

На правах рукописи



**Махан Хамид Мохаммед Махан**

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ  
АЛЮМОМАТРИЧНЫХ КОМПОЗИТОВ, АРМИРОВАННЫХ  
ЧАСТИЦАМИ TiO<sub>2</sub>**

Специальность 2.6.17. Материаловедение (технические науки)

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Самара – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева»

**Научный руководитель:** Коновалов Сергей Валерьевич  
доктор технических наук, профессор

**Официальные оппоненты:** Белов Николай Александрович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник кафедры «Обработка металлов давлением» ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

Жуков Илья Александрович, доктор технических наук, заведующий лабораторией нанотехнологий металлургии ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет»

**Ведущая организация:** Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет»

Защита состоится « 21 » июня 2024 года в 14 часов 00 мин. на заседании объединенного диссертационного совета 99.2.039.02 на базе ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» по адресу: г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, ауд. 200.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» и на сайте: <https://d99203902.samgtu.ru/spisok-dissertatsii>

Отзывы на автореферат просьба высылать по адресу: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», главный корпус, ученому секретарю диссертационного совета 99.2.039.02.

Автореферат разослан « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 г.

**Ученый секретарь  
диссертационного совета**



**Луц Альфия Расимовна**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Алюминиевые сплавы серии 2xxx обладают высокой прочностью, отличной коррозионной стойкостью, низкой плотностью и хорошей формруемостью. Благодаря этим преимуществам они являются наиболее подходящими для изготовления элементов конструкций транспортных средств. В последние десятилетия в области разработки функциональных материалов приоритет сместился от простых материалов к композиционным. Композиционные материалы (КМ) обладают низкой плотностью, высокой прочностью и демонстрируют превосходную стойкость к нагрузкам. Кроме того, они производятся сравнительно недорого и позволяют использовать изделия из них при повышенных температурах.

Композиты с металлической матрицей, разработанные в последние годы, обладают рядом уникальных механических свойств, таких как: низкая плотность, высокая прочность, высокая жесткость и высокая износостойкость. Важнейшей целью последних разработок в данной области является создание металлических особо легких КМ и КМ со сбалансированной комбинацией прочности и жесткости, что уменьшит образование трещин и дефектов, но в то же время увеличит статические и динамические механические свойства.

Сплавы на основе алюминия занимают особое место в развитии авиакосмической, автомобильной, судостроительной и других отраслей промышленности. Для того, чтобы соответствовать возрастающим эксплуатационным требованиям, алюминиевые сплавы должны обладать большей удельной прочностью, износостойкостью и твердостью.

Учитывая вышесказанное, представляется актуальным комплексное изучение эволюции фазового состава, структуры и свойств сплавов системы AA2024 при их использовании в качестве матричных при создании КМ вследствие их совместного и раздельного легирования эвтектикообразующими элементами группы Al, Cu, Mg, а также Fe и Si, и армирования наноразмерными частицами  $TiO_2$ .

Такое исследование позволит создать научную базу для разработки новых перспективных экономнолегированных литейных и деформируемых сплавов и КМ и совершенствования процессов легирования, модифицирования и армирования алюминиевых сплавов, имеющее научное и прикладное значение. При этом важно установить закономерности влияния, как известных прутковых лигатур на основе систем AA2024/ $TiO_2$ , так и синтезированных лигатур на основе алюминия с ультрадисперсными наноразмерными частицами  $TiO_2$  на процесс кристаллизации сплавов на основе сплава AA2024.

**Цель и задачи.** Улучшение механических и эксплуатационных свойств литых композиционных материалов на основе алюминиевого сплава AA2024 за счёт его армирования наночастицами  $TiO_2$  и последующей термической обработки. Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи:

- 1) Изучение влияния добавления наночастиц  $TiO_2$  на процесс кристаллизации расплава, микроструктуру и фазовый состав литых слитков из алюминиевого сплава AA2024.

2) Изучение влияния добавления наночастиц  $TiO_2$  на механические свойства (микротвердость, твердость, свойства при растяжении, ударную вязкость, усталость), а также на такое эксплуатационное свойство как износостойкость алюмокомпозитов системы AA2024/ $TiO_2$ .

3) Исследование влияния термической обработки на микроструктуру и фазовый состав алюмокомпозитов AA2024 с керамическими наночастицами  $TiO_2$ .

4) Исследование влияния термической обработки на механические свойства и износостойкость алюмокомпозитов AA2024 с керамическими наночастицами  $TiO_2$ .

5) Повышение эффективности процесса получения слитков алюмокомпозитов с интегрированными наночастицами, полученных методом литья с перемешиванием.

### **Научная новизна**

1) Впервые проведены комплексные экспериментальные исследования фазового состава, структуры и механических свойств сплава AA2024 с интегрированными наночастицами  $TiO_2$ , изготовленного литьем в металлические формы.

2) Выявлено влияние добавления армирующих материалов (наночастиц) на процесс кристаллизации расплава и зеренную структуру литых слитков из многокомпонентных алюминиевых сплавов.

3) Впервые установлено, что армирующие керамические наночастицы находятся как внутри зерна, так и по границам зерен алюмокомпозитов системы AA2024/ $TiO_2$ .

4) Впервые установлена эффективность процесса литья с перемешиванием для получения композитов AA2024/ $TiO_2$ . Наночастицы равномерно диспергированы в матрице сплава, обеспечивая хорошую межфазную связь и улучшая механические и служебные свойства материала.

5) Впервые показано улучшение усталостных свойств и износостойкости при сочетании термической обработки и добавлении наночастиц  $TiO_2$  за счет уменьшения степени повреждения, вызванного износом, и минимизации потерь материала. Выявлена оптимальная концентрация наночастиц 5 масс. %  $TiO_2$ , при которой композит показал повышенную усталостную долговечность и износостойкость.

6) Впервые показана целесообразность введения армирующих наноразмерных керамических частиц диоксида титана  $TiO_2$  в количестве 5 масс.%, их введение увеличивает прочность алюминиевых композитов на 30-50 %, а также повышает другие механические свойства с хорошим высокодисперсным распределением частиц в конечной структуре алюминиевых композитов. Наночастицы  $TiO_2$  могут служить препятствием для распространения трещин, что в итоге повышает механические свойства композитов.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

Исследование алюминиевых композитов с армированием наночастицами  $TiO_2$  может привести к созданию новых материалов с улучшенными свойствами.

Рассмотрено влияние термической обработки на их механические свойства. Практическая значимость заключается в оптимизации свойств алюминиевых композитов AA2024/TiO<sub>2</sub>, что позволяет создавать материалы с повышенной прочностью, легкостью и другими характеристиками. Такие улучшения могут найти применение в различных отраслях промышленности, где требуются легкие, прочные и стойкие к разрушению материалы.

Результаты диссертации апробированы при проведении научных исследований в Самарском национальном исследовательском университете имени академика С.П. Королева и в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Материаловедение и технологии материалов», режимы получения алюмоматричных композитов и их состав рекомендованы к практическому внедрению ООО «Вест 2002».

### **Методология и методы исследования**

При выполнении работы были использованы современные методики и оборудование для получения алюминиевых композитов, армированных частицами TiO<sub>2</sub>. Экспериментальные исследования проводились с использованием аналитического и испытательного оборудования кафедры технологии металлов и авиационного материаловедения Самарского университета и ЦКП «Материаловедение» при Сибирском государственном индустриальном университете. Использовались оптический микроскоп METAM PB-34, растровые электронные микроскопы Phillips SEM 515 с приставкой для микрорентгеноспектрального анализа EDAX ECON IV, Tesla BS-301, SUPRA 55, TESCAN VEGA с энергодисперсионным детектором INCAx-act. Фазовый состав и состояние дефектной субструктуры материала были проанализированы методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии (JEM-2100F) и рентгеноструктурного анализа (ДРОН-7). Для анализа микротвердости использовался микротвердомер HV-1000. Трибологические свойства (износостойкость и коэффициент трения) изучались в геометрии диск-штифт с помощью трибометра (Pin-On-Disc, Oscillating TRIBO tester) при комнатной температуре и влажности. Испытания на растяжение осуществлялись на плоских пропорциональных образцах в виде двухсторонних лопаток на установке Instron 3369.

### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Закономерности влияния добавления армирующих наночастиц TiO<sub>2</sub> на микроструктуру и фазовый состав образцов сплава AA2024.
2. Закономерности изменения совокупности механических свойств (микротвердости, твердости, свойств при растяжении, ударной вязкости, усталости) вследствие воздействия наночастиц TiO<sub>2</sub> в сплаве AA2024.
3. Результаты влияния наночастиц на изменение трибологического свойства – износостойкости сплава AA2024.
4. Совокупность экспериментальных данных исследования влияния термической обработки на механические и трибологические свойства алюминиевого сплава AA2024, армированного наночастицами TiO<sub>2</sub>.

### **Степень достоверности и апробация результатов**

Достоверность результатов работы определяется корректностью

поставленных задач, использованием апробированных методов и методик исследования, применяемых в современном материаловедении, большим объемом экспериментальных данных, их сопоставлением между собой и с результатами, полученными другими исследователями.

Результаты исследования докладывались и обсуждались на конференциях: международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященная 170-летию со дня рождения В.Г. Шухова (2023 г.), международная научно-техническая конференция имени Н.Д. Кузнецова «Перспективы развития двигателестроения» (2023 г.), V международная научно-практическая конференция «Наука и технологии: Перспективы развития и применения» (2023 г.).

**Публикации.** Результаты работы представлены в 11 публикациях, включая печатные работы в сборниках трудов конференций и семинаров. Из них 2 статьи опубликованы в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК РФ, и 5 статей опубликованы в изданиях, входящих в библиографические базы Scopus и Web of Science. Список основных работ приведен в конце автореферата.

