

На правах рукописи



Хрусталёв Антон Павлович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЁННЫХ КОМПОЗИТОВ
НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ И МАГНИЯ**

01.02.04 – Механика деформируемого твёрдого тела

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет».

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Ворожцов Александр Борисович

Официальные оппоненты:

Колобов Юрий Романович, доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», кафедра наноматериалов и нанотехнологий, заведующий кафедрой

Радченко Андрей Васильевич, доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет», Институт кадастра, экономики и инженерных систем в строительстве, директор института

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Защита состоится 27 сентября 2019 года в 16 ч. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.267.13, созданного на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина 36 (корпус № 10 (НИИ ПММ), ауд. 239).

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке и на официальном сайте федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» www.tsu.ru.

Материалы по защите диссертации размещены на официальном сайте ТГУ: <http://www.ams.tsu.ru/TSU/QualificationDep/co-searchers.nsf/newpublicationn/KhrustalyovAP27092019.html>

Автореферат разослан « ____ » августа 2019 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат физико-математических наук



Пикущак
Елизавета Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. В настоящее время существует потребность в установлении закономерностей влияния неметаллических наночастиц, размером до 100 нм, на механическое поведение литейных алюминиевых и магниевых сплавов. Такая потребность обусловлена необходимостью повышения прочностных свойств цветных литейных сплавов, используемых для изготовления элементов конструкции авиационного, наземного транспорта, космической отрасли и судостроения.

Интерес к исследованиям механического поведения дисперсно-упрочнённых литейных сплавов, полученных с использованием лигатур и внешних воздействий на расплав, в РФ, ЕС, США, Китае, Индии неизменно возрастает в последние годы. Научно-исследовательские проекты по исследованию физико-механических свойств дисперсно-упрочнённых сплавов на основе алюминия и магния, упрочнённых неметаллическими наночастицами поддерживаются Российским Научным Фондом, Фондом Фундаментальных научных исследований, Министерством образования и науки РФ, Фондом содействия инновациям.

Степень разработанности темы исследования. Дисперсное упрочнение неметаллическими микрочастицами позволяет повысить механические характеристики литейных алюминиевых и магниевых сплавов, однако для создания таких композитов требуется содержание частиц от 5 до 20 масс.%. При дисперсном упрочнении неметаллическими наночастицами требуется существенно меньшее количество частиц до 2 масс.%, но существует ряд проблем, связанных с их агломерацией и флотацией в расплавленном металле при производстве металлических изделий. Наночастицы требуют предварительной подготовки, в том числе они помещаются в специальную лигатуру, в процессе получения которой, частицы должны быть деагломерированы и достаточно равномерно распределены. Процесс деформации и разрушения композитов, содержащих наночастицы ещё недостаточно изучен, т.к. различные методы и подходы получения материалов не всегда позволяют добиться желаемого распределения частиц в металлической матрице.

В этой связи тема диссертационной работы, связанная с установлением влияния наночастиц на структуру и физико-механические свойства дисперсно-упрочнённых композитов на основе алюминия и магния, получаемых ударно-волновым компактированием порошковых смесей и литьём с использованием порошковых смесей и ультразвуковой обработкой расплава, является актуальной.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является установление влияния наночастиц на структуру и физико-механические свойства дисперсно-упрочнённых композитов на основе алюминия и магния, получаемых ударно-волновым компактированием порошковых смесей, а также литьём с использованием порошковых смесей и ультразвуковой обработкой расплава.

В соответствии с целью поставлены следующие задачи исследования:

1. Изучить структуру, фазовый состав и дисперсность порошков алюминия, магния, трифторида скандия и нитрида алюминия, полученных различными методами.

2. Равномерно распределить наночастицы в порошковых смесях Al-ScF_3 , Mg-AlN .

3. Провести математическое моделирование процессов, происходящих при ударно-волновом компактировании порошков алюминия, магния, нитрида алюминия и их смесей.

4. Методом ударно-волнового компактирования получить композит Mg-AlN .

5. Изучить влияние кристаллической структуры и фазового состава на твёрдость дисперсно-упрочнённого композита Mg-AlN .

6. Ввести с помощью ультразвуковой обработки в расплав композит Mg-AlN и порошковую смесь Al-ScF_3 в качестве лигатур.

7. Изучить влияние кристаллической структуры, фазового состава типа и концентрации наночастиц на механическое поведение при растяжении и динамическом нагружении дисперсно-упрочнённых сплавов алюминия и магния.

