

**НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК ТАДЖИКИСТАНА
ГНУ «ИНСТИТУТ ХИМИИ им. В.И. НИКИТИНА»**

На правах рукописи

МАХМУДЗОДА МУЪМИНДЖОН

**СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА СИСТЕМЫ Al-
Al₂O₃ ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ ПРОДУВКИ РАСПЛАВА АК7
КИСЛОРОДОМ**

2.6.17 – Материаловедение (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Душанбе – 2024

Работа выполнена в лаборатории «Коррозионностойкие материалы» ГНУ «Институт химии им. В.И. Никитина Национальной академии наук Таджикистана».

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник ГНУ «Институт химии им. В.И. Никитина НАН Таджикистана»
Эшов Бахтиёр Бадалович

Официальные оппоненты: **Махмадализода Муродали Махмади** - доктор технических наук, доцент, начальник учебно-методического отдела Душанбинского филиала НИТУ МИСИС

Ниёзов Омадкул Хамрокулович - кандидат технических наук, заместитель декана по науке и инновации геологического факультета, Таджикского национального университета

Ведущая организация: Таджикский технический университет имени академика М.С Осими, кафедра «Материаловедение, металлургические машины и оборудования».

Защита состоится « 9 » декабря 2024 года в 9⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета 73.1.002.02 при ГНУ «Институт химии им. В.И. Никитина Национальной академии наук Таджикистана» по адресу: 734063, г. Душанбе, ул. Айни, 299/2. E-mail: dissovet@ikai.tj

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ГНУ «Институт химии им. В.И. Никитина Национальной академии наук Таджикистана» www.chemistry.tj.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2024 года

**Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат химических наук**

Халикова Л.Р.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Быстрый прогресс техники и технологий в сегодняшнем мире требует от учёных активных действий в сфере разработки и созидания новых материалов, с улучшенными физико-химическими, механическими и другими характеристиками. В большинстве случаев только композиционные материалы могут удовлетворить требованиям новой техники, для которой характерно ужесточение условий эксплуатации: повышение нагрузок, скоростей, температур, агрессивности сред, уменьшение веса и т.д. В промышленности применяют композиционные материалы на основе практически всех технически важных металлических материалов. Однако наибольшее распространение получили композиционные материалы на основе алюминия и его сплавов, содержащие в качестве наполнителя дисперсные высокопрочные, высокомодульные керамические частицы. Дисперсно-наполненные алюмо-матричные композиционные материалы характеризуются повышенными значениями удельной прочности и жёсткости при сохранении высокой демпфирующей способности, электро- и теплопроводности, и малого удельного веса, что обеспечивает снижение массы изделий при одновременном повышении надёжности и ресурса работы.

Цель исследования заключается в получении нового композиционного материала системы Al-Al₂O₃, методом продувки расплава алюминиевого сплава АК7 кислородом, определении его твердости, прочности и кинематической вязкости, установлении кинетики и механизма процесса окисления и электрохимического поведения.

Для достижения поставленной цели **решены следующие задачи:**

- Изучен перечень существующих композиционных материалов и методов их получения.
- Разработана технологическая схема получения композиционного материала системы Al-Al₂O₃;
- Получен новый композиционный материал системы Al-Al₂O₃ методом продувки расплава алюминиевого сплава АК7 кислородом.
- Исследованы механические свойства полученного композиционного материала системы Al-Al₂O₃;
- Выявлен механизм формирования композиционного материала и изучена структура композиционного материала системы Al-Al₂O₃;
- Проведено испытание композиционного материала системы Al-Al₂O₃ методом крутильных колебаний и выявлены зависимости;
- Изучено анодное поведение композиционного материала системы Al-Al₂O₃;
- Изучен механизм процесса окисления алюминиевого сплава АК7 и композиционного материала системы Al-Al₂O₃;

Научная новизна работы. Разработан и получен новый композиционный материал системы Al-Al₂O₃ методом продувки расплава алюминиевого сплава АК7 кислородом.

Изучено влияние продувки кислородом на микроструктуру. По результатам этих исследований пришли к выводу что продувка расплава кислородом оказывает незначительное влияние на микроструктуру.

Исследованы механические свойства полученного композиционного материала. Методом Бринелля были проведены измерения твёрдости образцов из исходного сплава и полученного композиционного материала, и пришли к выводу что твердость и прочность полученного композиционного материала выше чем твердость и прочность исходного сплава АК7. А проведённые исследования на разрыв показали значительное повышение прочности на разрыв у композиционного материала системы Al-Al₂O₃ относительно исходного сплава, что связано с расположением оксидов по границам фаз.

Изучено анодное поведение алюминиевого сплава АК7 и композиционного материала системы Al-Al₂O₃ потенциостатическим методом в потенциодинамическом режиме со скоростью развертки потенциала 2 мВ/с в электролитической среде жидкого раствора NaCl разной концентрации. Установлено, что коррозионная стойкость композиционного материала системы Al-Al₂O₃ выше чем у исходного алюминиевого сплава АК7.

Изучен механизм процесса окисления алюминиевого сплава АК7 и композиционного материала системы Al-Al₂O₃ термогравиметрическим методом. Установлены закономерности изменения кинетических и энергетических характеристик процесса окисления сплавов в воздушной среде, в твёрдом состоянии. Зависимость скорости окисления от температуры показывает, что с ростом температуры значения окисления увеличиваются, при этом скорость окисления исходного сплава выше, чем у композиционного материала системы Al-Al₂O₃.

Практическая значимость работы. В результате проведенных исследований, был получен новый композиционный материал системы Al-Al₂O₃ и были проведены исследования по определению его свойств. Исходя из результатов исследований можно сказать что полученный композиционный материал является перспективным для использования в промышленности и может стать дешёвой альтернативой спечённым алюминиевым порошкам (САП), получаемым методами порошковой металлургии, а также литым композиционным материалам, получаемым методом замешивания порошка в расплав (ex-situ).

Синтезированный композиционный материал возможно использовать как коррозионностойкий материал, который также имеет высокие показатели по твердости и прочности. Также из данного композиционного материала возможно изготовить детали различной формы и размеров из-за хороших литейных свойств.

На основе проведённых исследований был получен малый патент Республики Таджикистан под номером TJ № 1404, от 12.04.2023.

Методы исследования и использованная аппаратура:

- Метод крутильных колебаний, измерение кинематической вязкости в вязкозиметре;
- Термогравиметрический метод изучения кинетики окисления сплавов (катетометр КМ-8);
- Потенциостатический метод исследования сплавов (потенциостат ПИ- 50.1.1);
- Испытание на растяжение (разрывная машина Instron-3382), проведение механических испытаний на растяжение;
- Метод Бринелля для определения твердости металлов (твердомер марки ТШ-2)

Для решения поставленных задач использовались современные методы исследования, в частности определение химического состава проводили на искровом спектрометре SPECTROMAXx, для исследования микроструктуры использовали микроскоп марки БИОМЕД-1, исследование состава с помощью рентгеновского дифрактометра XRDynamic 500, для составления карты распределения элементов использовали растровую электронную микроскопию, а также использовался сканирующий электронный микроскоп и EBSD-анализ.

Основное положения, выносимое на защиту:

- получение композиционного материала методом продувки расплава кислородом;
- результаты микроструктурного анализа и механические свойства композиционного материала системы Al-Al₂O₃;
- измерение вязкости композиционного материала системы Al-Al₂O₃;
- коррозионно-электрохимические исследования композиционного материала системы Al-Al₂O₃ в среде жидкого раствора электролита NaCl различной концентрации;
- механизм и закономерности твердофазного окисления композиционного материала системы Al-Al₂O₃;

Личный вклад автора заключается в анализе литературных данных, постановке и решении задач исследований, подготовке и проведении экспериментальных исследований в лабораторных условиях, анализе полученных результатов, формулировке основных положений и выводов диссертации.