**Личный вклад.** Автор принимал непосредственное участие в обсуждении и постановке задач исследования, анализе результатов и литературных данных. Все экспериментальные результаты и исследовательские работы, включенные в диссертационную работу, получены либо самим автором, либо при его непосредственном участии. Анализ полученных результатов и подготовка публикаций были выполнены при участии соавторов. Формулирование основных выводов и положений, выносимых на защиту, осуществлялось автором.

#### **Соответствие диссертации паспорту специальности.**

Диссертационная работа по своим целям, задачам, содержанию, методам исследования и научной новизне соответствует паспорту специальности 2.6.17 **Материаловедение** (отрасль науки – технические, химические) по п.1 «Разработка новых металлических, неметаллических и композиционных материалов, в том числе капиллярно-пористых, с заданным комплексом свойств путем установления фундаментальных закономерностей влияния дисперсности, состава, структуры, технологии, а также эксплуатационных и иных факторов на функциональные свойства материалов. Теоретические и экспериментальные исследования фундаментальных связей состава и структуры металлических, неметаллических материалов и композитов с комплексом физико-механических и эксплуатационных свойств с целью обеспечения надежности и долговечности деталей, изделий, машин и конструкций (химической, нефтехимической, энергетической, машиностроительной, легкой, текстильной, строительной)», п.2 «Установление закономерностей физико-химических и физико-механических процессов, происходящих в гетерогенных и композиционных структурах»

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, основных выводов и списка литературы, включающего 147 источников. Общий объем диссертации составляет 133 страницы, в том числе 51 рисунок и 10 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, степень ее разработанности, приведены цель и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы исследования, перечислены основные положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов, указан личный вклад автора, соответствие паспорту специальности, структура и объем диссертации.

**В первой главе «Анализ способов получения, модификации, свойств и структуры алюмоматричных композиционных материалов»**, являющейся обзорной, приведен анализ опубликованных работ по теме диссертационной работы. Рассмотрены основные методы и технологии получения алюмоматричных композиционных материалов, армированных наночастицами, и проведен анализ этих композиционных материалов, полученных методом литья с перемешиванием, и изменения их структуры, механических и трибологических свойств, включая усталостную долговечность и износостойкость. На основании проведенного анализа литературы обоснована цель работы, поставлены задачи, выбраны методы исследования и определена система алюминиевых композиционных сплавов для изготовления.

**Во второй главе «Материалы и методы проведения исследований»** описаны свойства применяемых материалов, характеристики оборудования, на котором проводились исследования с описанием методик проведения экспериментов.

В качестве основного (матричного) материала для исследований использован алюминиевый сплав AA2024 (93,3 % Al; 4,5 % Cu; 1,2 % Mg; 0,78 % Mn; 0,18 %, Zn; 0,02 % Ti; 0,02 % Fe масс.%). Алюминиевый сплав AA2024 подвергнулся процессу плавления при температуре 700 С в графитовом тигле с использованием электропечи. Затем добавлялся порошок  $TiO_2$  с размером частиц 30-50 нм в диапазоне концентраций от 2,5 % до 7,5% от массы алюминиевого сплава. Каждый из расплавленных образцов подвергался механическому перемешиванию в течение 4 минут при скорости вращения 200 оборотов в минуту. Следующим этапом было заливание расплавленного металла в стальную форму. Этот процесс обеспечивал равномерное распределение частиц  $TiO_2$  внутри алюминиевой матрицы, что далее позволяло получить окончательные образцы композитного материала. Для сравнения свойств был также изготовлен образец без добавления порошка оксида титана. Затем была исследована термическая обработка с нагревом до 500 °С с выдержкой в течение 3 ч, закалкой в воду и последующим старением при 185 °С в течение 3 ч.

Определение механических и трибологических свойств проводилось в соответствии с международными стандартами (ASTM). Для определения твердости образцов использовали твердомер. Для исследования микроструктуры образцов использовали растровые электронные микроскопы. Реактив Кролла ( $H_2O:HNO_3:HF=92:6:2$ ) использовали для травления образцов в поперечном сечении в течение 15 с, механические свойства (предел прочности) определяли с помощью универсальной машины для механических испытаний.

Для изучения структуры фаз и выделений был выполнен рентгенофазовый анализ. Для оценки ударной вязкости разработанных композитов испытание на удар по Шарпи проводили в соответствии с ASTM-E23. В соответствии со стандартами ASTM G 99-95 скорость износа образцов с размерами 30x10 мм оценивали с помощью штифта на измерителе износа дискового типа. Для определения усталостной прочности материала были проведены усталостные испытания. Машина для испытаний на усталость с вращением и изгибом HI-TECH была использована для обеспечения того, чтобы все образцы на усталость подвергались нагрузкам с постоянной и переменной амплитудой. Во всех случаях проведена статистическая обработка результатов.

В третьей главе «Исследование влияния наночастиц на микроструктуру и свойства алюмоматричного композита AA2024/TiO<sub>2</sub>» представлены результаты исследований микроструктуры на оптическом микроскопе. На рисунке 1 показаны изображения микроструктуры четырех образцов с различным массовым процентным содержанием TiO<sub>2</sub>. Микроструктура состоит из однофазных интерметаллических химических соединений (Al<sub>3</sub>TiCu и Al<sub>9</sub>TiFe) и мелких включений, рассеянных по всей структуре. Можно отметить, что наиболее однородные выделения наблюдаются при 2,5 и 5 % масс. TiO<sub>2</sub>. Равномерное распределение этих частиц и меньшая пористость привели к улучшению механических свойств алюминиевого композитного материала по сравнению с литой матрицей. Размер зерна рассчитывали с использованием программного обеспечения JMicrovision. Расчеты показали, что исходный образец композита AA2024/TiO<sub>2</sub> имеет средний размер зерна около 55 мкм. Добавление 2,5 мас.% наночастиц TiO<sub>2</sub> приводит к существенному уменьшению среднего размера зерна до 37 мкм, а увеличение содержания TiO<sub>2</sub> до 5 мас.% приводит к дальнейшему уменьшению размера зерна до 24 мкм. Но при 7,5 мас.% наночастиц TiO<sub>2</sub> размер зерна возрастает до 31 мкм.

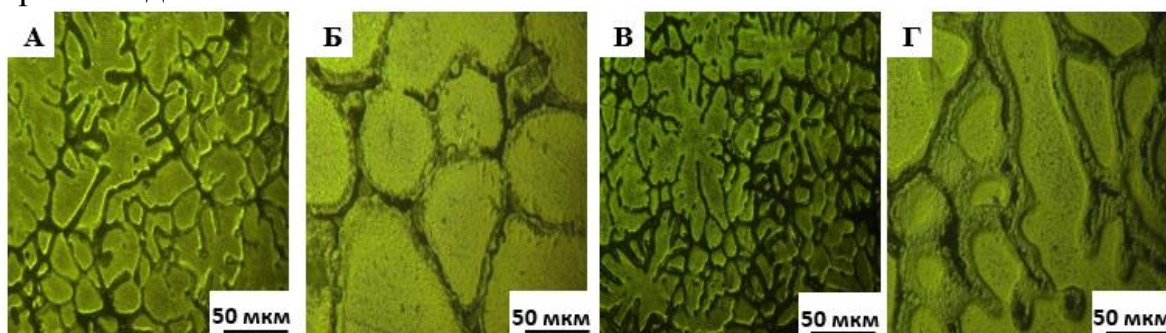


Рисунок 1 – Результаты оптической микроскопии при содержании:  
А) 0 % TiO<sub>2</sub>; Б) 2,5 % TiO<sub>2</sub>; В) 5 % TiO<sub>2</sub>; Г) 7,5 % TiO<sub>2</sub>

В ходе исследования методами СЭМ (рисунок 2) была проанализирована микроструктура и обнаружены однофазные интерметаллические соединения. Было обнаружено, что добавление наночастиц TiO<sub>2</sub> приводит к измельчению включений и их более равномерному распределению по микроструктуре. В результате высокой температуры растворения этих интерметаллических соединений вокруг междендритной зоны, в материале образовались фазы



$Al_2CuMg$ ,  $Al_2Cu$  и  $Al$ . Также были образованы интерметаллические соединения  $Al_2TiCu$  и  $Al_9TiFe$ . Благодаря добавлению 5% оксида титана и происходит замещение меди в кристаллической структуре алюминида титана.

На рисунке 3 представлены результаты испытаний на растяжение и твердость полученных образцов с различной массовой долей армирующих частиц  $TiO_2$ . Исходный образец алюминиевого сплава AA2024 имеет предел прочности при растяжении  $\sigma_B = 225$  МПа и относительное удлинение до разрушения на уровне 16%. Добавление 2,5 масс.% наночастиц  $TiO_2$  приводит к существенному увеличению  $\sigma_B$  на 31%, - до 295 МПа и относительного удлинения до значения 17%. Увеличение содержания  $TiO_2$  до 5 масс.% приводит к максимальному значению предела прочности  $\sigma_B = 330$  МПа, при этом относительное удлинение также достигает максимального значения 19%. При последующем увеличении содержания  $TiO_2$  до 7,5 масс.% предел прочности и относительное удлинение уже снижаются до значений 310 МПа и 18%. На рисунке 3б представлены графики зависимости твердости по Виккерсу от массового содержания  $TiO_2$ . Добавление 2,5 масс. % и 5 масс. %  $TiO_2$  повышает твердость на 28 и 57 % соответственно, но добавление 7,5 масс. %  $TiO_2$  снижает твердость на 14 % по сравнению с композитом, в котором содержится 5% наночастиц  $TiO_2$ .