Научная новизна проведенных исследований заключается в получении новых экспериментальных данных, расширяющих и уточняющих знания о деформации и разрушении дисперсно-упрочнённых наночастицами композитов с магниевой и алюминиевой матрицей при квазистатическом и динамическом нагружении. Высокая степень распределения наночастиц, достигнутая с использованием оригинальных методов, позволяет точнее описать их вклад в физико-механические свойства металлической матрицы.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость работы определяется новыми результатами в получении и исследовании равномерно перемешанных порошковых смесей, содержащих наночастицы, для последующего получения из них материалов с заданными свойствами, результатами изучения структуры и деформационного поведения дисперсно-упрочнённых композитов и сплавов. Результаты математического моделирования позволяют спрогнозировать поведение порошковой смеси в процессе ударно-волнового компактирования. Результаты исследования композиционных материалов будут использованы при разработке новых лигатур оригинального состава для их использования в цветной металлургии. Результаты исследования позволяют существенно повысить физико-механические характеристики традиционных сплавов, применяемых в транспортном секторе (авиакосмическая, автомобильная, судостроительная отрасли) индустрии.

Методология и методы исследования. В диссертационной работе использованы методы математического моделирования и экспериментальные методы механики деформируемого твердого тела: исследование твердости, растяжения с получением кривых вида напряжение-деформация. Для

исследований структуры и морфологии материалов использованы методы оптической и электронной микроскопии, рентгеноструктурный и рентгенофазовый анализ.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты исследования влияния зёрненной структуры и концентрации наночастиц на механические свойства дисперсноупрочненных алюминиевых и магниевых сплавов, полученных на основе порошковых смесей Al-ScF_3 и Mg-AlN , в условиях квазистатического растяжения.

2. Результаты исследования влияния зёрненной структуры сплавов и концентрации наночастиц нитрида алюминия на механические характеристики магниевого сплава Мл5 при ударно-волновом нагружении.

3. Результаты математического моделирования процесса ударно-волнового компактирования порошковых смесей лигатуры алюминиевых сплавов, содержащих наночастицы трифторида скандия, позволяющие оценить пороговые значения давления и время воздействия для получения прочного компакта, исходя из свойств материала частиц.

4. Результаты исследования влияния структуры и концентрации наночастиц на твёрдость и механические характеристики дисперсно-упрочнённых сплавов на основе алюминия и магния при квазистатическом растяжении.

5. Результаты исследования фазового состава и гранулометрической структуры исходных порошков и порошковых смесей Al-ScF_3 и Mg-AlN , полученных на их основе.

6. Результаты исследования зёрненной структуры и распределения наночастиц частиц в образцах сплавов AK7-ScF_3 , ML12-AlN , ML5-AlN .

Степень достоверности результатов исследования обеспечивается адекватностью применимых методов исследования, комплексным подходом к решению поставленных задач и использованием апробированных методов и методик исследований, применением статистических методов обработки данных, анализом литературы, согласованием физически непротиворечивых полученных результатов с отдельными данными других исследователей.

Личный вклад автора. Соискателем совместно с научным руководителем определены цель и задачи, выбраны и обоснованы направления исследования по материалам анализа научно-технической и патентной литературы, проведена теоретическая и методическая проработка выбранного направления исследований; самостоятельно проведены исследования по разработке методики подготовки порошковых смесей, содержащих наночастицы.

Математическая модель ударно-волнового компактирования порошков построена совместно со старшим научным сотрудником лаборатории физики преобразования энергии высокоэнергетических материалов Института проблем химико-энергетических технологий СО РАН (г. Бийск), доктором физико-математических наук, доцентом О. Б. Кудряшовой. Литьё сплавов осуществлено соискателем совместно с сотрудниками научно-исследовательской лаборатории высокоэнергетических и специальных материалов Национального

исследовательского Томского государственного университета: старшим научным сотрудником, кандидатом технических наук И. А. Жуковым, старшим научным сотрудником, кандидатом технических наук В. В. Промаховым, младшим научным сотрудником В. В. Платовым. Исследование структуры, фазового состава и механических характеристик при квазистатическом растяжении проведены совместно с научным руководителем доктором физико-математических наук, профессором А. Б. Ворожцовым и сотрудниками научно-исследовательской лаборатории высокоэнергетических и специальных материалов Национального исследовательского Томского государственного университета: старшим научным сотрудником, кандидатом технических наук С. А. Ворожцовым, старшим научным сотрудником, кандидатом технических наук В. В. Промаховым, старшим научным сотрудником, кандидатом технических наук И. А. Жуковым.

Апробация результатов исследования. Основные результаты диссертации доложены на международной конференции «ISEM–2017» (Сендай, Япония, 2017), международной конференции «HEMs–2018» (Томск, 2018), международной конференции «TMS–2019» (Орландо, США, 2015), XIII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Перспективы развития фундаментальных наук» (Томск, 2016), XIV Международной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Перспективы развития фундаментальных наук» (Томск, 2017), Международной конференции «Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надёжных конструкций» (Томск, 2017).

По теме диссертации опубликовано 19 работ, в том числе 5 статей в журналах, включённых в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук (из них 2 статьи в зарубежных научных журналах, входящих в Web of Science; 3 статьи в российских научных журналах, переводные версии которых входят в Web of Science), 2 статьи в сборниках материалов конференций, представленных в изданиях, входящих в Web of Science и Scopus, 9 публикаций в сборниках материалов международных научных конференций, симпозиума, конгресса; получено 3 патента Российской Федерации.

