

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по НИР и ИД

ФГБОУ ВО «Донской государственный
технический университет»

Ефременко И.Н.

« 29 » сентября 2025 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Донской государственный технический университет» на диссертационную работу **Нарзуллоева Умеджона Умаралиевича «Получение наномодифицированных алюмоматричных композитов с использованием термохимических и плазмохимических *in situ* реакций**», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.6.5 – «Порошковая металлургия и композиционные материалы»

Актуальность темы диссертационного исследования обусловлена разработкой перспективных технологий создания новых легких и высокопрочных алюмоматричных композиционных материалов с улучшенными механическими свойствами, сохраняющих свою прочность при повышенных температурах (до 500 °С). Разработка таких композитов важна для применения в автомобильной промышленности, поскольку они преодолевают проблемы снижения механических свойств при повышенных температурах и тем самым расширяют возможности их использования. Целью диссертационной работы является разработка научных и технологических основ создания алюминиевых металломатричных композитов с высокими термомеханическими свойствами за счет дисперсного упрочнения оксидными наноструктурами. Актуальность диссертационной работы подтверждается тем, что работа выполнялась в рамках проектов Российского научного фонда № 22-29-01103 от 15.12.2021 г. по теме «Разработка научных основ нового способа реакционно-дисперсного упрочнения металлов»

и Государственного задания № FSME-2023-0004 от 18.01.2023 г. по теме «Разработка теоретических и экспериментальных основ получения металломатричных композиционных материалов, упрочненных наноструктурами».

Научная новизна

1. Выявлено формирование гибридных поликристаллических наноструктур типа ядро-оболочка $\text{Al@Al}_2\text{O}_3$ на поверхности окисленных частиц Al при их нагреве в аргоне при 900 и 1000 °С в результате образования субоксида Al_2O на внутренней границе раздела (твёрдый Al_2O_3)/(расплав Al) и его диффузии через нанопоры оксидной оболочки к поверхности частиц под действием избыточного давления паров Al_2O внутри частиц».

2. Установлено образование оксидных наноструктур на поверхности частиц алюминия при их термической обработке с нанесенными реакционными оксидами (H_3BO_3 , LiNO_3 и Na_2SiO_3), что обеспечивает равномерное введение наноструктур в алюминиевую матрицу.

3. Установлено образование сферических гетерогенных частиц-прекурсоров $\text{Al-Al}_2\text{O}_3$ в результате обработки смеси порошков Al и Al_2O_3 в микроволновой аргоновой плазме.

4. Установлено, что в результате алюминотермической реакции при искровом плазменном спекании порошковых смесей $\text{Al}-(\text{Cr}_{0.23}\text{Mn}_{0.22}\text{Fe}_{0.22}\text{Co}_{0.19}\text{Ni}_{0.13})_3\text{O}_4$ наночастицы высокоэнтропийного оксида (ВЭО) частично восстанавливаются *in situ*, обеспечивая избыток кислорода для образования армирующих наночастиц Al_2O_3 , а восстановленные металлы реагируют с алюминием с образованием интерметаллических соединений Al_9Me_2 , Al_5Me_2 и Al_2Me , которые, помимо ВЭО, служат вторичными упрочняющими фазами.

5. В композитах $\text{Al-Al}_2\text{O}_3$ и Al-ВЭО установлено формирование бимодальной структуры, состоящей из микронных и субмикронных зерен алюминия, обеспечивающих пластичность, окруженных металлокерамическим каркасом, состоящим из нанозерен алюминия и керамических армирующих наночастиц, обеспечивающих высокую прочность, износостойкость и ударопрочность.

6. Обнаружена новая гексагональная фаза AlMe_x ($\text{Me} = \text{Fe}, \text{Co}, \text{Cr}, \text{Ni}$ и Mn) с параметрами решетки $a = c = 1,76$ нм, образующаяся при искровом плазменном спекании порошковой смеси $\text{Al}+(\text{CrMnFeCoNi})_3\text{O}_4$.

Практическая значимость выполненных работ подтверждена регистрацией секрета производства (ноу-хау) на «Способ получения нановискеров алюминатов на частицах алюминия», свидетельство №24-774-2023 ОИС от 17 ноября 2023 года и на «Способ получения наночастиц высокоэнтропийных оксидов $(\text{CrMnFeCoNi})_3\text{O}_4$ », свидетельство №13-774-2024 ОИС от 15 октября 2024 года. Разработана и зарегистрирована технологическая инструкция на процесс получения заготовок для композиционных поршневых колец на основе алюминия, упрочненных наночастицами высокоэнтропийных оксидов (ТИ 63-11301236-2024). Разработан способ гомогенизации и механоактивации порошков методом высокоэнергетического шарового размола, внедренный в ООО «Фопро-М». Также в ООО «Фопро-М» были проведены механические испытания при температурах 25 и 500 °С, по результатам которых материал $\text{Al-5\%}(\text{CrMnFeCoNi})_3\text{O}_4$ был рекомендован для изготовления днищ поршней и поршневых колец двигателей внутреннего сгорания.