Степень достоверности результатов. Степень достоверности обеспечивается их воспроизводимостью, использованием для выполнения измерений современного высокоточного оборудования, качественным соответствием полученных результатов с известными имеющимся в литературе экспериментальными данными и теоретическими представлениями.

Апробация работы. Основные положения диссертации обсуждались на: Всероссийская науч.-тех. конф. с межд. уч. «Наследственность в литейно-металлургических процессах VIII» (Самара, 2018); Межд. науч.-тех. конф., посвящённой 150-летию факультета «Машиностроительные

технологии» и кафедры «Технологии обработки материалов» Инновационные технологии в литейном производстве (Москва, 2019); Шестая ежегодная конф. кафедры истории науки и техники «История науки и техники в современной системе знаний» УрФУ (Екатеринбург, 2016); The Ninth International Conference on Material Technologies and Modeling MMT-2016 (Израиль, 2016); Респ. науч.-практ. конф. «Современные проблемы естественных наук», РТСУ (Душанбе, 2021); VI Межд. науч.-практ. конф. «Роль молодых учёных в развитии науки, инновации и технологии» (Душанбе, 2021); Межд. науч.-практ. конф. «Роль Российско-Таджикского (Славянского) университета в становлении и развитии науки и инновационного образования в республике Таджикистан» (Душанбе, 2021); Науч. Практ. конф. «Фундаментальная наука – основа совершенствования технологий и материалов» (Душанбе, 2021); Межд. науч.-практ. конф. «XII Ломоновские чтения» (Душанбе, 2022); Материалы II межд. науч. Конф. «Инновационное развитие науки» (Душанбе, 2022); XVII Нумановские чтения, «Результаты инновационных исследований в области химических и технических наук в XXI веке» (Душанбе, 2022) и других международных и республиканских конференциях.

Опубликование результатов диссертации. По теме диссертации опубликованы 19 работ, из них 4 статьи в журналах, рекомендованных ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Получен малый патент Республики Таджикистан (TJ №1404 от 12.04.2023).

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения. Изложена на 146 страницах компьютерного набора, включает 38 рисунков, 22 таблицы и списка литературы из 122 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулирована цель и задачи исследования, изложена научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, приведены защищаемые положения.

В первой главе представлен обзор литературы по теме исследования. Описаны виды композиционных материалов, способы их получения и области применения. Также в этой главе приведены свойства алюминиевых сплавов, и композиционных материалов на основе алюминия.

В литературном обзоре описаны особенности высокотемпературного окисления алюминиевых сплавов и коррозионно-электрохимического поведения композиционного материала в различных средах; о факторе влияния вязкости расплавов на структуру расплава.

На основе выполненного обзора заметно, что, хотя композиционные материалы считаются перспективными материалами, эта сфера недостаточно хорошо изучена, особенно методы получения композиционного материала жидкофазным методом. Таким образом, в качестве объекта исследования в данной диссертационной работе был взят композиционный материал на основе алюминиевого сплава АК7, который был получен методом продувки алюминиевого расплава кислородом.

ГЛАВА II. ФОРМИРОВАНИЕ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА МЕТОДОМ ПРОДУВКИ АЛЮМИНИЕВОГО РАСПЛАВА КИСЛОРОДОМ

Метод получения алюмоматричного композита методом продувки предварительно наводороженного расплава кислородом, предложенный в работе, является наиболее дешевым вариантом из существующих. Сущность предложенного метода состоит в разрушении оксидных пузырей на зеркале расплава в результате реакции образования из оксида алюминия газообразных субоксидов при локальном повышении температуры вследствие реакции горения выносимого на зеркало расплава на поверхности пузырей водорода. Но метод для использования в качестве технологии требует описания происходящих физико-химических процессов.

Для того чтобы получить композиционный материал, в печь сопротивления с алундовым тиглем загрузили 500 грамм металлошихты АК7 ГОСТ 1583-93. Количество требуемого гидрида титана (II) для плавки 500 грамм композита на основе алюминия было рассчитано согласно уравнению термического разложения. Минимальное содержание водорода согласно данным равно: 0,65 мл/ 100 грамм алюминия.

Наводороживание расплава проводили колокольчиком с гидридом титана массой 1 грамм, завернутым в алюминиевую фольгу. Крышка печи была снята и установлена кварцевая фурма с наружным диаметром 10 мм. Продувку проводили с расходом кислорода 0,063 м³/ч, определяемым по расходомеру ГУЗ 0,63. На зеркале расплава на начальном этапе продувки сформировался слой шлака (кроме поверхности зеркала расплава по периметру тигля), ограничивающий «бурление» расплава и таким образом, благоприятно сказывающийся на усвоении кислорода. Длительность продувки занимает около 1 часа. Толщина слоя шлака в процессе продувки не увеличивалась. Окончание продувки определяется визуально, по начинающемуся увеличению слоя шлака, что означает полное удаление водорода из расплава. По окончании продувки фурма была извлечена из печи, слой шлака удален литейной ложкой. Заливка производилась из съёмного тигля в песчаную литейную форму.

Содержание оксида алюминия в образцах композита было определено с помощью фотометрического метода согласно ГОСТ 11739.1-90. Исследования были проведены в лаборатории кафедры общей химии Уральского федерального университета на трех образцах, полученных из

разных плавок. Результаты фотометрического анализа приведены в таблице 1.

Теория и результаты

При продувке предварительно насыщенного водородом расплава газообразным кислородом через фурму на её срезе образуются пузыри, покрытые оболочкой из пленки оксида алюминия. Для жидких расплавов в работе была исследована продувка металлического расплава газом через фурму. Исходя из полученных данных была предложена полуэмпирическая формула для расчета диаметра образующегося газового пузыря:

$$d_b = \left[\left(\frac{6 * \sigma * d_n}{\rho_1 * g} \right)^2 + 0,0242 * (V_g^2 * d_n)^{0,0867} \right]^{1/6} \quad (1)$$

Где V_g - расход газа, м³/с;

ρ_1 – плотность расплава, кг/м³;

g – ускорение свободного падения м/с²;

σ – поверхностное натяжение сплава, Н/м;

d_n – внешний диаметр фурмы, м.

Расчет для условий эксперимента показал значение диаметра пузыря - 14,4 мм. При продувке образуется оксидная плёнка. Поверхность образованной оксидной пленки для одного пузыря рассчитывается по формуле:

$$S_b = \pi * d_b^2 \quad (2)$$

Оксидная плёнка образуется в процессе формирования пузыря на фурме, его отрыве и всплытии. Параболический закон окисления жидкого алюминия:

$$\frac{dx}{d\tau} = K_x * \frac{1}{x} \quad (3)$$

в диапазоне температур 800 – 1560 °С. Полученные значения константы реакции соответствуют уравнению Аррениуса:

$$K_x = \frac{A}{\rho} * e^{-\frac{E}{RT}} \quad (4)$$

Где $A=3.3 * 10^{-6} \text{ г}^2 * \text{см}^4/\text{с}$; $E = 777496 \text{ Дж/моль}$

Тогда толщина оксидной плёнки равна:

$$h_{Al_2O_3} = \sqrt[2]{2 * K_x * \tau} \quad (5)$$

Таким образом, толщина оксидной плёнки является функцией времени образования пузыря и всплытия его на поверхность.

Согласно предложенной зависимости, скорость подъема пузырей ω_{Π} считается по формуле:

$$\omega_{\Pi} = 0,70 * \sqrt{\frac{d_b * (\rho_1 - \rho_r) * g}{\rho_1}} \quad (6)$$

и составляет для вышеуказанного размера пузыря 0,25 м/с.