Работа выполнена в рамках следующих проектов:

по грантам Российского научного фонда:

– проект № 17-13-01252 «Научные основы технологии синтеза новых высокопрочных нанокомпозитов на основе легких сплавов для приложений в транспортных и космических системах» (2017–2019 гг., руководитель – А. Б. Ворожцов),

– проект № 17-19-01319 «Перспективные наноструктурные сплавы, сформированные компактированием биметаллических наночастиц из несмешивающихся металлов: получение, структура, физико-механические свойства» (2017–2019 гг., руководитель – М. И. Лернер);

в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 гг.»:

– проект № 14.587.21.0019 «Научные основы технологии синтеза и применения нового класса лигатур для производства нанокompозитов на основе легких сплавов для их использования в авиакосмической и транспортной отраслях» (2015–2016 гг., руководитель – А. Б. Ворожцов),

– проект № 14.587.21.0025 «Разработка и совершенствование способов получения высокопрочных легких сплавов и металломатричных нанокompозитов с повышенными эксплуатационными характеристиками» (2014–2016 гг., руководитель – А. Б. Ворожцов),

– проект № 14.587.21.0098 «Разработка прототипов технологических решений синтеза наноструктурных лигатур и их использование для получения легких сплавов с повышенными эксплуатационными свойствами» (2014–2016 гг., руководитель – А. Б. Ворожцов),

по грантам Российского фонда фундаментальных исследований:

– проект № 17-38-50127 мол_нр «Изучение механических характеристик магниевых сплавов, упрочненных наночастицами нитрида алюминия при ударно-волновом деформировании» (2018 г., руководитель – Г. В. Гаркушин).

Структура и объем диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, шести разделов, заключения, списка использованной литературы, включающего 120 наименований. Работа изложена на 127 страницах машинописного текста, включая 70 рисунков и 13 таблиц.

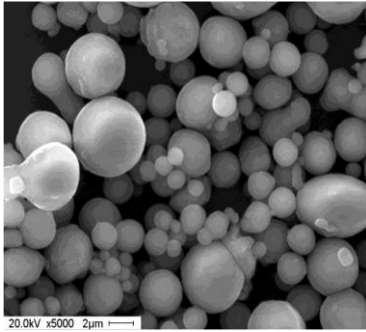
ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследуемой в диссертации проблемы, сформулированы цель и задачи работы, перечислены полученные новые результаты, их научно-практическая ценность, приведены положения, выносимые на защиту, а также обоснованность и достоверность результатов и выводов.

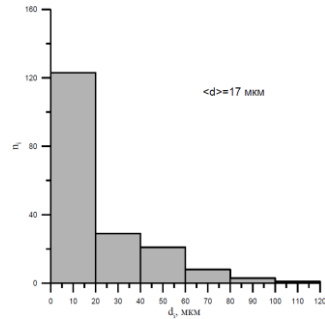
Первая глава посвящена анализу и систематизации научных источников по в области получения и исследования свойств современных металломатричных композитов. Описаны основные типы металломатричных композитов, способы их получения и механизмы упрочнения.

Вторая глава посвящена постановке задач исследования, обоснован выбор материалов и методик исследования.

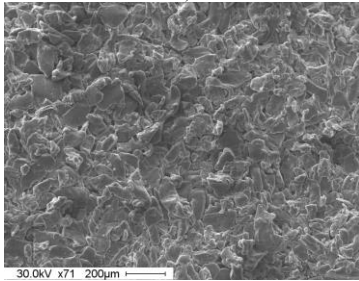
В третьей главе содержатся результаты исследования морфологии, фазового состава и параметров кристаллической структуры исходных порошков алюминия, магния, трифторида скандия и нитрида алюминия (рисунок 1).



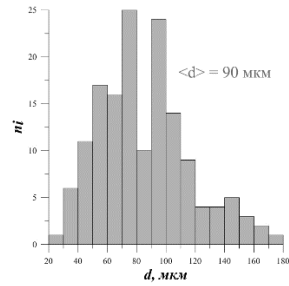
а)



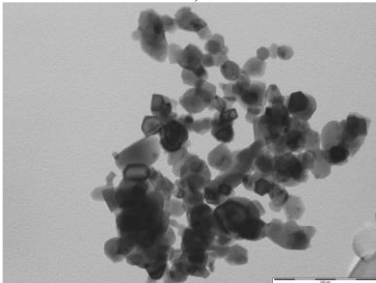
б)



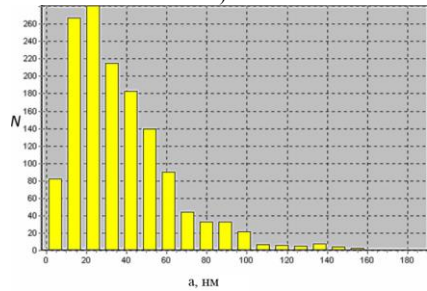
в)