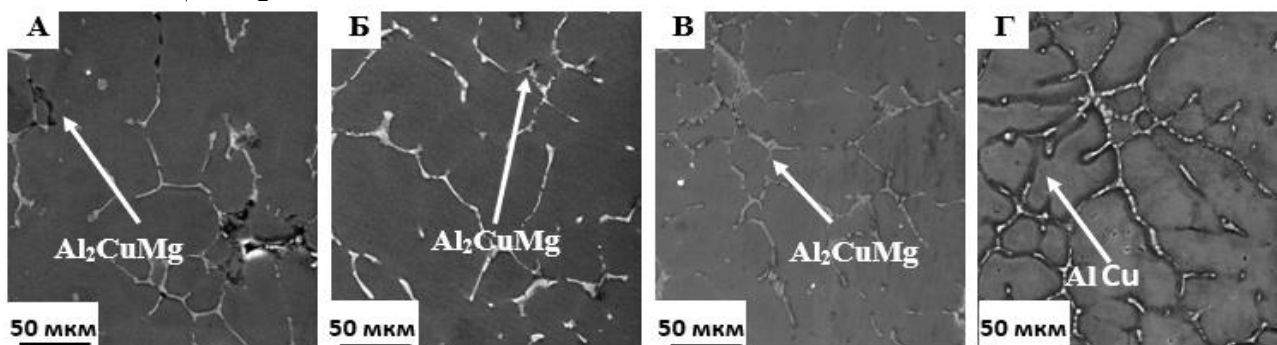


Рисунок 2 – Микроструктура композита (результаты СЭМ):  
А) 0 %  $TiO_2$ ; Б) 2,5 %  $TiO_2$ ; В) 5 %  $TiO_2$ ; Г) 7,5 %  $TiO_2$

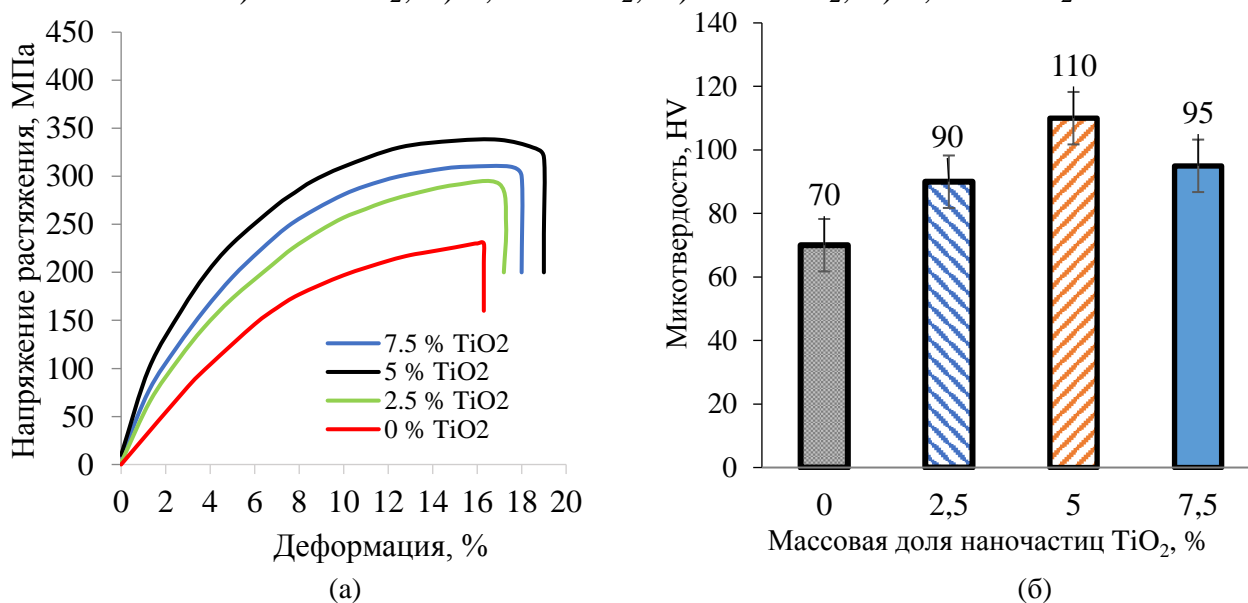


Рисунок 3 – Кривые растяжения (а) и твердости по Виккерсу (б) алюминиевого композита AA2024/ $TiO_2$  до термообработки

Согласно рентгенограммам алюминиевого композита AA2024/TiO<sub>2</sub>, представленным на рисунке 4, интенсивность и уширение пиков постепенно возрастают с увеличением количества TiO<sub>2</sub>. Пики, относящиеся к Al, наблюдаются при 38,50°, 44,64°, 65,14°, 78,18° и 82,5°. Основные пики выделений второй фазы относятся к CuAl<sub>2</sub> и CuAl<sub>2</sub>Mg. Однако пики, относящиеся к наночастицам TiO<sub>2</sub>, имеют низкую интенсивность даже при увеличении их массовой доли до 7,5%. Количественная обработка дифрактограмм показывает несколько меньшее содержание фазы TiO<sub>2</sub> в композитах по сравнению с количеством вводимых в расплав наночастиц TiO<sub>2</sub>, соответственно: 2,4 % и 2,5 %, 4,4 % и 5 %, 5,2 % и 7,5 %. Эти результаты свидетельствуют о хорошем усвоении вводимых наночастиц TiO<sub>2</sub> расплавом матричного композита AA2024/TiO<sub>2</sub> при их введении до 5% и заметно хуже при 7,5%.

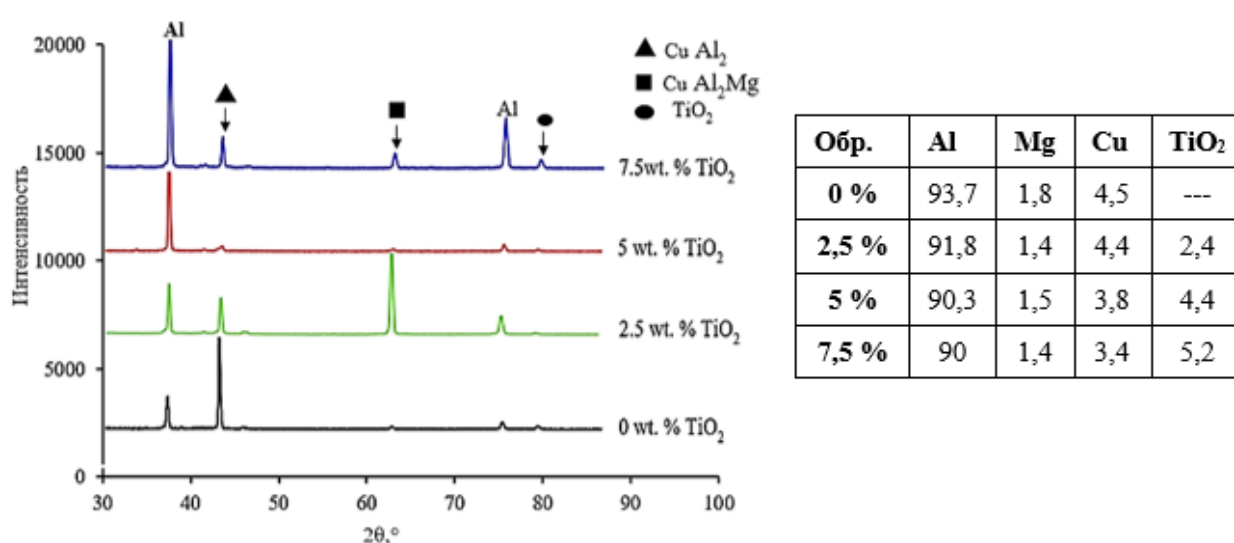


Рисунок 4 – Рентгеновские дифрактограммы алюминиевого композита системы AA2024/TiO<sub>2</sub> при введении наночастиц

Добавление наночастиц в алюминиевые сплавы значительно увеличивает их механические свойства, особенно ударную вязкость (рисунок 5). При достижении концентрации наночастиц TiO<sub>2</sub> на уровне 5%, наблюдается максимальное увеличение показателей ударной прочности алюминиевого сплава. Такое упрочнение можно объяснить тем, что наночастицы эффективно диспергируются в матрице, приводя к равномерному распределению и предотвращая образование больших трещин при ударе. Кроме того, межфазная связь между наночастицами и алюминиевой матрицей повышает способность материала поглощать энергию, позволяя ему рассеивать силы удара и снижать риск разрушения.

Внедрение наночастиц TiO<sub>2</sub> в алюминиевые сплавы существенно повышает их износостойкость при увеличении концентрации наночастиц TiO<sub>2</sub> до 5% (рисунок 6). Это улучшение объясняется усиливающим воздействием наночастиц, которые действуют как преграды для движения дислокаций и вследствие увеличения твердости уменьшают контактную площадь между

скользящими поверхностями трения.