$\vartheta_{\text{отрыва}}$ – частота образования пузырей рассчитывается по формуле:

$$\vartheta_{\text{отрыва}} = \frac{6 * V_g}{\pi * d_b^3} \quad (7)$$

В условиях эксперимента время всплытия (при высоте расплава в тигле над фурмой 80 мм) составит 0,2 с. а время формирования пузырька 0.09 с. Тогда толщина пленки, образовавшейся за это время составит 192 нм, что соответствует минимальному уровню полученных экспериментальных данных. Масса образовавшегося оксида алюминия может быть рассчитана по формуле:

$$m_{Al_2O_3} = \vartheta_{отрыва} * t * \pi * d_b^2 * h_{Al_2O_3} * \rho_{Al_2O_3} \quad (8)$$

где t - время продувки.

Массовые балансы трех плавок приведены в таблице 2.

Таблица 1. Результаты фотометрического анализа образцов:

№ Опыта	Масса навески, мг	Масса оксида алюминия, мг	Доля оксида алюминия, %
1	161.64	8.3	5.1
2	175.92	8.6	4.8
3	184.13	7.9	4.3

Таблица 2. Доля оксида в металле

	Масса, г. (при номере опыта)		
	1	2	3
Дутье кислорода, м ³ /ч	0.063	0.063	0.063
Время продувки, мин	60	56	39
Расход кислорода, м ³	0.063	0.0588	0.04095
Доля оксида в металле экспериментальная	0.051	0.048	0.043
Доля оксида в металле, расчётная	0.044	0.045	0.033

В результате проведённых экспериментов был получен композиционный материал системы Al-Al₂O₃. Экспериментально выявленные значения содержания оксида алюминия в композиционном материале находятся близко к теоретически полученным. Следует отметить что, данная технология получения композиционного материала является с технической точки зрения более простой, менее затратной и может стать заменой существующим технологиям получения композиционных материалов методами ex-situ.

ГЛАВА III. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НОВОГО АЛЮМИНИЕВОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА СИСТЕМЫ Al-Al₂O₃ «ОКСИДАЛЬ»

3.1 Микроструктура и исследование композиционного материала системы Al-Al₂O₃ на твердость.

Изучение микроструктуры является одним из главных средств исследования сплавов. Это дает возможность определять влияние различных воздействий на свойства полученных материалов и планировать дальнейшие перспективы использования этих материалов в

промышленности. С этой целью нами были изучены микроструктура исходного алюминиевого сплава АК7 и полученного нового композиционного материала системы Al-Al₂O₃ на световом микроскопе марки БИОМЕД ММР-1.

Для того чтобы изучить микроструктуру полученного композиционного материала и исходного алюминиевого сплава АК7 заранее получили методом литья образцы цилиндрической формы с диаметром 10-16 мм и длиной 5-10 мм. Каждый образец предварительно отшлифовывали, обезжировали спиртом и погружали в 20%-й водный раствор азотной кислоты. Время травления составляло от 10 до 20 с. После травления микрошлиф промывали в проточной воде и тщательно высушивали прижатием к чистой фильтровальной бумаге.

Микроструктура исходного сплава АК7 (Al-7% Si-1% Fe) и полученного на его основе композиционного материала приведены на рисунке 1а, б. Было замечено, что в результате продувки расплава кислородом, микроструктура изменяется незначительно.

Изученные материалы состоят из первичных дендритов α -Al (твердого раствора на основе алюминия) и сложных многокомпонентных эвтектик. Железосодержащие фазы Fe₂SiAl₈ и Al₅SiFe, которые понижают пластичность материала, образуют эвтектику (α -Al + Fe₂SiAl₈ + Al₅SiFe + Si).

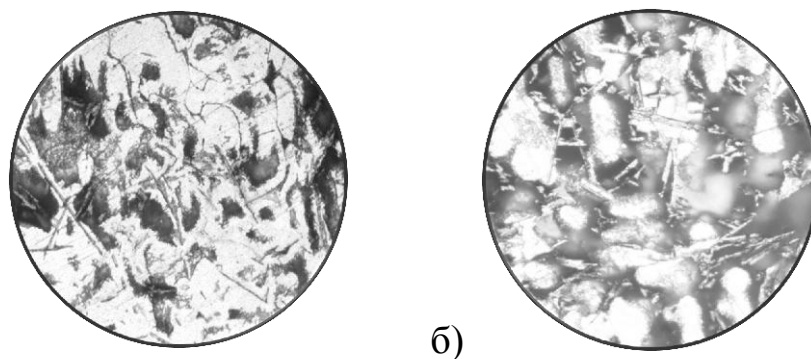


Рисунок 1. Микроструктуры (x500) алюминиевого сплава АК7 (а) и композиционного материала системы Al-Al₂O₃ (б).

Было предположено, что после продувки расплава кислородом в металле появляются включения Al₂O₃, которые повышают прочность сплава. Включения Al₂O₃ при кристаллизации способствуют измельчению кристаллов Fe₂SiAl₈ и Si путем их растрескивания. Кроме того, включения наночастиц Al₂O₃ были обнаружены при исследовании тонкой структуры дендритов α -Al.

Исследование твердости образцов из исходного сплава АК7 и композиционного материала системы Al-Al₂O₃.

К основным механическим свойствам конструкционных материалов и сплавов, определяющим работоспособность и область их применения, относят: твердость, прочность, упругость, пластичность, вязкость,

выносливость. Из всех видов механических испытаний твердость материала как сопротивление вдавливанию определяется чаще всего и практически для любых материалов. Это объясняется тем, что испытание на твердость не приводит к разрушению изделий, не ограничивает величину детали или изделия, отличается простотой, а также портативностью применяемых приборов. При определении твердости нами был выбран метод исследования твердости Бринелля.

Испытание на твердость по Бринеллю (ГОСТ 9012 – 59) проводится путем вдавливания стального закаленного шарика диаметром 10 мм, 5 мм или 2.5 мм под действием нагрузки. После снятия нагрузки на поверхности остается отпечаток, размеры которого измеряют с использованием особой лупы с делениями.

Твердость определяется по формуле (9):

$$HB = \frac{P}{S} = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}, \frac{\text{кгс}}{\text{мм}^2} \quad (9)$$

где P – усилие, действующее на шарик, кг; S – площадь поверхности отпечатка, мм; D- диаметр шарика, мм; d – диаметра отпечатка, мм;

Преимуществами метода Бринелля являются простота, достаточная точность, минимальные требования к чистоте поверхности изучаемого материала, по сравнению с другими методами, а также наличие устойчивой связи HB с величиной σ_B .

Таким образом в данной части мы определили значения твердости исходного алюминиевого сплава АК7, полученного на его основе композиционного материала системы Al-Al₂O₃ а также исходный сплав АК7 легированный титаном 1 масс. %.

Как было сказано выше, для получения композиционного материала системы Al-Al₂O₃ расплав алюминиевого сплава АК7 был продут кислородом и был добавлен гидрид титана. Таким образом титан теоретически мог привести к улучшению твердости и прочности полученного композита. С целью проверки уровня влияния добавочного титана на прочность, мы решили добавить металлический титан в исходный алюминиевый сплав АК7, не проводить продувку кислородом, и далее оценить исключительно влияние добавленного титана на твердость исходного сплава и сравнить со значениями твердости полученного композиционного материала. Для этих опытов были изготовлены образцы из исходного алюминиевого сплава АК7 с добавлением 1 масс. % титана. Результаты проведенных испытаний приведены в таблице 3.

Таблица 3. Твердость и прочность исследованных материалов

№ п/н	Материал образца	*Твёрдость HB	
		кгс/мм ²	МПа
1	Сплав АК7	65	637
2	Сплав АК7 + Ti (1 масс. %)	68	668
3	Композит системы Al-Al ₂ O ₃ .	125	1227

*-среднее значение определили по результатам 3 измерений.

3.2. Испытание композиционного материала на прочность на растяжение

Испытание на растяжение является наиболее универсальным по сравнению с другими видами испытаний, так как оно позволяет определять механические свойства материала на всех стадиях его деформации.