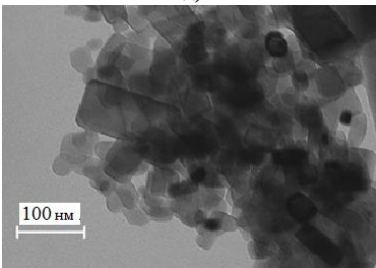
г)



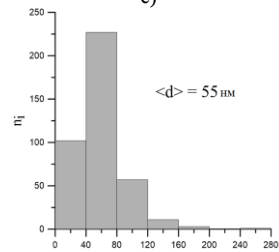
д)



е)



ж)



з)

Рисунок 1 – РЭМ изображения и гистограммы распределения частиц по размерам порошков алюминия (а, б), магния (в, г) и ПЭМ изображения нанопорошков нитрида алюминия (д, е), трифторида скандия (ж, з)

Порошок алюминия состоит из частиц правильной сферической формы, средний размер которых составил 17 мкм. Удельная поверхность порошка составила $0.7 \text{ м}^2/\text{г}$. Рентгеноструктурный анализ показал, что размер кристаллитов алюминиевого порошка составил 110 нм с параметром кристаллической решетки 0.40479 нм , а величина микродисторсии составила 2.9×10^{-3} . Порошок магния состоит из частиц неправильной формы, средний размер которых составляет 90 мкм. Размер частиц порошка нитрида алюминия находится в диапазоне от 0.07 мкм до 0.2 мкм, при этом вероятностный размер $\tilde{a}_n = 38 \text{ нм}$; размер средний по поверхности $\tilde{a}_s = 57 \text{ нм}$; средний массовый размер $\tilde{a}_m = 76 \text{ нм}$. Порошок трифторида скандия состоит из частиц неправильной формы. Анализ дифракции рентгеновских лучей показал, что кристаллиты в порошке трифторида скандия имеют размер порядка 123 нм, а параметр кристаллической решетки равен $4.0081 \text{ \AA}$. При этом величина микроискажений кристаллической решетки составляет $\langle \varepsilon^2 \rangle^{1/2} 1,3 \times 10^{-3}$. Средний размер частиц трифторида скандия составляет 55 нм.

Кроме этого в третьей главе проведено исследование влияние различных методов перемешивания на распределение наночастиц в порошковой смеси, которое позволило выявить, что перемешивание с использованием раствора петролейного эфира-1.5 масс. % стеариновой кислоты является наиболее оптимальной методикой перемешивания порошковых смесей на основе алюминия, содержащих неметаллические наночастицы. Время перемешивания, в течение которого достигается наилучшая картина деагломерации частиц, составляет $(15 \div 30)$ мин. Предложенный метод приготовления смеси нанопорошков представляет собой одновременный процесс диспергирования и смешивания в жидких средах с использованием поверхностно активного вещества (рисунок 2).

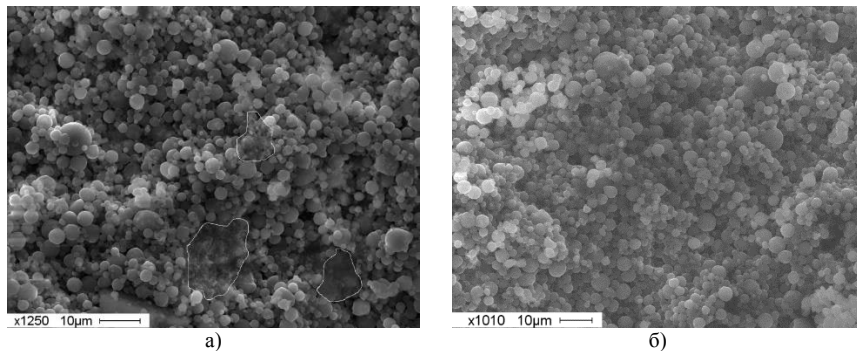


Рисунок 2 – Порошковая смесь Al-ScF₃, полученная перемешиванием с использованием в качестве поверхностно активного вещества полиэтиленгликоли (а) и стеариновой кислоты (б)

В четвёртой главе приведены результаты математического моделирования процесса ударно-волнового компактирования порошков и

порошковых смесей. Предложенная физико-математическая модель образования композита при ударно-волновом воздействии позволяет рассчитывать минимальное давление ударно-волнового компактирования (p_{min}) по соотношению плотностей (1), давление струйного очищения поверхности частиц (p_2) по выражению (2), давление для получения максимально плотного контакта (p_3), давление при котором происходит плавление частиц и разрушение материала (p_4) по выражению (4) и время воздействия для получения прочного компакта, исходя из свойств материала частиц.

$$p_{min} = \rho_{00}/\rho_0, \quad (1)$$

$$p_2 = \frac{\rho}{\rho_{00}} = \frac{\rho_0}{\rho_{00}} \left(1 - \exp \left(- \frac{0,54 \rho_{00} HV}{\rho_0 \sigma_s (1 - \rho_{00} / \rho)} \right) \right), \quad (2)$$

$$D_H = 2 \sqrt{\frac{1,2 HV}{\rho_e}}, \quad (3)$$

$$p_4 = \frac{2\rho c_v (T_{пл} - T_0)}{\left(\frac{\rho}{\rho_{00}} - 1 \right)} \approx \frac{2\rho c_v (T_{пл} - T)}{\left(\frac{\rho}{\rho_{00}} - 1 \right)}, \quad (4)$$

где ρ_0 – плотность твердого вещества, ρ_{00} – насыпная плотность частиц, HV – твердость материала частицы, σ_s – предел текучести материала частицы, D_H – скорость детонации, ρ_e – плотность ВВ, $T_{пл}$ – температура плавления, C_v – удельная теплоемкость вещества.