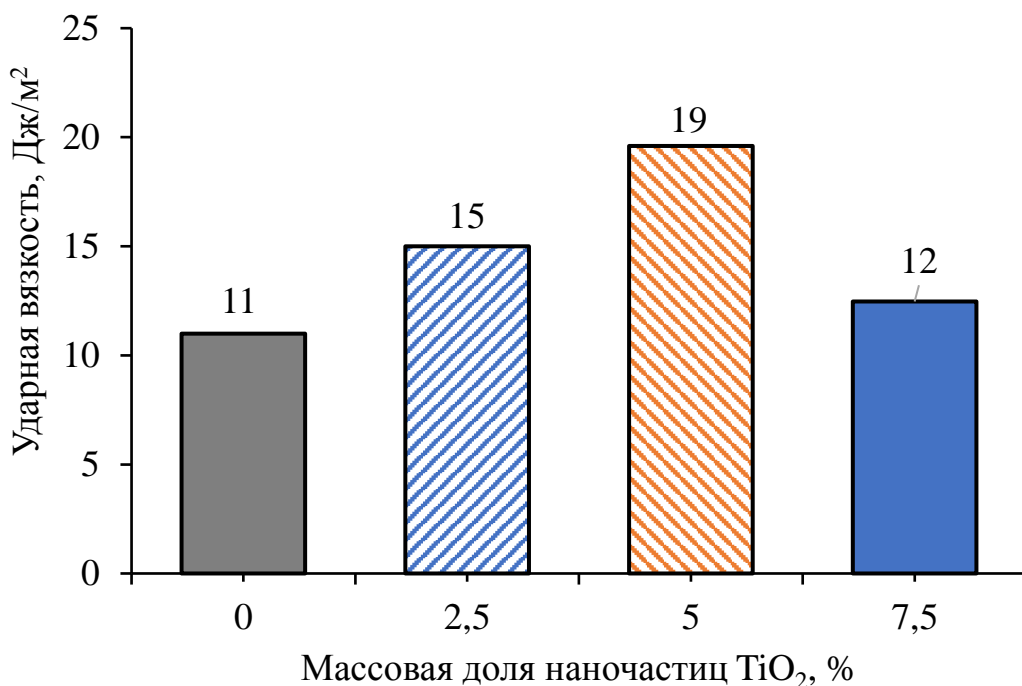


Рисунок 5 – Ударная вязкость алюминиевого композита АА2024/TiO<sub>2</sub> при введении наночастиц (0; 2,5; 5 и 7,5 % масс. TiO<sub>2</sub>)

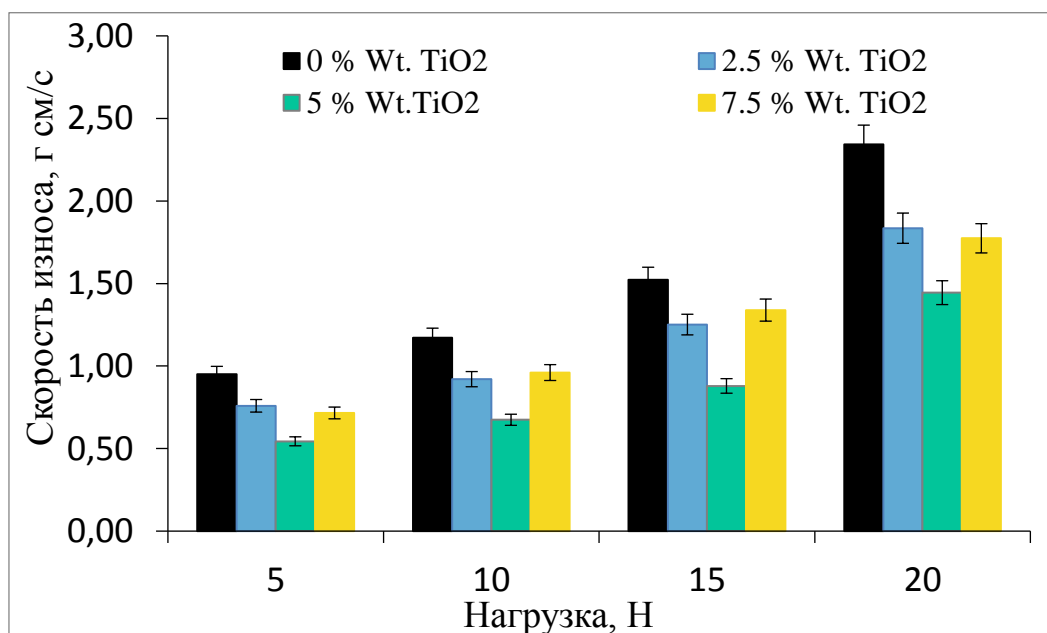


Рисунок 6 – Значения скорости износа композита АА2024/TiO<sub>2</sub> при различном содержании наночастиц TiO<sub>2</sub> и при различных нагрузках

На рисунке 7 показаны СЭМ-изображения поверхностей износа с различными характеристиками, указывающими на различные механизмы, влияющие на скорость износа. Процесс преобразования крупных канавок в более мелкие царапины вдоль направления скольжения свидетельствует о смене абразивного износа на адгезионный износ. Увеличение концентрации наночастиц TiO<sub>2</sub> в матричной основе привело к образованию механического

смешанного слоя, который является барьером для движения дислокаций и способствует улучшению износостойкости.

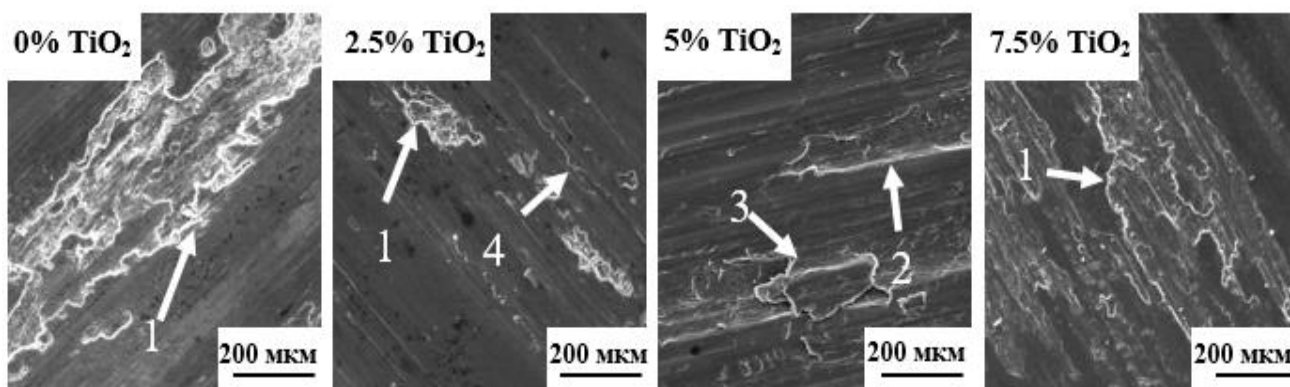


Рисунок 7 – Морфология поверхности износа композитов AA2024/TiO<sub>2</sub> при нагрузке 20 Н (1 – неглубокие царапины, 2 – микроцарапины, 3 – царапины, 4 – микроборозда)

На рисунке 8 показано, что добавление наночастиц TiO<sub>2</sub> приводит к улучшению усталостных характеристик алюминиевого сплава AA2024. Наиболее заметное улучшение достигается при содержании TiO<sub>2</sub> 5% мас.

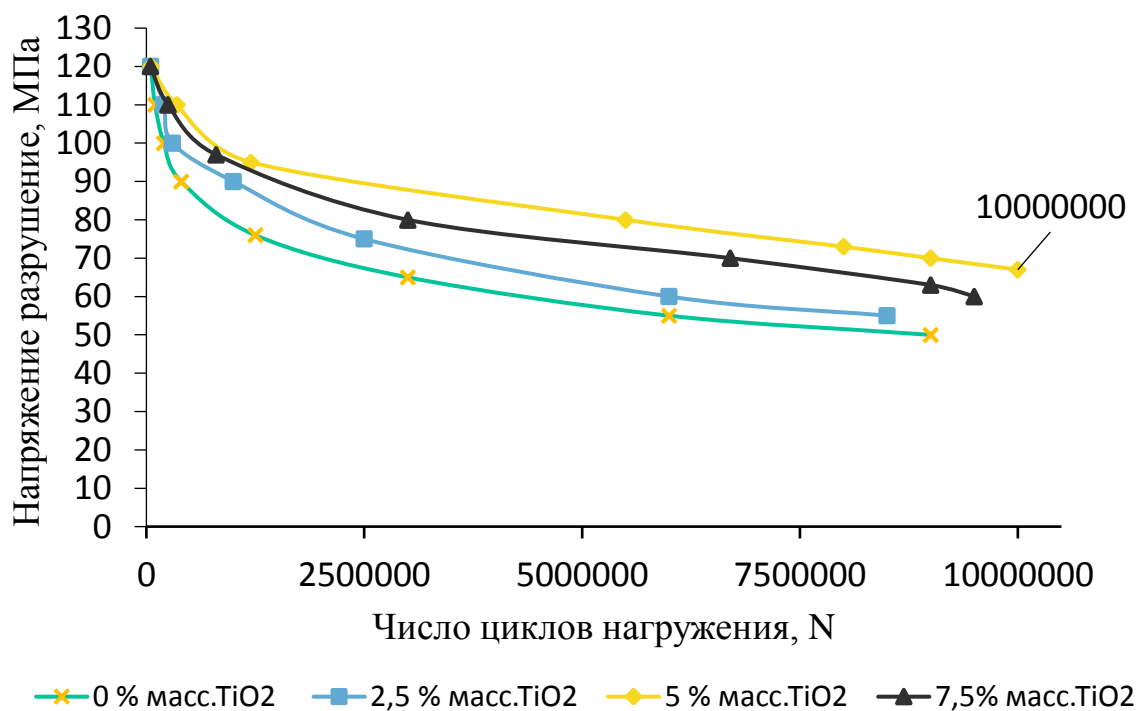


Рисунок 8 – Кривые усталостного разрушения при циклическом нагружении для алюминиевого композита AA2024/TiO<sub>2</sub> с наночастицами (0, 2,5, 5 и 7,5 % масс. TiO<sub>2</sub>)

На рисунке 9 показано, что виды усталостного разрушения включали транскристаллитные и межкристаллитные изломы. Присутствие наночастиц TiO<sub>2</sub> оказывает влияние на разрушение, способствуя переходу от транскристаллитного к межкристаллитному разрушению.