Для получения представления о степени упрочнения были проведены исследования на разрывной машине Instron 3382. Кривые нагрузка - деформация исходного алюминиевого сплава и композиционного материала системы Al-Al₂O₃, полученные на разрывной машине, представлены на рисунке 2. Из диаграммы виден хрупкий характер разрушения композиционного материала, без участка пластического течения, и значительное повышение прочности, относительно исходного сплава, что связано с расположением оксидов в композиционном материале по границам фазовых составляющих и субзерен.

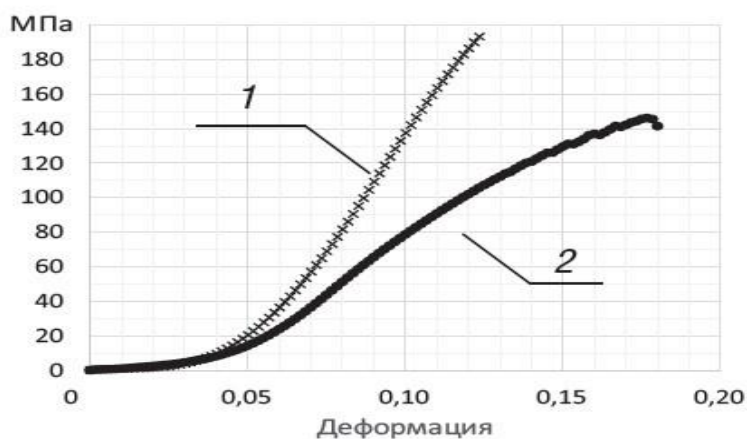


Рисунок 2. Диаграмма нагрузка – деформация.

- 1 – композиционный материала системы Al-Al₂O₃,
- 2 - исходный алюминиевый сплав АК7.

Проведенное исследование показало, что после продувки кислородом расплава исходного сплава АК7 в металле появляются включения Al₂O₃, эти частицы равномерно распределяются в объеме и повышают прочность сплава. Также частицы Al₂O₃ при затвердевании становятся причиной измельчения существующих фаз, механически ограничивая их рост.

Как видно из результатов экспериментов, полученный композиционный материал системы Al-Al₂O₃ значительно лучше исходного алюминиевого сплава АК7 по значениям твердости и прочности. Полученный композиционный материал включает в себя такие свойства как легкость и высокую коррозионную стойкость, которую имеют алюминиевые сплавы и при этом он твердый и прочный. Сочетание этих свойств выгодно выделяет его на фоне других материалов, используемых в промышленности, в конструкционных изделиях и в самолетостроении.

ГЛАВА 4. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА СИСТЕМЫ Al-Al₂O₃

4.1. Вязкость жидкого алюмоматричного композита системы Al-Al₂O₃

Вязкость является важным физико-химическим свойством, необходимым при разработке большинства металлургических процессов, связанных с прохождением через жидкую фазу. Исследование вязкости расплава необходимо для корректирующего расчета литниковых систем для фасонного композиционного литья.

Таблица 4. Химический состав сплава (масс. %)

Элемент	Al	Si	Mg	Ti	Mn	Fe	Cu	Zn
Исходный сплав	90.223	6.212	0.584	0.084	0.305	1.05	0.688	0.573
Композит	89.466	6.788	0.544	0.154	0.376	1.078	0.733	0.656

Однако, насыщение расплава тугоплавкими частицами повышает его вязкость, что приводит к увеличению времени заполнения литейной формы, падению температуры поступающего по литниковой системе в полость формы расплава.

Кинематическую вязкость ν измеряли методом крутильных колебаний тигля с расплавом в одноторцевом варианте при отношении высоты образца к его диаметру ≈ 1 со ступенчатым изменением температуры 30 К. Опыты проводили в атмосфере высокочистого гелия под давлением 105 Па в режиме нагрева от 600 до 1100 °С, с последующим охлаждением образца. При проведении измерений регистрацию параметров колебаний осуществляли оптическим способом с помощью автоматической системы фоторегистрации. Систематическая погрешность измерения ν составляла 3%, а случайная погрешность, определяющая разброс точек в ходе одного опыта, при доверительной вероятности $p = 0.95$ не превышала 1.5%.

Результаты и обсуждение

Результаты измерения кинематической вязкости расплава исходного сплава и композиционного материала представлены на рисунке 3.

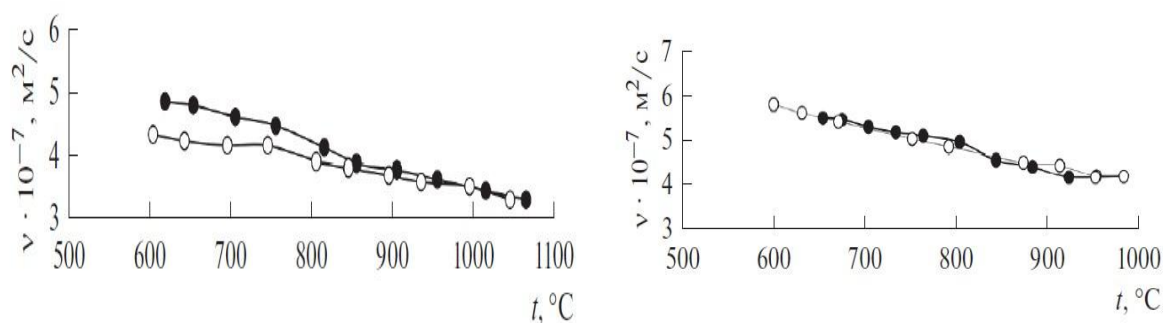


Рисунок 3. Зависимость кинематической вязкости исходного сплава (а) и композиционного материала (б) от температуры (• нагрев; ° охлаждение).

Кинематическая вязкость исходного сплава (а) имеет ветвления политерма нагрева и охлаждения. В отличие от исходного сплава, кинематическая вязкость расплава композиционного материала (б) не характеризуется ветвлением политерма.

Одной из причин увеличения вязкости композиционного материала является отличие формы частиц от изотропной. Их образование происходит в результате разрушения оксидной пленки, поэтому частицы оксида алюминия имеют форму пластин. Для частиц неправильной формы коэффициент α в уравнении Эйнштейна варьируется в зависимости от соотношения диаметра к толщине в широком диапазоне.

Другой причиной повышения вязкости является остроугольная форма частиц, как продукта разрушения оксидной пленки. В работе приведен расчет по уравнению Стокса в зависимости от формы частиц, в частности для частиц кубической формы скорость движения при одинаковом объеме уменьшается на 24%. При изотропной форме частиц уравнение Эйнштейна было модифицировано в виде (10):

$$\eta/\eta_0 = 1 + \alpha\varphi + \beta\varphi^2 + e^{AB} \quad (10)$$

где $\alpha = 2.5$; $\beta = 10.5$; $A = 0.0023$; $B = 16.6$.

Экспериментально определена кинематическая вязкость композиционного материала. Показана возможность прогнозирования кинематической вязкости композиционного материала. Полученные значения вязкости могут быть использованы для расчета литниковых систем при компьютерном моделировании литейных процессов.

По результатам, полученным по итогу проведенных исследований вязкости композиционного материала можно сделать вывод что вязкость полученного композиционного материала системы Al-Al₂O₃ выше чем у исходного алюминиевого сплава АК7. Причиной повышения вязкости можно назвать изменения формы частиц от изотропной, также на вязкость влияет и то что в результате разрушения оксидной пленки внутри расплава, образовывается остроугольная форма частиц, что по формуле и расчётам также приводят к увеличению значений вязкости.

4.2. ИССЛЕДОВАНИЕ АНОДНОГО ПОВЕДЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА СИСТЕМЫ Al-Al₂O₃

Исследования для определения электрохимических параметров сплавов проводились с использованием потенциостата ПИ-50.1.1 в потенциостатическом режиме, а скорость развертки потенциала составлял 2 мВ/с, с выходом на программатор ПР - 8 и самозаписью на ЛКД - 4, в нейтральной среде.

