Al–Si Alloy Composites Reinforced with in Situ Tib2 Particulate // *Materials and Corrosion.* 2009. V. 60. P. 419–423. <https://doi.org/10.1002/maco.200805106>
20. *Shimizu Y., Nishimura T., Matsushima I.* Corrosion Resistance of Al-Based Metal Matrix Composites // *Mater. Sci. Eng. A.* 1995. V. 198. P. 113–118.
21. *Nunes P.C.R., Ramanathan L.V.* Corrosion Behavior of Alumina-Aluminum and Silicon Carbide-Aluminum Metal Matrix Composites // *Corrosion.* 1995. V. 51. P. 610–617.
22. *Bhaskar Chandr, Jatinder Kumar, Hari Singh.* Fabrication and characterisation of Al₂O₃/aluminium alloy 6061 composites fabricated by Stir casting // *Materials Today: Proceedings Part A.* 2017. V. 4. P. 2783–2792.
23. *Ramachandra M., Radhakrishna K.* Sliding wear, slurry erosive wear, and corrosive wear of aluminium/SiC composite // *Materials Science-Poland.* 2006. V. 24. P. 333–348.
24. *Mosleh-Shirazi S., Akhlaghi F., Li D.-Y.* Effect of SiC content on dry sliding wear, corrosion and corrosive wear of Al/SiC nanocomposites // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China.* 2016. V. 26. P. 1801–1808. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(16\)64294-2](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(16)64294-2)