На основе полученной модели проведён расчёт для сплава алюминия (Al+15Pb+1Sn+1Cu) с параметрами: $\rho_0=2.11$ г/см³, $\sigma_s=163$ МПа, $HV=420$ МПа, и для алмазного порошка с параметрами: $\rho_0=3.5$ г/см³, $\sigma_s=15$ ГПа (взято как для хрупких материалов), $HV=100$ МПа, $T_{пл}=4000$ °С.

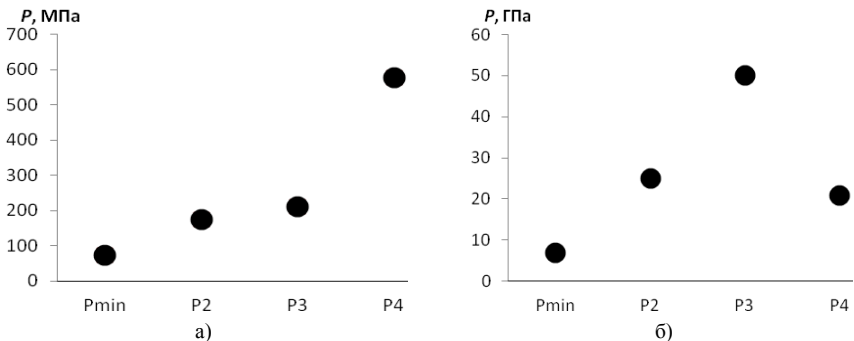


Рисунок 3 – Предельные величины давлений для сплава алюминия (а) и алмазного порошка (б)

Установлено, что для алмаза четвертый пределы по давлению ниже, чем третий и второй. То есть, фазовый переход происходит при более низких давлениях, чем очистка поверхности и давление для создания прочного компакта.

В пятой главе приведены результаты исследования структуры, фазового состава и их влияния на механические характеристики композита магний-нитрид алюминия, полученного методом ударно-волнового компактирования (рисунок 4). Элементный анализ (рисунок 4) композита показал, что материал состоит в основном из магния – 94 масс. %, который является матрицей, кислорода – 3 масс. %, который присутствует в порошке магния в исходном состоянии. Кроме этого в композите присутствует 1 масс. % азота и 2 масс. % алюминия, что может свидетельствовать о том, что нитрид алюминия сохраняет свою исходную структуру после ударно-волнового компактирования.

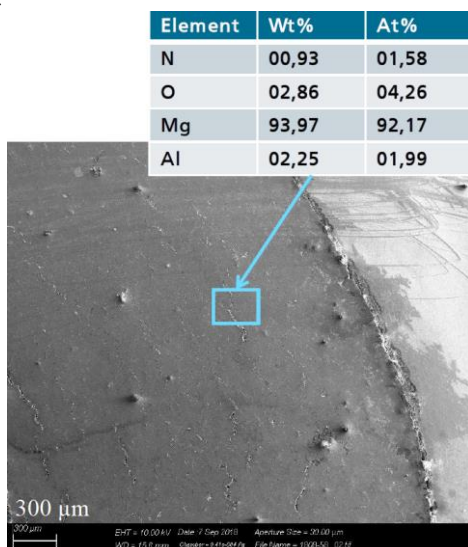


Рисунок 4 – Элементный анализ композита Mg-AlN

Из полученных РЭМ изображений (рисунок 5а) установлено, что магниевые зёрна значительно деформировались в процессе ударно-волнового компактирования, но при этом средний размер не изменился по отношению к исходному порошку и составил около 90 мкм. Наночастицы в композите магний-нитрид алюминия распределены достаточно равномерно. При этом малая часть наночастиц всё же агломерировалась, но их средний размер не превышает 500 нм.

волновым компактированием 34 ± 1 HV и литого магния технической чистоты 30 ± 1 HV (рисунок 5г).

В шестой главе приведены результаты исследования структуры и деформационного поведения при растяжении алюминиевых и магниевых сплавов, упрочнённых наночастицами. Средний размер зерна исходного сплава АК7, полученного с использованием ультразвуковой обработки, составил 310 мкм (рисунок 6а). Введение 0.2 масс. % трифторида скандия привело к уменьшению среднего размера зерна до 190 мкм (рисунок 6б). Дальнейшее увеличение количества наночастиц трифторида скандия до 1 масс. % привело к уменьшению этого показателя до 100 мкм (рисунок 6в).