Диссертационная работа Нарзуллоева У.У. состоит из введения, 5 разделов, общих выводов, списка использованных источников и 4 приложений. Диссертационная работа изложена на 152 страницах, содержит 13 таблиц, 67 рисунков и 204 использованных источника.

Во введении описана актуальность проблемы создание алюмоматричных композиционных материалов с высокими термомеханическими свойствами, сформулированы цель и основные задачи, обоснована научная новизна и практическая значимость работы.

В первом разделе приведен аналитический обзор научно-технической литературы по технологии получения алюмоматричных композиционных материалов. Рассмотрены их основные физико-механические характеристики, структурные составляющие, преимущества перед традиционными алюминиевыми сплавами и области применения. Описано влияние армирующих частиц на термомеханические свойства и механизмы упрочнения композитов, а также подчеркивается, что механические свойства композитов в значительной степени зависят от размера частиц, типа, объемной доли и распределения упрочняющих добавок в матрице.

Второй раздел содержит информацию об исходных материалах, используемых в работе, описание оборудования, методика получения алюмоматричных композиционных материалов и

исследование их структуры, а также термомеханических и трибологических свойств полученных композиционных материалов.

В третьем разделе представлены результаты образования оксидных наноструктур на поверхности частиц окисленного Al в результате взаимодействия поверхностного оксидного слоя с реакционными оксидами. В качестве реакционных оксидов были выбраны и изучены соединения H_3BO_3 , LiNO_3 и Na_2SiO_3 . Установлены режимы при которых образуются оксидные наноструктуры в виде субмикронных частиц AlBO_3 , а также нановискеры LiAlO_2 и SiO_2 на поверхности частиц окисленного Al. Методом искрового плазменного спекания изготовлены алюмоматричные композиционные материалы с использованием субмикронных частиц AlBO_3 размером <500 нм и нановискеров LiAlO_2 и SiO_2 диаметром <120 нм и длиной ~ 3 мкм, синтезированных на поверхности частиц окисленного Al. Результаты исследования показали, что образование нановискеров SiO_2 на поверхности частиц Al, приводит к увеличению механических свойств композита: твердость на 132 %, прочность на растяжение на 126 % (25 °C) и 159 % (500 °C) и на сжатие 184 % (25 °C) и 292 % (500 °C). Кроме того, сопротивление композита к циклическим ударно-динамическим нагрузкам увеличивается в 2-3 раза.

В четвертом разделе представлены результаты исследования, посвященного разработке композиционных материалов Al- Al_2O_3 с высокими термомеханическими свойствами, изготовленных с использованием комбинации высокоэнергетического шарового размола, микроволновой плазменной обработки и искрового плазменного спекания. Одной из ключевых проблем при разработке композитов является плохая смачиваемость между металлической матрицей и керамической фазой, которая была решена посредством плазменной обработки порошковых смесей для обеспечения плотного контакта между матрицей и керамической фазой. Введение Al_2O_3 приводит к значительному улучшению термомеханических характеристик. При добавлении 10 масс. % Al_2O_3 твердость композита увеличивается на 90% и предел прочности при сжатии на 143% (25 °C) и 111% при (500 °C) при сохранении высокой пластичности, составляющей около 21,5%. По сравнению с композитом Al-10% Al_2O_3 , спеченным из неплазмообработанного порошка, предел прочности при сжатии увеличивается на 16% (25°C) и 33% (500 °C). Композит Al-10% Al_2O_3 демонстрирует высокие трибологические характеристики за счёт формирования трибоплёнки на основе оксида, которая препятствует интенсивной адгезии алюминия к контртелу. Также, за счет высокой плотности частиц Al_2O_3 , стойкость композита к циклическим ударно-динамическим нагрузкам увеличивается в 2-3 раза.

В пятом разделе приведены результаты получения алюмоматричных композитов, изготовленных методом высокоэнергетического шарового размола и искрового плазменного спекания с прочными интерфейсами, достигнутыми за счет формирования дополнительных армирующих частиц *in situ* в результате алюминотермической реакции между Al и $(\text{CrMnFeCoNi})_3\text{O}_4$. В результате алюминотермической реакции в процессе искрового плазменного спекания наночастицы $(\text{CrMnFeCoNi})_3\text{O}_4$ частично восстанавливаются, обеспечивая кислород для формирования армирующих наночастиц Al_2O_3 . Восстановленные металлы реагируют с Al, образуя интерметаллиды (Al_9Me_2 , Al_5Me_2 и Al_2Me), которые выступают в роли вторичных упрочняющих фаз, помимо $(\text{CrMnFeCoNi})_3\text{O}_4$. Показано, что высокоэнергетический шаровой размол является важным этапом не только для равномерного распределения $(\text{CrMnFeCoNi})_3\text{O}_4$, но и для достижения алюминотермической реакции при относительно низкой температуре за счет улучшения взаимодействия между активированными частицами Al и $(\text{CrMnFeCoNi})_3\text{O}_4$. Добавление $(\text{CrMnFeCoNi})_3\text{O}_4$ увеличивает твердость композита на 198%, прочность на растяжение – на 90% (25 °C) и 97% (500 °C), а прочность на сжатие – на 220% (25 °C) и 250% (500 °C). Также добавление $(\text{CrMnFeCoNi})_3\text{O}_4$ приводит к значительному снижению