Чтобы получить поляризационные кривые, которые бы воспроизводились без заминки, был использован потенциодинамический метод в комбинации с предварительной глубокой катодной поляризацией при (-2В) и длительности 2 мин. На полученных, таким образом, потенциодинамических кривых, для оценки коррозионной стойкости сплавов, определяли следующие электрохимические характеристики:

стационарный потенциал ($E_{\text{стац.}}$) - потенциал рабочего электрода, который не меняет свою величину в течении 3-х часов. Потенциал коррозии ($E_{\text{корр}}$) -установившийся в результате протекания сопряженных анодного и катодного процессов без внешней поляризации. Потенциал питтинообразования ($E_{\text{по}}$) определялся по перегибу на анодной кривой, потенциал репассивации ($E_{\text{реп.}}$) по перегибу на обратной анодной кривой. Ток коррозии определялся графическим методом на катодной кривой с принятием во внимание тафелевской наклонной $\Delta E_K = 0,120 \text{ В}$, так как в нейтральных средах питтинговая коррозия сплавов алюминия контролируется катодной реакцией ионизации кислорода. В свою очередь величина скорости коррозии является функцией тока коррозии, которая определяется по следующей формуле: $K_{\text{корр.}} = i_{\text{корр}} \cdot k$, где $k = 0,335 \text{ г/А} \cdot \text{час}$

Оценка стойкости сплавов алюминия к питтинговой коррозии может быть осуществлена путем сопоставления значений стационарных потенциалов и потенциалов питтингообразования в одних и тех же условиях испытаний.

Поляризация по второй методике проводилась в потенциодинамическом режиме со скоростью развертки 2 мВ/с в положительном направлении от стационарного потенциала, установившегося при погружении до постоянного значения тока 5 мА , затем в обратном направлении - до величины потенциала, при котором происходит растворение оксидной пленки. Наконец, образцы поляризовали в положительном направлении, получив анодные поляризационные кривые сплавов. Потенциодинамические кривые состоят из трех кинетических областей: активного растворения, активно - пассивного состояния и репассивации. Таким образом, на полученных потенциодинамических кривых определяли основные электрохимические характеристики сплавов: потенциал коррозии ($E_{\text{корр}}$), потенциалы питтингообразования ($E_{\text{п.о.}}$) и репассивации ($E_{\text{реп.}}$), потенциалы начала пассивации ($E_{\text{н.п.}}$) и полной пассивации ($E_{\text{п.п.}}$), а также плотности токов начала пассивации ($i_{\text{н.п.}}$) и полной пассивации ($i_{\text{п.п.}}$).

К примеру, на рисунке 4 показана полная поляризационная кривая исходного алюминиевого сплава АК7 и композиционного материала системы $\text{Al-Al}_2\text{O}_3$, с применением среды электролита - 3%-ного NaCl . Образцы были потенциодинамически поляризованы в положительном направлении от самого потенциала, который установился в процессе погружения, до значительного повышения тока, относящегося к питтингообразованию (кривая I). В последующем, образцы были поляризованы в обратном направлении (кривая II), и потенциал репассивации был определён по пересечению кривых I и II. Затем переходили в катодную область до величин потенциала $-1,1 \text{ В}$ с целью удаления оксидных плёнок, образующихся на поверхности электрода (кривая III) в результате её подщелачивания. В конечном итоге, образцы были поляризованы ещё раз в положительном направлении и на основе

полученных анодных кривых были определены основные электрохимические характеристики (кривая IV).

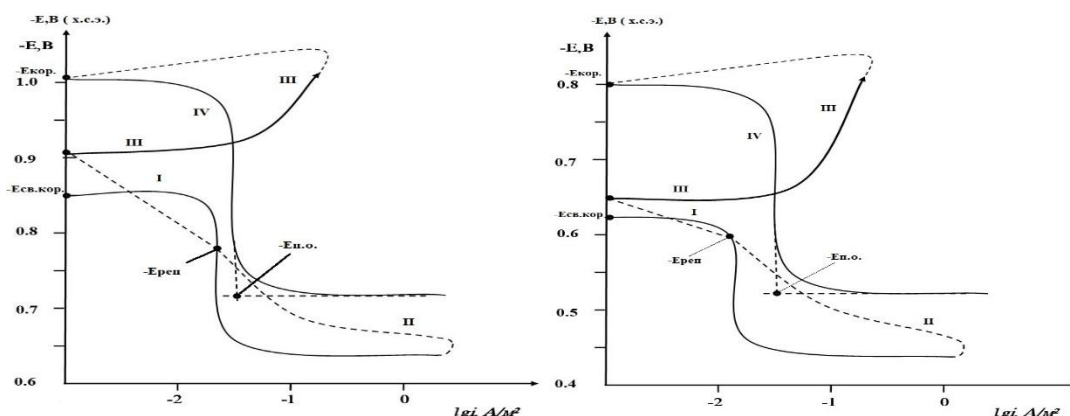


Рисунок 4. Полная поляризационная кривая алюминиевого сплава АК7 (а) и композиционного материала «Оксидаль», в среде электролита 3% NaCl.

Анодное поведение сплавов, исследовалось от концентрации электролита хлорида натрия (рис. 5). В таблице 2.4 и таблице 2.5 представлены результаты исследования.

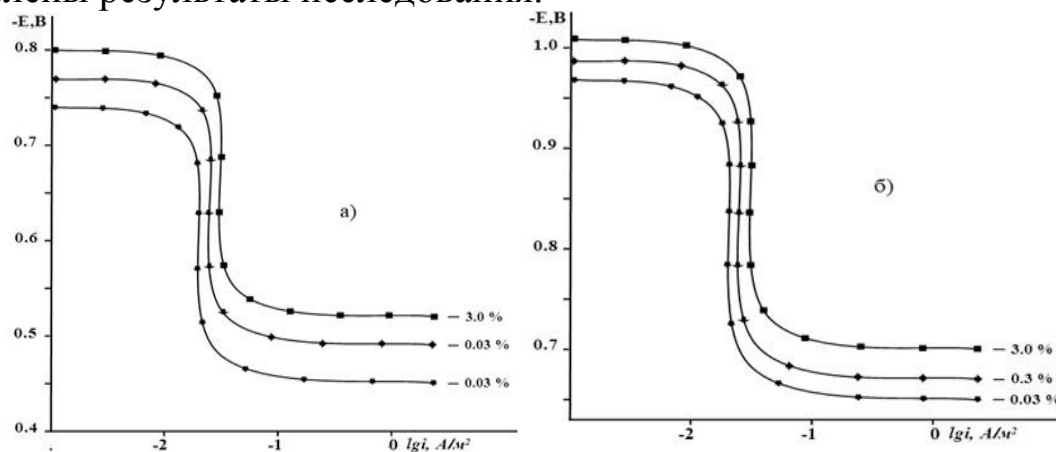


Рисунок 5. Потенциодинамические анодные поляризационные (2мВ/с) кривые алюминиевого сплава АК7 (а) и композиционного материала системы Al-Al₂O₃ (б) в среде электролита NaCl различной концентрации.

Из таблицы 5 видно, что повышение концентрации хлорид-иона приводит к повышению потенциала свободной коррозии ($-E_{св.кор.}$, В), питтингообразования ($-E_{п.о.}$) и скорости коррозии алюминиевого сплава АК7 и композиционного материала, что говорит о падении коррозионной устойчивости сплавов за счет влияния ионов хлора. Также выяснили, что увеличение концентрации электролита NaCl свыше 0.03 % приводит к репассивации поверхности исследованных образцов, что обусловлено действием хлорид-ионов.