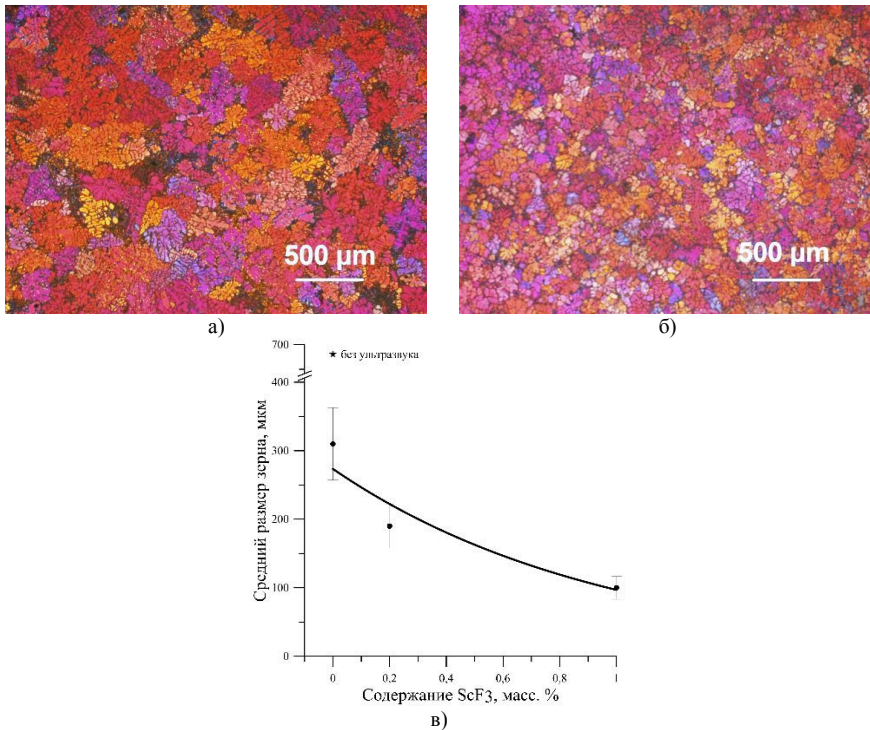


Рисунок 6 – Микроструктура сплава АК7 после УЗ обработки (а), АК7-1 % ScF₃ (б) и зависимость среднего размера зерна от содержания наночастиц (в)

Введение 0.2 % наночастиц ScF₃ в сплав приводит к одновременному увеличению предела прочности и пластичности сплавов с 130 до 195 МПа и с 1.4 до 4.2 % соответственно. Увеличение содержания трифторида скандия до 1 масс. % приводит к незначительному снижению пластичности до 4 % и увеличению предела прочности до 215 МПа. Также наблюдается увеличение микротвёрдости сплава АК7 при введении наночастиц с 63 до 75 HV (таблица 1, рисунок 7).

Таблица 1 – Механические свойства сплавов на основе АК7

Сплав	Твёрдость, HV	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Пластичность, %
АК7	63±2	85±5	130±15	1.4±0.2
АК7-0.2 масс. %ScF ₃	65±2	80±12	195± 20	4.2±0.3
АК7-1 масс. %ScF ₃	72±3	90±10	215±10	4±0.2

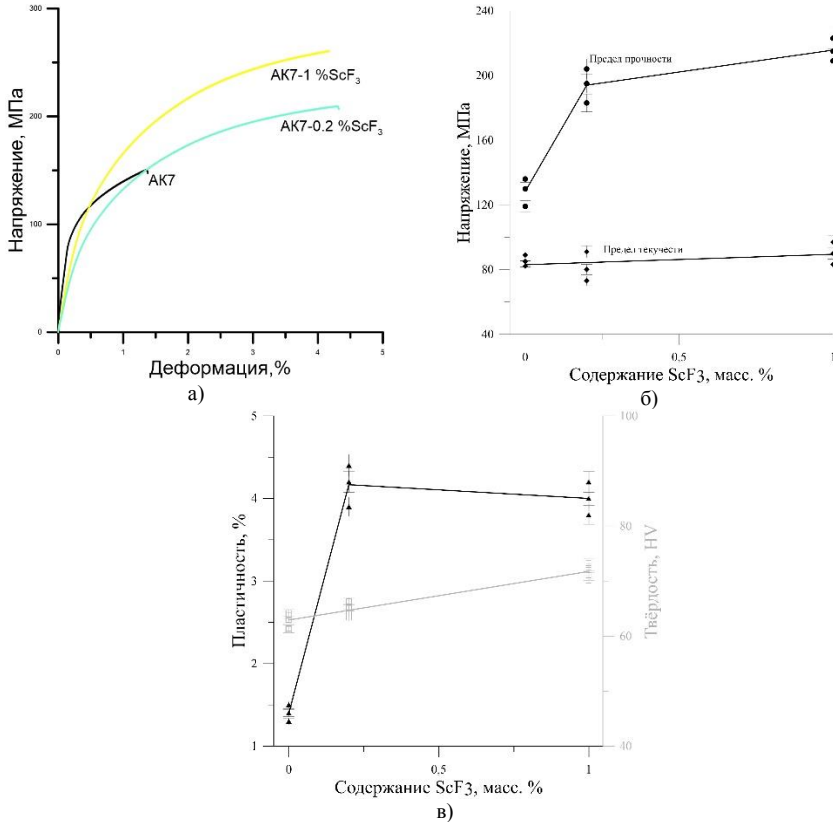


Рисунок 7 – Кривые нагружения исходного сплава АК7 и сплавов полученных на его основе (а), зависимости изменения предела прочности, предела текучести (б), пластичности и твёрдости (в)