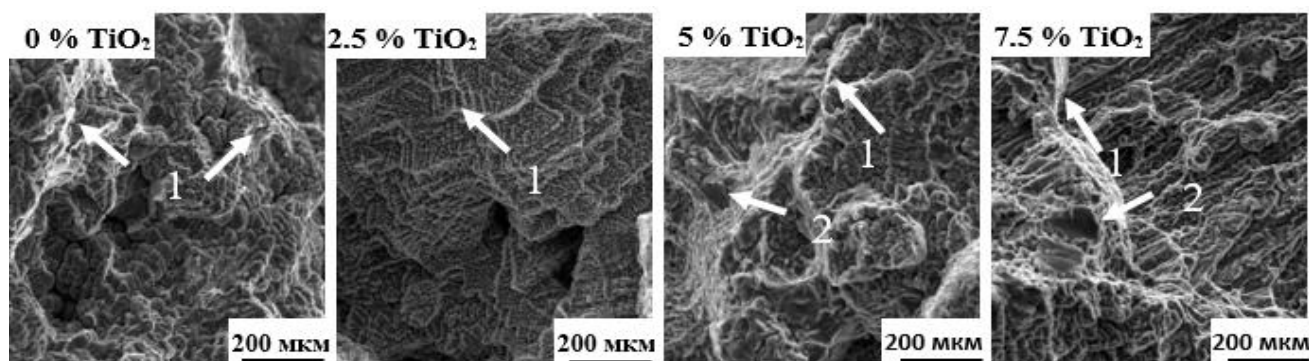


Рисунок 9 – Поверхность излома композитов AA2024/TiO<sub>2</sub> (1 – трещины, 2 – поверхность хрупкого разрушения)

В четвертой главе «Эволюция структуры, состава и свойств литых композитов после термической обработки» показано, что после проведения термической обработки (нагрев до 500 °С в течение 3 ч с последующим охлаждением в воде, а также старение при нагреве до 180 °С в течение 3 ч с последующим охлаждением на воздухе) наночастицы равномерно распределены по матрице и имеют более плотное соединение с матрицей (рисунок 10). Это свидетельствует о более эффективном переносе нагрузки между фазами и повышении механических свойств композитного материала, улучшении дисперсии и межфазного связывания наночастиц TiO<sub>2</sub> в алюминиевой матрице.

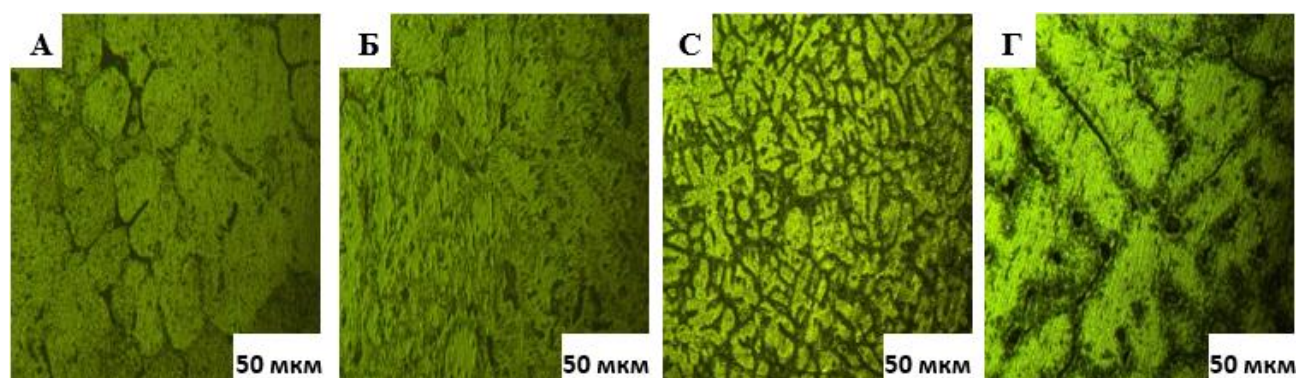


Рисунок 10 – Оптические микроскопические изображения после термической обработки (А) образца с 0 % TiO<sub>2</sub>, (Б) образца с 2,5 % TiO<sub>2</sub>, (С) образца с 5 % TiO<sub>2</sub> и (Г) образца с 7,5 % TiO<sub>2</sub>

На рисунке 11 показаны изображения СЭМ, на которых видно улучшение дисперсии и равномерного распределения 5% наночастиц TiO<sub>2</sub> в алюминиевом сплаве после термообработки. Это подтверждает наличие эффективной межфазной связи между наночастицами и алюминиевой матрицей.

На рисунке 12а показано, что термическая обработка со старением привела к улучшению предела прочности при растяжении композита на 18% по сравнению с образцом до термообработки (рисунок 3а). Упрочнение после термообработки алюмоматричных композитов, армированных высокодисперсными частицами, можно объяснить увеличением контакта и прочности связи армирующих частиц с матрицей. Композит с 5% массового содержания наночастиц TiO<sub>2</sub> продемонстрировал наилучшее сочетание

прочности и пластичности.

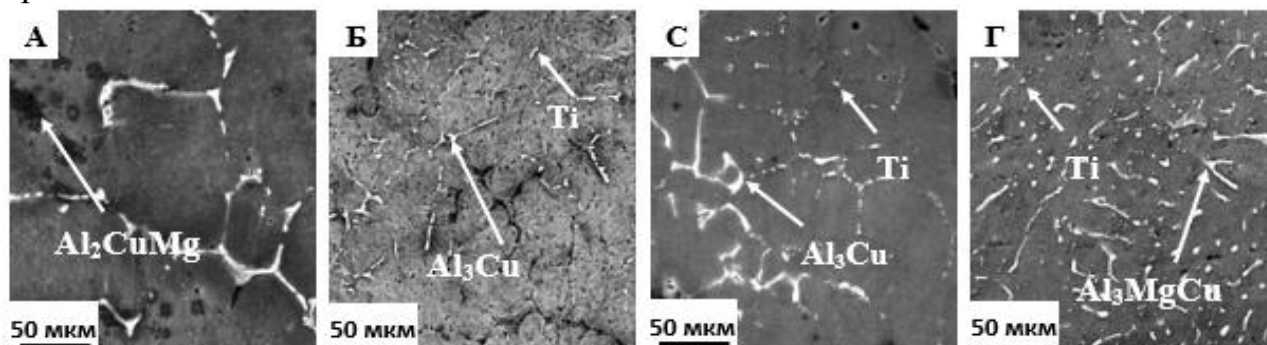


Рисунок 11 – СЭМ-микрофотографии структуры после термической обработки алюминиевого композит AA2024/TiO<sub>2</sub> с различным массовым процентным содержанием TiO<sub>2</sub>: (А) 0 %, (Б) 2,5 %, (С) 5 % и (Г) 7,5 %

На рисунке 12б показано, что в результате термической обработки выявлено повышение твердости алюминиевых сплавов, армированных наночастицами TiO<sub>2</sub>, в среднем на 33 % по сравнению с нетермообработанными (рисунок 3б). Сочетание термической обработки и армирования TiO<sub>2</sub> приводит к синергетическому эффекту, способствующему повышению твердости за счет уменьшения размеров зерен, дисперсионного упрочнения и равномерного распределения наночастиц.

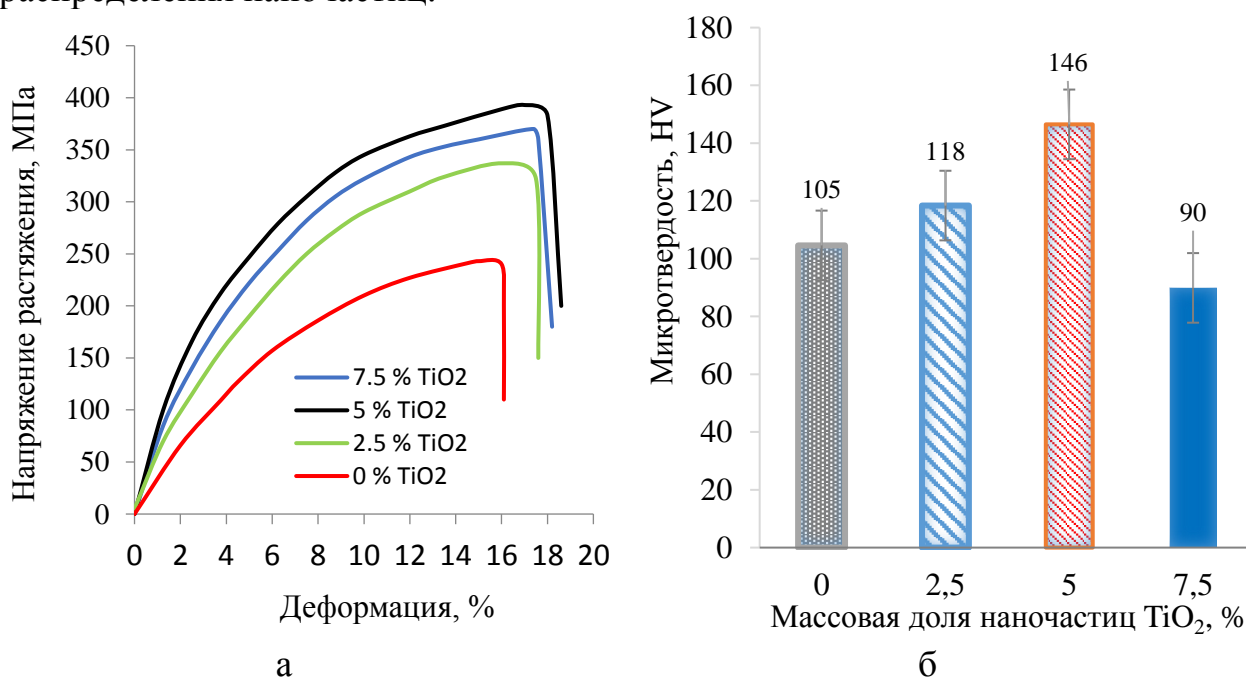


Рисунок 12 – Кривые растяжения (а) и твердости по Виккерсу (б) термообработанных композитов AA2024/TiO<sub>2</sub> с различной массовой долей TiO<sub>2</sub>

Из рисунков 13 и 4 результатов РФА следует, что при термообработке композитов фазовый состав Al, MgCuAl<sub>2</sub> и TiO<sub>2</sub> не изменяется. Но результаты микрорентгеноспектрального анализа показывают, что термообработка способствует увеличению содержания фазы MgCuAl<sub>2</sub> и формированию фазы Al<sub>2</sub>Cu. Таким образом, термическая обработка вызывает некоторые фазовые превращения, такие как растворение метастабильных фаз и выделение новых

соединений.