Таблица 5. Коррозионно-электрохимические характеристики алюминиевого сплава АК7 и композиционного материала системы Al-Al₂O₃ в среде электролита NaCl

Среда NaCl, масс. %	Электрохимические потенциалы, В (х.с.э.)				Скорость коррозии	
	-E _{св.кор.}	-E _{кор.}	-E _{п.о.}	-E _{реп.}	i _{кор.} ·10 ² , А/м ²	K·10 ³ , г/м ² ·ч
0.03 %	0.770	0.970	0.650	0.725	2.6	8.71
0.3 %	0.810	0.990	0.670	0.750	3.0	10.05
3.0 %	0.850	1.010	0.701	0.775	3.6	12.06
0.03 %	0.541	0.740	0.450	0.530	1.7	5.69
0.3 %	0.580	0.770	0.490	0.560	2.1	7.03
3.0 %	0.620	0.800	0.520	0.590	2.8	9.38

Исходя из полученных результатов в таблице 5 можно заметить, что значения коррозионной стойкости композиционного материала «Оксидаль» выше чем у исходного сплава АК7, т.е. продувка алюминиевого сплава АК7 кислородом приводит к смещению потенциалов коррозии, репассивации и питингообразования к положительным значениям (табл. 6, 7 и 8).

Следует отметить, что во всех случаях при погружении образцов в раствор, потенциал коррозии спустя некоторое время смещается в положительную сторону и далее стабилизируется. При этом, если у исходного сплава АК7 стабилизация потенциала коррозии наблюдается в течение 40-45 минут, то у композиционного материала происходит в два раза быстрее, в течении 20-25 минут, что свидетельствует об относительно высокой их пассивации под воздействием находящихся в их составе оксида алюминия. Так, после одного часа выдержки в растворе электролита 0.03% NaCl потенциал коррозии алюминиевого сплава АК7 равнялся 0,770 В, а у композиционного материала «Оксидаль» 0,541 В (табл. 6).

Таблица 6. Зависимость коррозии алюминиевого сплава АК7 и композиционного материала системы Al-Al₂O₃, от концентрации электролита NaCl

Исследуемый материал	Концентрация NaCl, масс. %		
	0.03	0.3	3.0
АК7	0.770	0.810	0.850
Оксидаль	0.541	0.580	0.620

Таблица 7. Зависимость потенциала питтингообразования ($-E_{п.о.}$, В), алюминиевого сплава АК7 и композиционного материала системы Al-Al₂O₃ от электролита NaCl

Исследуемый материал	Концентрация NaCl, масс. %		
	0.03	0.3	3.0
АК7	0.650	0.670	0.701
«Оксидаль»	0.450	0.490	0.520

Таблица 8. Зависимость коррозии алюминиевого сплава АК7 и композиционного материала системы Al-Al₂O₃ от концентрации электролита NaCl

Исследуемый материал	Концентрация NaCl, масс. %					
	0.03		0.3		3.0	
	$i_{кор} \cdot 10^{-2}$ А/м ²	$K \cdot 10^{-3}$ г/м ² ·ч	$i_{кор} \cdot 10^{-2}$ А/м ²	$K \cdot 10^{-3}$ г/м ² ·ч	$i_{кор} \cdot 10^{-2}$ А/м ²	$K \cdot 10^{-3}$ г/м ² ·ч
АК7	2.6	8.71	3.0	10.05	3.6	12.06
«Оксидаль»	1.7	5.69	2.1	7.03	2.8	9.38

Таким образом, композиционный материал системы Al-Al₂O₃ «Оксидаль» характеризуется более низким значением скорости коррозии, чем исходный алюминиевый сплав - АК7.

4.3. Кинетика окисления композиционного материала системы Al-Al₂O₃ «Оксидаль»

Исследование кинетики окисления алюминиевого сплава марки АК7 и композиционного материала системы Al-Al₂O₃ «Оксидаль» проводили в атмосфере воздуха при температурах 723 К, 773 К и 873 К.

Кинетические и энергетические параметры процесса окисления данных сплавов приведены в таблицах 9 и 10 и на рисунках 6 и 7.

Кривые окисления сплавов характеризуются интенсивным ростом привеса массы образцов в первые 15-20 минут от начала окисления. Далее наступает стабилизация процесса, что связано с формированием защитной оксидной плёнки на поверхности реагирования (рис. 6).

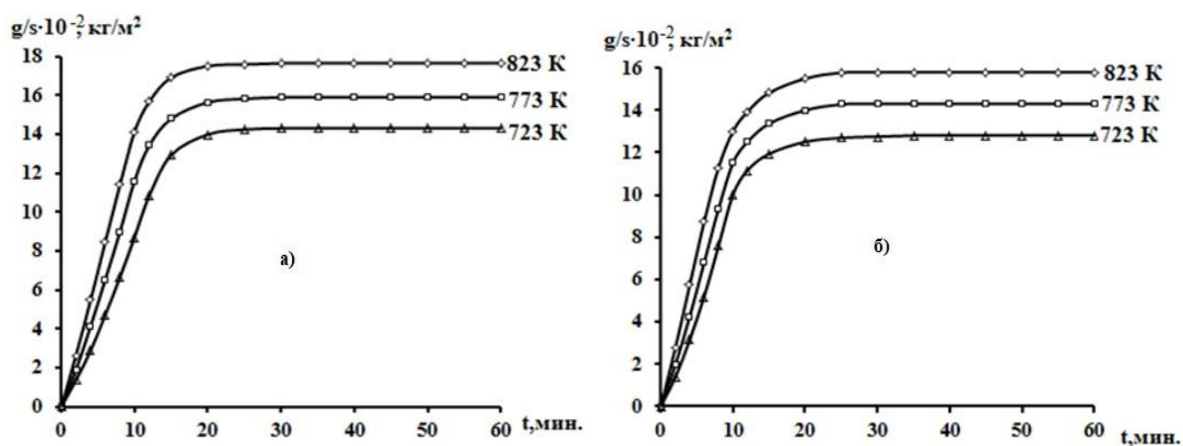


Рисунок 6. Кинетические кривые окисления алюминиевого сплава АК7 (а) композиционного материала системы Al-Al₂O₃ (б) в твёрдом состоянии.

Таблица 9. Кинетические и энергетические параметры процесса окисления алюминиевого сплава АК7 и композиционного материала системы Al-Al₂O₃, в твёрдом состоянии

Материал	Температура окисления, К	Истинная скорость окисления К·10 ⁴ , кг·м ⁻² ·с ⁻¹	Кажущаяся энергия активации, кДж/моль
АК7	723	2.39	106.5
	773	2.66	
	823	2.95	
«Оксидаль»	723	2.36	117.0
	773	2.61	
	823	2.90	

Формирующийся оксидная плёнка имеет равномерный монотонный рост и процесс окисления полностью предотвращается к 20 минутам и достигает значение равное $17.7 \cdot 10^{-4}$ кг/м² при 823 К. Эффективная энергия активации процесса окисления составляет 117.0 кДж/моль (табл. 9). Исследования показывают, что с ростом температуры средняя скорость окисления сплавов усиливается. На рисунке 4.13 графически представлена зависимость $\lg K$ от $1/T$ для сплава АК7 и композиционного материала системы Al-Al₂O₃.

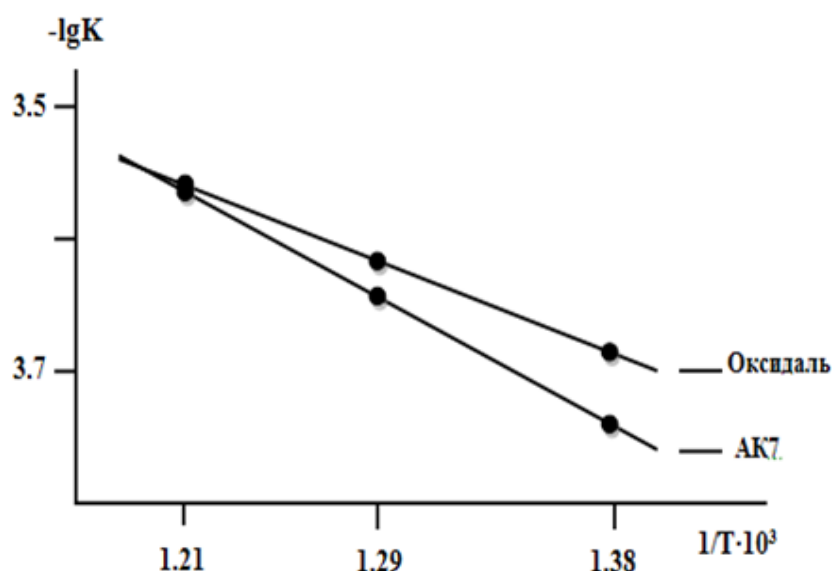


Рисунок 7. Зависимость $\lg K$ от $1/T$ для алюминиевого сплава АК7 и композиционного материала системы $Al-Al_2O_3$, в твёрдом состоянии.