Было сделано предположение о том, что в формирование высоких механических характеристик сплава вносят вклад несколько механизмов упрочнения, такие как передача нагрузки от частиц (6) к матрице, измельчение зерна (7) и разность коэффициентов теплового расширения (КТР) матрицы и частиц (8). Согласно проведённым расчётам, при использовании наночастиц трифторида скандия доминирующим механизмом

упрочнения является разность коэффициентов теплового расширения матрицы и частиц, который составил 20 МПа, рассчитанный по выражению.

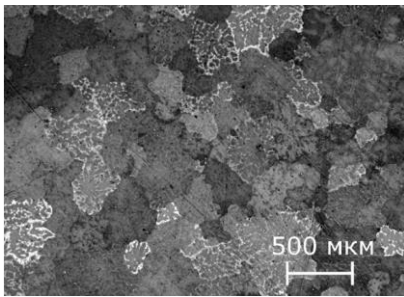
$$\Delta\sigma_{load} = 0.5V_p\sigma_m \quad (6)$$

$$\Delta\sigma_{GR} = k_y(D^{\frac{1}{2}} - D_0^{\frac{1}{2}}) \quad (7)$$

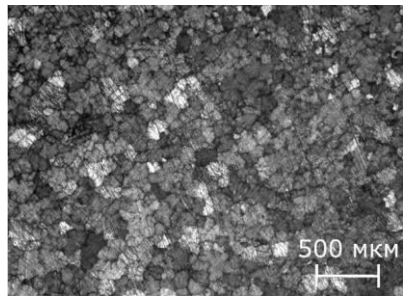
$$\Delta\sigma_{CTE} = \beta Gb \left(\frac{12(\alpha_m - \alpha_p)\Delta T V_p}{bd_p(1 - V_p)} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

где σ_m – предел текучести матричного сплава, D и D_0 – размер зерна материала, k_y – коэффициент Холла-Петча, β – константа, α_m – КТР алюминиевой матрицы ($23 \times 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$), α_p – КТР упрочняющих частиц ($-8 \times 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$), ΔT – разность между температурой синтеза и комнатной температурой, d_p – среднее расстояние между кластерами ($\sim 3 \text{ мкм}$), G – модуль сдвига матрицы.

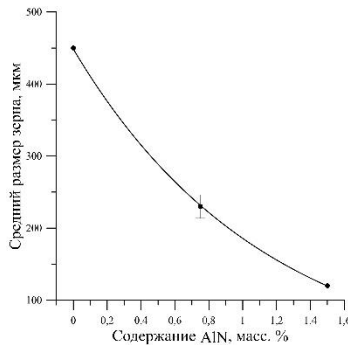
В образцах сплава МЛ12 (рисунок 8), содержащих нитрид алюминия, наблюдается уменьшение среднего размера зерна с 450 мкм (исходный сплав) до 230 мкм (0.75 масс. % AlN) и с 450 мкм (исходный сплав) до 120 мкм (1.5 масс. % AlN).



а)



б)



в)

Рисунок 8 – Структура исходного сплава МЛ12 (а), сплава МЛ12+1.5 масс. % AlN (б) и изменение среднего размера зерна сплава МЛ12 в зависимости от содержания наночастиц (в)

Измерение плотности полученных сплавов позволило установить, что пористость исходного сплава МЛ12 не превышает 5 %, а введение наночастиц способствует её увеличению до 10 %. Механические испытания магниевых сплавов при растяжении (рисунок 9) показали, что несмотря на увеличение пористости, введение 1.5 масс. % наночастиц AlN в сплав МЛ12 приводит к одновременному увеличению прочности и удлинению со 150 ± 11 до 210 ± 16 МПа и с 7 ± 0.5 до 18 ± 1 % соответственно. При этом твёрдость сплава не изменяется и составляет $\sim 60 \pm 5$ HV. Такое увеличение прочностных характеристик сплава по сравнению с исходным сплавом МЛ12 связано с наличием структурных неоднородностей значительно влияющих на конечные механические свойства материала.