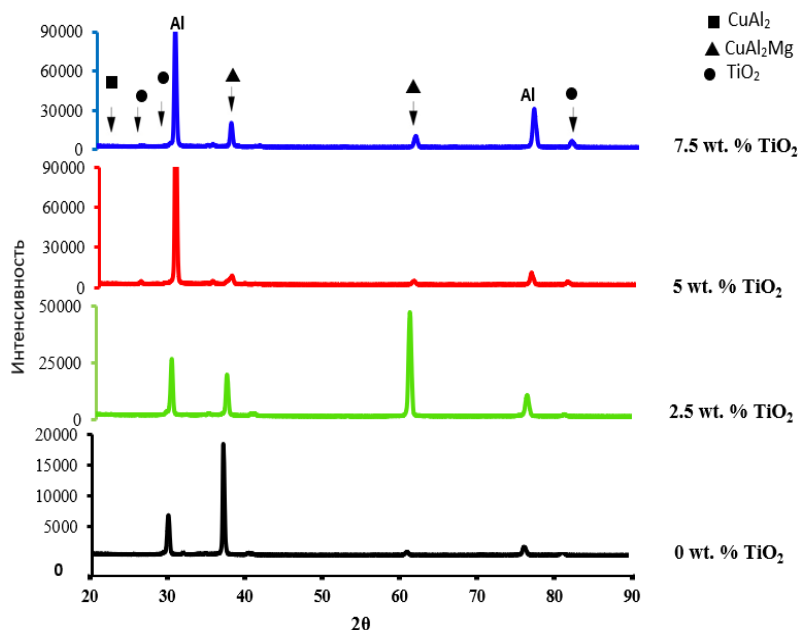


Рисунок 13 – Рентгеновские дифрактограммы термообработанных композитов AA2024/TiO<sub>2</sub> с различной массовой долей TiO<sub>2</sub>

Сравнение рисунков 5 и 14, показывает, что и введение наночастиц, и термическая обработка положительно влияют на ударную вязкость материала, показывая её повышение после термической обработки в среднем на 10-20%. Это повышение ударной вязкости может быть связано с рекристаллизацией, ростом зерен, дисперсией и выравниванием наночастиц в матрице материала, которые происходят в процессе термической обработки и приводят к улучшению межфазной связи и увеличению ударной вязкости.

Поверхность излома после испытаний на ударный изгиб образцов после обработки старением показана на рисунке 15. Выявлен хрупкий характер излома. На поверхности излома образцов наблюдаются сколы, мелкие трещины и ямки. Также наблюдается межкристаллическое разделение, количество которого уменьшается с увеличением процентного содержания наночастиц TiO<sub>2</sub> и после термической обработки со старением. В нанокompозитах процесс охлаждения вызывает касательное сжимающее напряжение в матрице и радиальное гидростатическое растягивающее напряжение. В результате мелкие трещины не расширяются из-за компрессионного напряжения в матрице. Это благоприятно влияет на вязкость разрушения композита, как свидетельствует вид поверхностей разрушений на рисунке 15.

На рисунке 16 показано, что термическая обработка положительно воздействует на усталостные характеристики алюминиевых сплавов с наночастицами. Введение наночастиц TiO<sub>2</sub> дополнительно влияет на эти свойства, а термическая обработка играет важную роль в изменении микроструктуры и механических характеристик алюминиевых сплавов. Кроме того, взаимодействие наночастиц с дислокациями при циклической нагрузке положительно влияет на усталостное поведение алюминиевых сплавов. Наночастицы могут служить препятствиями для движения дислокаций,

эффективно упрочняя материал и повышая его сопротивление усталости.

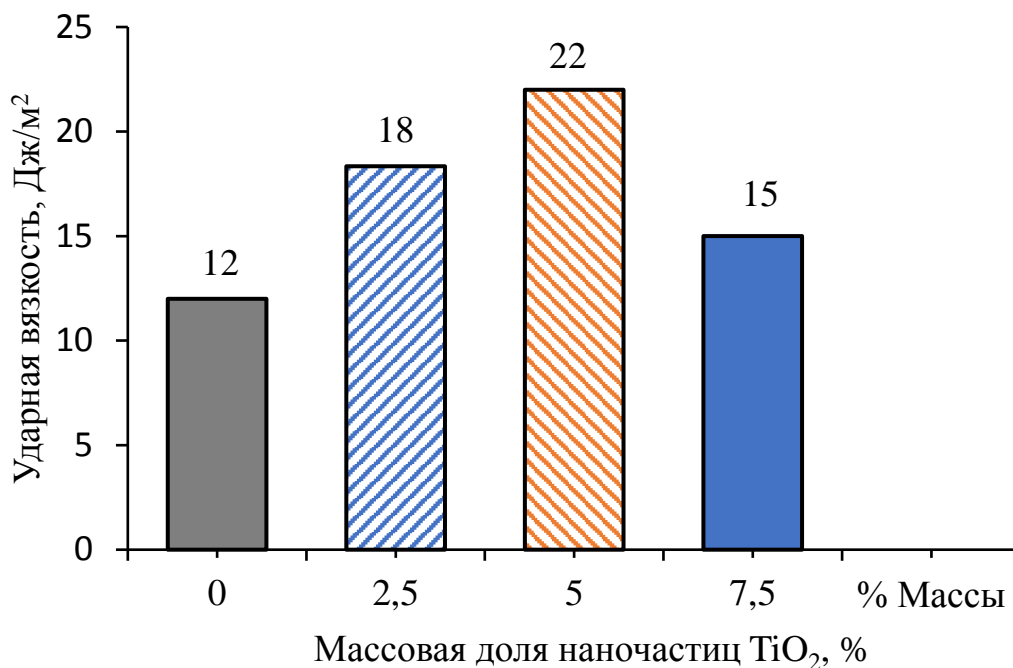


Рисунок 14 – Ударная вязкость термообработанных композитов AA2024/TiO<sub>2</sub> с различной массовой долей TiO<sub>2</sub>

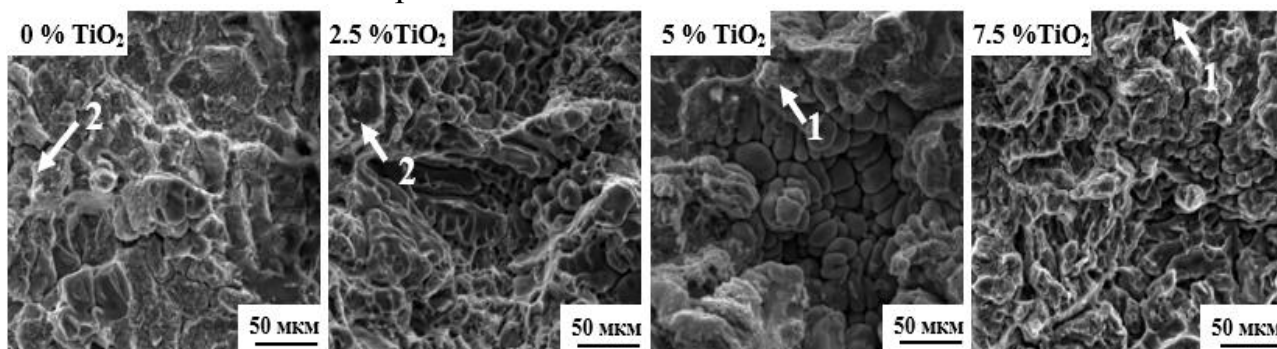


Рисунок 15 – Поверхность излома после испытаний на ударный изгиб термообработанных композитов AA2024/TiO<sub>2</sub> с различной массовой долей TiO<sub>2</sub> (1 – трещины, 2 – хрупкое разрушение)

Сравнение рисунков 6 и 17 показывает, что термическая обработка повышает в среднем на 20% износостойкость алюминиевого композита AA2024/TiO<sub>2</sub>. Таким образом, введение наночастиц улучшает механические свойства и износостойкость. Термическая обработка оптимизирует распределение и взаимодействие наночастиц с алюминиевой матрицей. Она улучшает контакт наночастиц с матрицей и снижает остаточные напряжения, что, в итоге, приводит к улучшенной передаче нагрузки и износостойкости алюминиевых сплавов.