Если сравнивать окисляемость алюминиевого сплава АК7 и композиционного материала системы $Al-Al_2O_3$, то мы видим, что в композиционном материале значение окисляемости ниже. Зависимость $\lg K-1/T$ представленная на рисунке 7, свидетельствует, о том, что процесс окисления при вышеуказанных температурах протекает по гиперболическому закону.

С помощью программы MS Excel обработали кривые окисления сплавов и определили зависимости $(g/s)^2 - \tau$ (рис. 8) для алюминиевого сплава АК7 и композиционного материала системы $Al-Al_2O_3$.

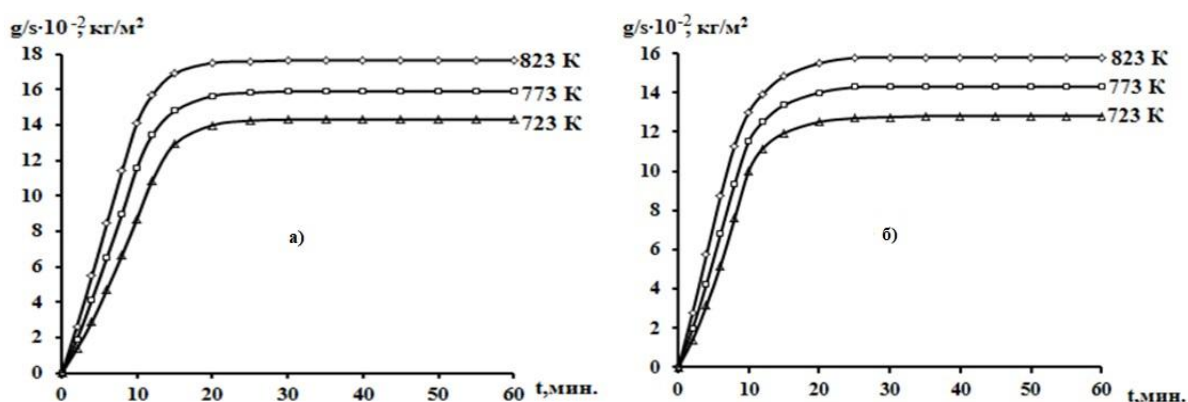


Рисунок 8. Квадратичные кривые окисления алюминиевого сплава АК7 (а) и композиционного материала системы $Al-Al_2O_3$ (б) в твёрдом состоянии.

Из рисунка 8 видно, что минимальная величина $\Delta g/s$ при окислении данного сплава составляет $1.6 \cdot 10^{-4} \text{ кг/м}^2$, а максимальная - $2.4 \cdot 10^{-4} \text{ кг/м}^2$, а эффективная энергия активации составляет 117.00 кДж/моль (табл. 9).

Диффузионный характер взаимодействия сплава с газовой фазой подтверждает, что кинетические кривые процесса окисления сплавов имеют параболический характер.

Таблица 10. Полиномы кривых окисления алюминиевого сплава АК7 и композиционного материала системы Al-Al₂O₃, в твёрдом состоянии

Материал	Температура окисления, К	Полиномы квадратичных кинетических кривых окисления сплавов	Коэффициент регрессии R ²
АК7	723	$y = -0,6 \cdot 10^{-3}x^4 + 0,6 \cdot 10^{-3}x^3 - 4,49 \cdot 10^{-2}x^2 + 1,2937x$	0,978
	773		0,987
	823	$y = -0,6 \cdot 10^{-6}x^4 + 1 \cdot 10^{-3}x^3 - 6,11 \cdot 10^{-2}x^2 + 1,5809x$	0,994
«Оксидаль»	723	$y = -0,5 \cdot 10^{-6}x^4 - 3 \cdot 10^{-3}x^3 - 36 \cdot 10^{-2}x^2 + 0,737x$	0,990
	773	$y = -0,5 \cdot 10^{-4}x^4 - 1 \cdot 10^{-3}x^3 - 0,6 \cdot 10^{-2}x^2 + 1,281x$	0,991
	823	$y = -0,5 \cdot 10^{-2}x^4 - 2 \cdot 10^{-3}x^3 - 49 \cdot 10^{-2}x^2 + 1,815x$	0,993

По результатам проведенных работ по изучению кинетики окисления алюминиевого сплава АК7 и композиционного материала системы Al-Al₂O₃ можно сделать выводы, что величина эффективной энергии активации при переходе от алюминиевого сплава АК7 к композиционному материалу «Оксидаль», увеличивается, вместе с этим устойчивость композиционного материала к высокотемпературному окислению растет. Следовательно, композиционный материал может быть рекомендован как коррозионностойкий материал.

ВЫВОДЫ

1. На основе анализа имеющихся в литературе сведений и проведенных исследований, был сделан вывод о возможности получения композиционного материала методом продувки кислородом насыщенного водородом алюминиевого расплава. В результате был получен композиционный материал системы Al-Al₂O₃, который является перспективным материалом с улучшенными свойствами.

2. Результаты полученные по итогу проведенных исследований вязкости композиционного материала свидетельствуют о том что вязкость композиционного материала системы Al-Al₂O₃ выше чем у исходного алюминиевого сплава АК7. Причиной повышения вязкости можно назвать изменения формы частиц от изотропной, также на вязкость влияет то что в результате разрушения оксидной пленки внутри расплава, образовывается остроугольная форма частиц, что по формуле и расчетам также приводят к увеличению значений вязкости.

3. Исследования по выявлению изменения прочности, которые были проведены на разрывной машине Instron 3382 показали значительное повышение прочности полученного композиционного материала по сравнению с исходным материалом. По результатам анализа оптической металлографии стало заметно, что доля эвтектики в сплаве не изменилась, дендритный параметр остался на том же уровне, поэтому повышение прочности сплава связано не с уменьшением размер зерна, а с измельчением интерметаллидных Fe-содержащих фаз и кристаллов Si, что обусловлено механическим препятствием их формированию.

4. Потенциостатическим методом в потенциодинамическом режиме со скоростью развертки потенциала 2 мВ/с исследовано анодное поведение композиционного материала системы Al-Al₂O₃. Показано что, коррозионная стойкость композиционного материала выше чем у исходного алюминиевого сплава АК7, в нейтральной среде электролита NaCl. т.е. модифицирование алюминиевого сплава АК7 приводит к смещению потенциалов коррозии, репассивации и питтингообразования к положительным значениям.

5. Методом термогравиметрии исследована кинетика окисления алюминиевого сплава АК7 и композиционного материала системы Al- Al-Al₂O₃. Установлено, что кинетические кривые процесса окисления сплавов имеют параболический характер. По результатам проведенных работ можно сделать выводы, что величина эффективной энергии активации при переходе от алюминиевого сплава АК7 к композиционному материалу, увеличивается, вместе с этим устойчивость композиционного материала к высокотемпературному окислению растет. Следовательно, композиционный материал может быть рекомендован как коррозионностойкий материал.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ

Статьи, опубликованные в научных журналах, рекомендованных ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации

1. Финкельштейн, А.Б. Вязкость жидкого алюмоматричного композита Al-7% Si + 5% Al₂O₃/ А.Б. Финкельштейн, О. А. Чикова, **М. Махмудзода**, Вьюхин В.В.//РАСПЛАВЫ 2018. –№ 4. Т. 2. –С. 384-389. (Scopus – Q3).
Finkelshtein, A.B. VISCOSITY OF A LIQUID AL-7% SI + 5% AL₂O₃ ALUMINUM MATRIX COMPOSITE MATERIAL/ А.Б. Finkelshtein, О.А. Chikova, **M. Makhmudzoda**, V.V. V'yukhin // Russian Metallurgy (Metally). –2019. Т. 2019. № 8. –С. 809-811. (Scopus – Q3).
2. Финкельштейн, А.Б. Новый алюминиевый композит Оксидаль/ А.Б. Финкельштейн, О. А. Чикова, А. А. Шефер, **М. Махмудзода** //Литейное производство. -2019. –№7. –С. 6-8.