коэффициента трения (с 0,7 (0%(CrMnFeCoNi)₃O₄) до 0,2 (3%(CrMnFeCoNi)₃O₄)) и заметному увеличению к циклическим ударно-динамическим нагрузкам (в 5,9-6,3 (3%(CrMnFeCoNi)₃O₄) и 10,6-14,3 (5%(CrMnFeCoNi)₃O₄)) раза в зависимости от приложенной нагрузки. Превосходное сочетание термомеханических и трибологических характеристик достигается за счет формирования бимодальной структуры, состоящей из микронных и субмикронных зерен Al, окруженных металлокерамическим каркасом, состоящим из нанозерен Al и армирующих керамических наночастиц, что обеспечивает высокую прочность и износостойкость.

Рекомендации по использованию результатов и выводов, приведенных в диссертации:

В работе получен ряд результатов, которые представляют интерес для специалистов, занимающихся исследованиями и разработками в области металломатричных композиционных материалов на основе алюминия, упрочненных керамическими наноструктурами, а также для специалистов, занимающихся внедрением новых материалов в области автомобильной, авиакосмической и строительной промышленности. Результаты и выводы диссертационной работы Нарзуллоева У.У. могут быть использованы в ряде научно-исследовательских организаций и промышленных предприятий в том числе НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ, Сколковский институт науки и технологий, РХТУ имени Д.И. Менделеева, МГУ имени М.В. Ломоносова, АО «Композит» и ряде других.

Диссертационная работа написана понятным языком, хорошо структурирована и оформлена, однако текст диссертации содержит грамматические и пунктуационные ошибки.

По диссертационной работе Нарзуллоева У.У. имеются **следующие замечания:**

1. Хотя механизмы упрочнения упоминаются, их физическая природа могла бы быть раскрыта глубже, особенно в части взаимодействия наночастиц с дислокациями и границами зерен.

2. Указано, что использовалось современное оборудование и методики, но не приведены данные по воспроизводимости экспериментов и погрешностям измерений.

3. Отсутствует информация о количестве повторностей экспериментов и статистической значимости результатов.

4. В работе представлены данные по влиянию содержания упрочняющих фаз (Al₂O₃, ВЭО) на свойства, однако не всегда четко прослеживается поиск оптимального состава. Например, для композитов с ВЭО максимальная прочность при растяжении достигается при 3 масс. %, а при 5 масс. % наблюдается ее спад, что связывается с агломерацией, но детальный анализ влияния агломератов на кинетику разрушения проведен не в полной мере.

5. Автор справедливо ссылается на несколько механизмов упрочнения (Холла-Петча, Орована, дисперсионное и т.д.). Однако количественный вклад каждого из этих механизмов в общее упрочнение оценен недостаточно.

Вышеуказанные замечания носят рекомендательный характер и не влияют на положительную оценку диссертационной работы Нарзуллоева У.У. Диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне, поставленные цели и задачи достигнуты. Работа имеет научную и практическую значимость, а положения, выносимые на защиту, экспериментально подтверждены.

Заключение

Диссертационная работа Нарзуллоева У.У. представляет собой законченное научное исследование, содержащее решение актуальной научно-практической задачи в области материаловедения и порошковой металлургии – получение металломатричных композиционных материалов на основе алюминия с улучшенными термомеханическими свойствами. В работе

решен ряд важных задач, имеющие существенное фундаментальное и практическое значение. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертационной работы и отражает основные полученные результаты.

Диссертационная работа Нарзуллоева Умеджона Умаралиевича «Получение наномодифицированных алюмоматричных композитов с использованием термохимических и плазмохимических *in situ* реакций» является актуальным, завершённым и самостоятельным исследованием, полностью соответствующим требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней в НИТУ МИСИС», а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.5 – «Порошковая металлургия и композиционные материалы».

Отзыв составлен и принят на основании анализа диссертации, автореферата и публикаций соискателя. Диссертационная работа Нарзуллоева У.У. обсуждалась на заседании кафедры «материаловедение и технологии металлов» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Донской государственный технический университет» (ДГТУ), протокол № 2 от 25 сентября 2025 года.

Данные ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет» (ДГТУ).

Россия, 344003, Ростовская область, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1.

Тел.: 8 (863)-273-85-25, E-mail: reception@donstu.ru

Заведующий кафедрой
«Материаловедение и технологии металлов»
ФГБОУ ВО «Донской государственный
технический университет» д-р. техн. наук,
доцент



М.С. Егоров

ПРОРЕКТОР ПО УР И МД
А.Н. БЕСКОПЫЛЬНЫЙ