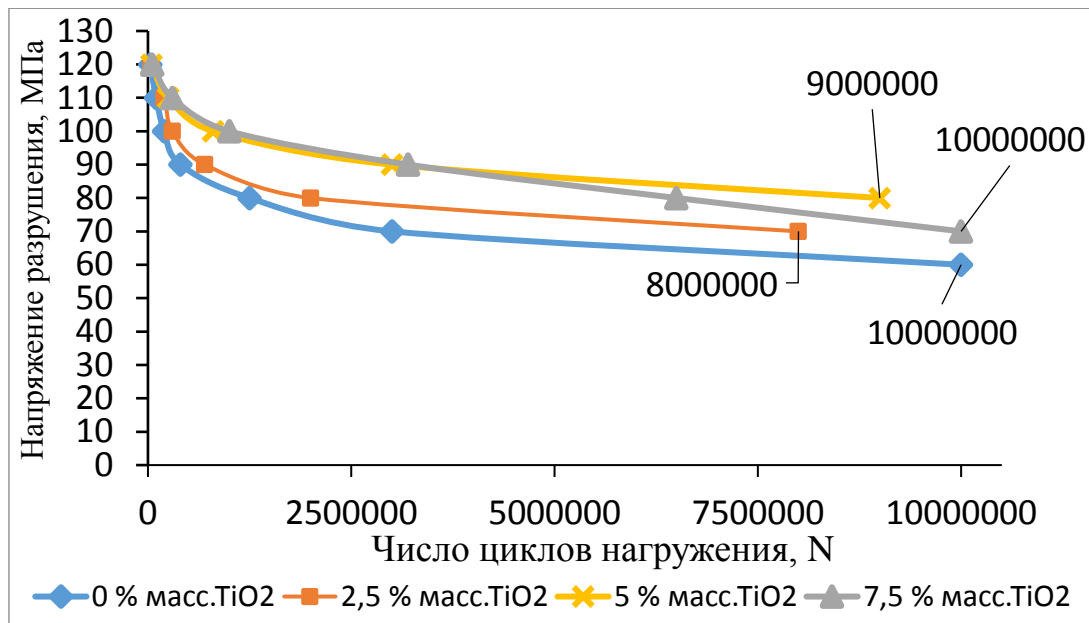


Рисунок 16 – Кривые усталостного разрушения при циклическом нагружении термообработанных композитов AA2024/TiO<sub>2</sub> с различной массовой долей TiO<sub>2</sub> при 25°C

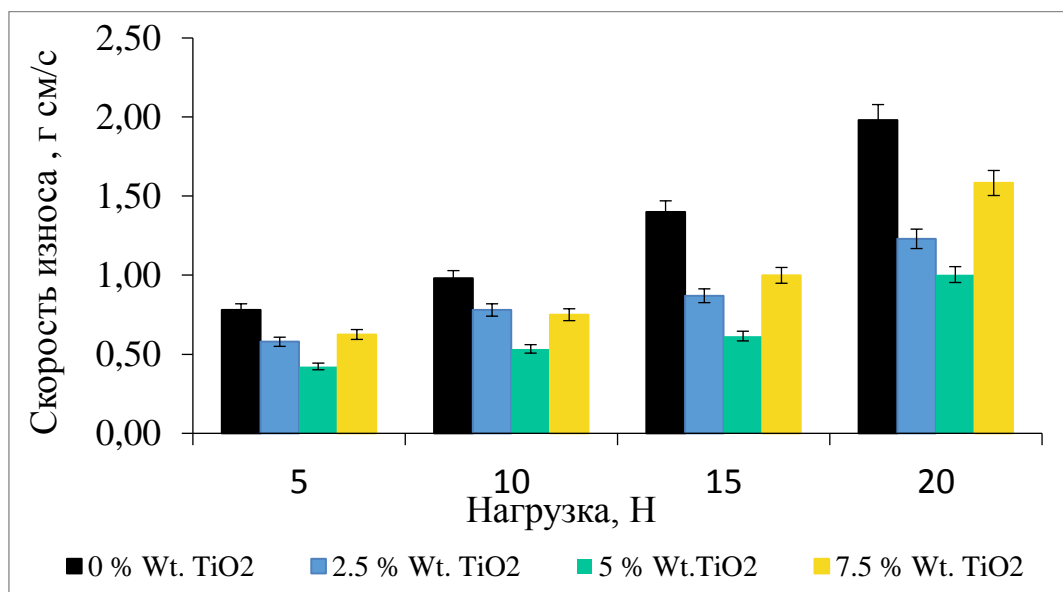


Рисунок 17 – Скорость износа при различных нагрузках термообработанных композитов AA2024/TiO<sub>2</sub> с различной массовой долей TiO<sub>2</sub>

Изменение коэффициента трения для сплавов и композитов, скользящих с постоянными скоростями и расстояниями, показано на рисунке 18 в зависимости от приложенной нагрузки. Как видно, средний коэффициент трения и потеря массы образца (рисунок 17) увеличиваются с увеличением приложенной нагрузки. Сплав с добавлением 5 % частиц TiO<sub>2</sub> демонстрирует наименьший коэффициент трения и наименьшую потерю массы при всех приложенных нагрузках по сравнению с базовым сплавом AA2024.

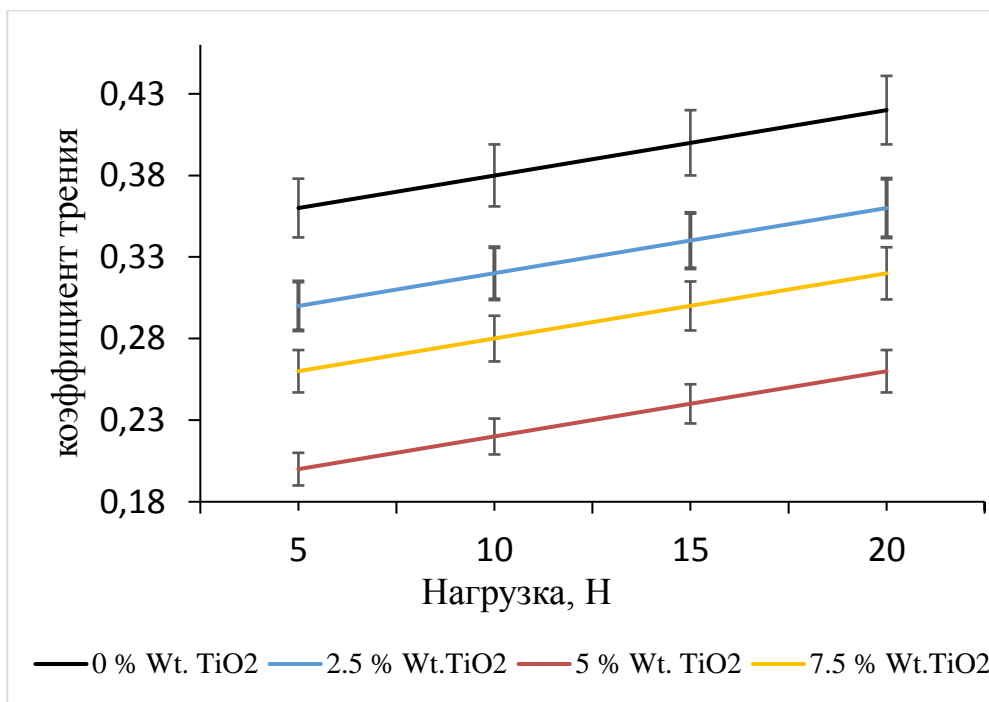


Рисунок 18 – Значения коэффициента трения композита AA2024/TiO<sub>2</sub> при различных нагрузках

Изображения поверхности износа алюмоматричного композита после термообработки (рисунок 19) демонстрируют низкий уровень расслаивания и разрушения из-за абразивного действия более твердых частиц включений. Исследуемые сплавы обладают повышенной износостойкостью, поскольку при трении они могут образовывать защитный оксидный слой, что объясняется их высокой реакционной способностью в окислительной среде.

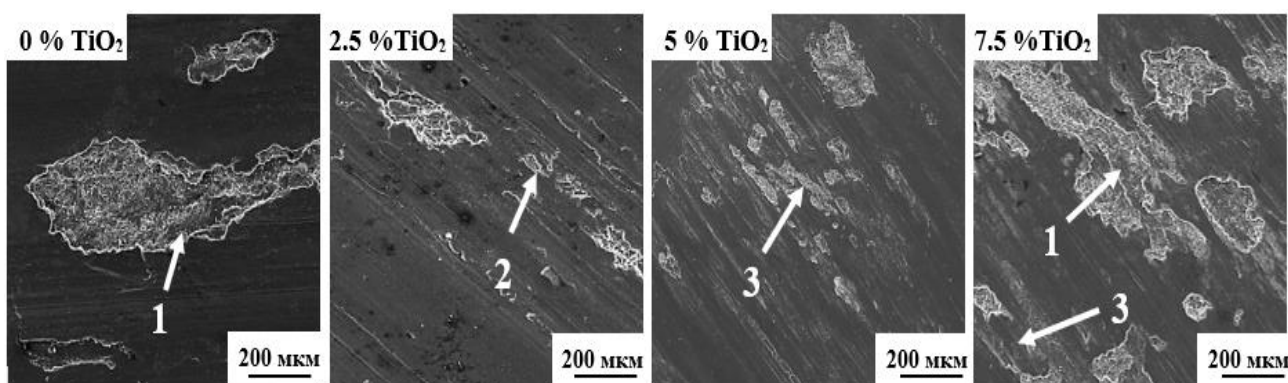


Рисунок 19 – СЭМ-изображения поверхности износа термообработанных композитов AA2024/TiO<sub>2</sub> с различной массовой долей TiO<sub>2</sub> (1 – неглубокие царапины, 2 – микроцарапины, 3 – царапина)

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе рассмотрена научно-практическая задача, направленная на разработку и исследование композитов на основе матричного сплава AA2024, армированного наночастицами TiO<sub>2</sub> с размером 30-50 нм. Метод

литья с перемешиванием был успешно использован для получения композита AA2024 с различными концентрациями наночастиц (0 %, 2,5 масс. %, 5 масс. % и 7,5 масс. %  $\text{TiO}_2$ ). Затем была исследована термическая обработка, состоящая из закалки в воду после выдержки при 500 °С и последующего старения при 185 °С в течение 3 ч. Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Процесс литья с перемешиванием оказался эффективным методом изготовления композита AA2024/ $\text{TiO}_2$ . Количественный РФА показывает несколько меньшее содержание фазы  $\text{TiO}_2$  в композитах по сравнению с количеством вводимых в расплав наночастиц  $\text{TiO}_2$ , соответственно: 2,4 % и 2,5 %, 4,4 % и 5 %, 5,2 % и 7,5 %. Эти результаты свидетельствуют о хорошем усвоении вводимых наночастиц  $\text{TiO}_2$  расплавом матричного композита AA2024/ $\text{TiO}_2$  при их введении до 5% и заметно хуже при 7,5%. Наночастицы равномерно диспергированы в матрице сплава, обеспечивая хорошую межфазную связь.