3. **Махмудзода, М.** Кинетика окисления алюминиевого сплава АК7 и композиционного материала на основе алюминия Al–Al₂O₃ («Оксидаль») в твердом состоянии/ **М. Махмудзода, Б. Б. Эшов, И. Н. Ганиев, Дж. Х. Джайлоев, Ф.А. Рахимов**// ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» Ползуновский вестник. - 2022. -№ 4. Т. 2. –С. 159-165.

4. **Махмудзода М.** Анодное поведение алюминиевого сплава АК7 и композиционного материала системы Al–Al₂O₃, в среде раствора электролита NaCl/ **М. Махмудзода, Б. Б. Эшов, Дж. Х. Джайлоев**// *Металлург.* -2023. -№ 10. -С. 25-29.

Mahmudzoda, M. Anodic behavior of AK7 aluminum alloy and composite material of the Al–Al₂O₃ system within an NaCl electrolyte solution medium./ **M. Mahmudzoda, B. B. Eshov, J. N. Dzhalilov**/ *Metallurgist*, Vol. 67, Nos. 9-10, January, 2024 (Russian Original Nos. 9-10, September-October, 2023) (**Scopus - Q3**).

Изобретения по теме диссертации:

5. **Махмудзода, М.** Малый патент Республики Таджикистан № TJ 1404 от 14.02.2023 г. «Композиционный материал системы Al–Al₂O₃» **М. Махмудзода, Б. Б. Эшов, И. Н. Ганиев, Дж. Х. Джайлоев, Ф.А. Рахимов** // №2301798; заявл. 14.02.2023г., опубл. 03.07.2023. (Акт опытно-промышленного испытания «Композиционный материал системы Al–Al₂O₃» от 14.01.2024г.)

Статьи, опубликованные в материалах международных и республиканских конференций:

6. Финкельштейн А.Б. Оксидаль/ **А.Б. Финкельштейн, О. А. Чикова, А. А. Шефер, М. Махмудзода** // *Инновационные технологии в литейном производстве. Сборник трудов Международной научно-технической конференции, посвящённой 150-летию факультета «Машиностроительные технологии» и кафедры «Технологии обработки материалов» МГТУ им. Н. Э. Баумана (22–23 апреля 2019 г., Москва) – М.: ИИУ МГОУ, –2019. – С. 129-134.*

7. Финкельштейн А.Б. Формирование композиционного материала методом продувки гидрогенизированного алюминиевого расплава кислородом // **Финкельштейн А.Б., Шефер А. А., Махмудзода М.**// *Наследственность в литейно-металлургических процессах: Материалы 8-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием / отв. редактор проф. В.И. Никитин. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, –2018. –С. 433-438*

8. Finkelshtein A.B. Strength of oxide skin on aluminum melts/ **A.B. Finkelshtein, O.A. Chikova, M. Makhmudzoda, V.V. V'yukhin** // *The Ninth International Conference on Material Technologies and Modeling MMT-2016 (Израиль 2016) Израиль. –2016. –С. 26-31*

9. **Махмудзода, М.** Анодное поведение композиционного материала системы Al-Al₂O₃ (Оксидаль) полученного на основе сплава АК7, в среде электролита NaCl/ **М. Махмудзода, Б. Б. Эшов, И. Н. Ганиев, Дж. Х. Джайлоев, А. А. Шефер**// Республиканская научно практическая конференция «Современные проблемы естественных наук», (Душанбе, 26 мая 2021 г.), РТСУ, –2021. –С. 9-12
10. **Махмудзода, М.** Исследование механических свойств алюмоматричного композиционного материала / **М. Махмудзода, Дж. Х. Джайлоев, Б.Б. Эшов**// Материалы международной научной конференции на тему “Развитие энергетической области в республике Таджикистан”, - Душанбе. -2023. –С 88-90
11. **Махмудзода, М.** Потенциодинамическое исследование композиционного материала системы Al-Al₂O₃, в среде электролита NaCl / **М. Махмудзода, Б. Б. Эшов, И. Н. Ганиев, Дж. Х. Джайлоев, А. А. Шефер**// Роль Российско-Таджикского (Славянского) университета в становлении и развитии науки и инновационного образования в Республике Таджикистан: материалы международной научно-практической конференции (Душанбе, 15-16 октября 2021 г.). Ч. II. – Душанбе: РТСУ, –2021. –С. 51-54
12. **Махмудзода, М.** Изменения потенциала свободной коррозии композиционного материала системы Al-Al₂O₃/ **М. Махмудзода, Б. Б. Эшов, И. Н. Ганиев, Дж. Х. Джайлоев**// Научно практическая конференция «Фундаментальная наука – основа совершенствования технологий и материалов» ГНУ «Центр исследования инновационных технологий» при НАНТ - Душанбе. –2021. –С. 59-61
13. **Махмудзода, М.** Свойства оксид-алюминиевого композиционного материала/ **М. Махмудзода, Б. Б. Эшов, И. Н. Ганиев, А. А. Шефер**// Международная научно-практическая конференция «XII Ломоносовские чтения» МГУ Ф Душанбе - Душанбе. –2022. –С. 180-181
14. **Махмудзода, М.** Анодное поведение композиционного материала системы Al₂O₃, в среде электролита NaCl / **М. Махмудзода, Б. Б. Эшов, Дж. Х. Джайлоев, А. А. Шефер**// Материалы II международной научной конференции «инновационное развитие науки» - Душанбе. –2022. –С. 41-46
15. **Махмудзода, М.** Электрохимические исследования коррозионных свойств композиционного материала с содержанием 1,0% железа / **М. Махмудзода, Дж. Х. Джайлоев**// XVII Нумановские чтения. Результаты инновационных исследований в области химических и технических наук в XXI веке - Душанбе. –2022. –С. 131-133
16. **Махмудзода, М.** Исследование механических свойств оксид-алюминиевого композита/ **М. Махмудзода, Б. Б. Эшов, И. Н. Ганиев, Дж. Х. Джайлоев**// «Современные проблемы естествознания в науке и образовательном процессе», посвященная двадцатилетию изучения и развития естественных, точных и математических наук РТСУ - Душанбе. –2022. –С. 155-157

17. **Махмудзода, М.** Исследование потенциала коррозии композиционного материала системы Al–Al₂O₃ в среде электролита NaCl / М. Махмудзода// Международная научно-практическая конференция «XIII Ломоносовские чтения» МГУ Ф Душанбе - Душанбе. –2023. –С. 196-199
18. **Махмудзода, М.** Исследование кинетики окисления нового композиционного материала системы Al-Al₂O₃ («Оксидаль») в твердом состоянии/ М. Махмудзода, Дж. Х. Джайлоев//VIII Международная научно-практическая конференция под названием «Роль молодых учёных в развитии науки, инноваций и технологий» - Душанбе. –2023. –С. 50-52
19. **Mahmudzoda, M.** Investigation of electrochemical corrosion properties of a new composite material obtained based on aluminum /M. Mahmudzoda., V.B. Eshov, J.H. Jayloev, R.A. Ismoilov// Материалы Республиканской научно-практической конференции «Развитие и достижения физической науки в годы независимости», посвященной 32-летию Государственной независимости Республики Таджикистан (25-26 августа 2023 г.). - Душанбе: –2023, –С. 131-133.