2. Введение наночастиц  $\text{TiO}_2$  оказывает влияние на микроструктуру и фазовый состав алюминиевого сплава. Наночастицы действуют как центры зародышеобразования при кристаллизации, способствуя формированию более мелких и равномерно распределенных зерен. Согласно результатам микрорентгеноспектрального анализа, добавление наночастиц  $\text{TiO}_2$  приводит также к изменению состава интерметаллических соединений в междендритных зонах, к образованию фаз  $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ ,  $\text{Al}(\text{Cu}, \text{Mn}, \text{Fe}, \text{Si})$ ,  $\text{Al}_2\text{TiCu}$  и  $\text{Al}_9\text{TiFe}$ . Термообработка способствует увеличению содержания фазы  $\text{MgCuAl}_2$  и формированию фазы  $\text{Al}_2\text{Cu}$ . Результаты рентгеновской дифрактометрии показали наличие фаз  $\text{Al}$ ,  $\text{MgCuAl}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{Cu}$  и  $\text{TiO}_2$  в образцах полученных композитов AA2024/ $\text{TiO}_2$  до и после термообработки.

3. Добавление наночастиц  $\text{TiO}_2$  улучшает механические свойства сплава AA2024. В частности, при добавлении 5 масс. %  $\text{TiO}_2$  наблюдается максимальное повышение твердости, как по значению микротвердости (110 HV), так и по твердости по методу Бринелля (66 HB). Кроме того, отмечается увеличение предела прочности на растяжение до 330 МПа и ударной вязкости до 19 Дж/м<sup>2</sup>. Такое упрочнение может быть обусловлено эффективной передачей нагрузки и ограничением движения дислокаций, обеспечиваемых присутствием наночастиц. Наночастицы  $\text{TiO}_2$  могут служить препятствием для распространения трещин, что в итоге также повышает его прочность.

4. При дальнейшей термообработке этого образца с 5 масс. %  $\text{TiO}_2$  было обнаружено, что микротвердость увеличилась до 146 HV (на 33 %), предел прочности на растяжение до 390 МПа (на 18 %), а ударная вязкость до 22 Дж/м<sup>2</sup> (на 12 %) по сравнению с необработанным образцом.

5. Введение наночастиц  $\text{TiO}_2$  в алюминиевый сплав AA2024 улучшило и его усталостные характеристики. Было установлено, что оптимальная концентрация наночастиц составляет 5 масс. %  $\text{TiO}_2$ , при которой сплав показал самую высокую усталостную долговечность. Термическая обработка также оказывает положительное влияние на усталостные характеристики алюминиевых сплавов, содержащих наночастицы.

6. Сочетание термической обработки и добавления наночастиц  $TiO_2$  улучшило износостойкость сплава за счет уменьшения степени повреждения поверхности трения и минимизации скорости потерь материала при трении. Износостойкость сплава AA2024 с 5 масс. %  $TiO_2$  оказалась выше, чем у других образцов, и значение износостойкости нанокompозитов было на 20 % выше, чем у образцов до термической обработки.

7. Таким образом, содержание 5 масс. % наночастиц  $TiO_2$  является оптимальным в композитах AA2024/ $TiO_2$  и приводит к максимальному увеличению большинства механических и трибологических характеристик этих композитов, в то время как введение 7,5 масс. %  $TiO_2$  в состав композитов оказывается слишком большим и нецелесообразным из-за худшего усвоения такого количества наночастиц  $TiO_2$  расплавом и образования агломератов наночастиц  $TiO_2$ , которые могут быть источниками образования трещин и приводят к снижению характеристик композитов.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Статьи в отечественных изданиях, которые входят в международные реферативные базы данных и системы цитирования, рекомендованные ВАК РФ*

1. Махан, М. Х. Исследование свойств и структуры алюмоматричных композитов, армированных частицами  $TiO$  [Текст] / М. Х. Махан, С. В. Коновалов, И. А. Панченко, Д. Д. Пашкова // Ползуновский вестник. – 2022. – Т. 2. – №. 4. – С. 7-13.
2. Махан, Х. М. Влияние термической обработки и наночастиц на микроструктуру и механические свойства алюминиевого сплава [Текст] / Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2023. – №4. – С. 98–106.

*Статьи в иностранных изданиях, индексируемых Scopus и Web of Science*

3. Mahan, H. M. Effect of heat treatment on the mechanical properties of the aluminum alloys AA2024 with nanoparticles [Text] / H. M. Mahan, S. V. Konovalov, I. Panchenko // International Journal of Applied Science and Engineering. – 2023. – Vol. 20(2). – P. 1-6.
4. Mahan, H. M. The influence of  $TiO_2$  nanoparticles on the mechanical properties and microstructure of AA2024 aluminum alloy [Text] / H. M. Mahan, S. V. Konovalov, K. Osintsev, I. Panchenko // Materials and Technology. – 2023. – Vol. 57(4). – P. 379–384.
5. Mahan, H. M. Enhancement of Mechanical properties and Microstructure of Aluminum alloy AA2024 By adding  $TiO_2$  nanoparticles [Text] / H. M. Mahan, S. V. Konovalov, O. A. Shabeeb // International Journal of Nanoelectronics and Materials. – 2023. – Vol. 16. – P. 481 -494.
6. Mahan, H. M. The Effects of Titanium Dioxide ( $TiO_2$ ) Content on the Dry Sliding Behavior of AA2024 Aluminum Composite [Text] / H. M. Mahan, S. V. Konovalov, I. Panchenko, M. A. Al-Obaidi // Journal of Mechanical

Engineering. –2023. – 20(3). –P. 239-261.

7. Hamid M. M., Konovalov S.V., Sherwan M. N. Experimental and Numerical Investigations of the Fatigue Life of AA2024 Aluminum Alloy-Based Nanocomposite Reinforced by TiO<sub>2</sub> Nanoparticles Under the Effect of Heat Treatment [Text] / H. M. Mahan, S.V. Konovalov, S. M. Najm // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. – 2024. – Vol. 25. – P. 141-153.

*Публикации в материалах конференций и других изданиях*

8. Махан, Х. М. Исследование скорости износа алюмоматричных композитов, армированных частицами TiO<sub>2</sub> [Текст] / Х. М. Махан, С. В. Коновалов, И. А. Панченко // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященная 170-летию со дня рождения В.Г. Шухова (16-17 мая 2023 г.). Сборник докладов. – Белгород: БГТУ, 2023. – 431 с. – Ч.9. – С. 220-224.
9. Махан, М. Х. М. Влияние термической обработки на некоторые механические свойства алюминиевого сплава AA2024 [Текст] / Х. М. Махан С. В. Коновалов, И. А. Панченко // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященная 170-летию со дня рождения В.Г. Шухова (16-17 мая 2023 г.). Сборник докладов. – Белгород: БГТУ, 2023. – 431 с. – Ч.9. – С. 225- 229.
10. Махан, Х. М. Влияние наночастиц TiO<sub>2</sub> на микротвердость алюминиевых сплавов AA2024 [Текст] / Х. М. Махан С. В. Коновалов, И. А. Панченко // Международная научно-техническая конференция имени Н.Д. Кузнецова «Перспективы развития двигателестроения» (21-23 июня 2023). Сборник докладов. – Самара: Самарский университет, 2023. – С. 319-320.
11. Махан, Х. М. Влияние наночастиц на микроструктуру сплава AA 2024 [Текст] / Х. М. Махан С. В. Коновалов // V Международная научно-практическая конференция «Наука и технологии: Перспективы развития и применения» (6 сентября 2023 г.). Сборник статей. – Петрозаводск: МЦНП «Новая наука», 2023. – С. 21-25.

*Научное издание*

Махан Хамид Мохаммед Махан

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук на тему:  
**ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ АЛЮМОМАТРИЧНЫХ  
КОМПОЗИТОВ, АРМИРОВАННЫХ ЧАСТИЦАМИ TiO<sub>2</sub>**

Автореферат отпечатан с разрешения объединенного  
диссертационного совета 99.2.039.02 на базе  
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» и  
ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет  
имени С.П. Королева»  
(протокол № 2 от 05.04.2024 г.)

---

Формат 60×84 1/16. Набор компьютерный.  
Усл. печ. л. 1,00. Тираж 100 экз. Заказ № \_\_\_\_\_.  
Издательство Самарский университет  
443086, Самара, Московское шоссе, 34