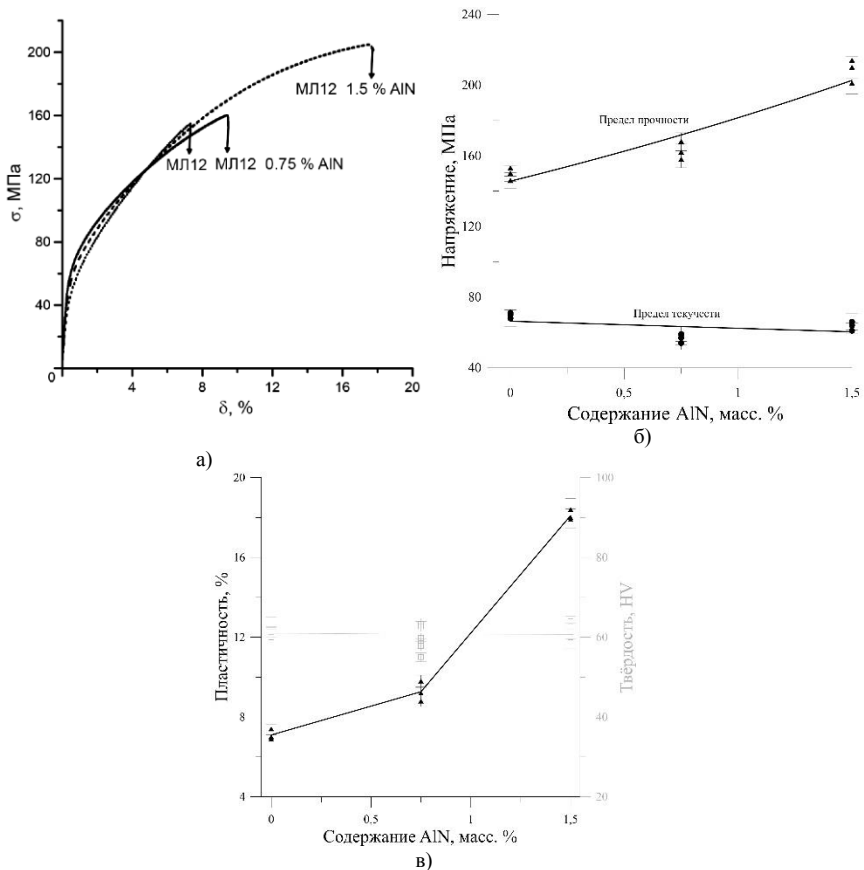


Рисунок 9 – Кривые нагружения исходного сплава АК7 и сплавов полученных на его основе (а), зависимости изменения предела прочности, предела текучести (б), пластичности и твёрдости (в)

Микроструктура сплава МЛ15 (рисунок 10) представлена равноосными зёрнами, размер (d_0) которых варьируется от 400 до 800 мкм, средний $d_0 \sim 610$ мкм. Введение наночастиц нитрида алюминия 0.5 масс. % привело к формированию более однородной микроструктуры сплава МЛ15-0.5 масс. % AlN, размер зёрен варьируется от 350 до 450 мкм, а средний $d_0 \sim 420$ мкм.

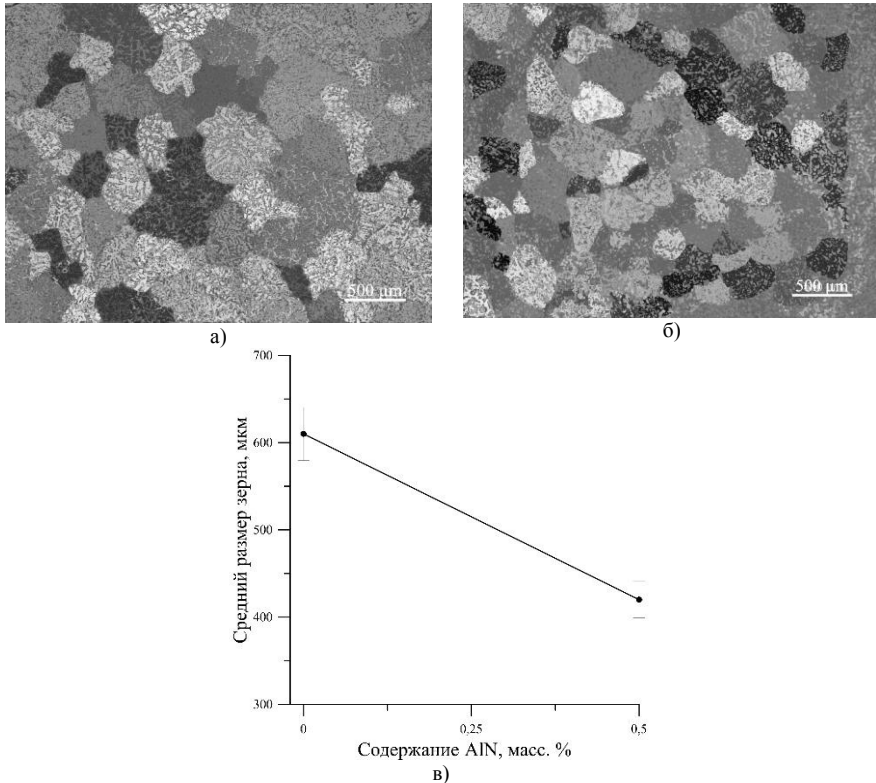


Рисунок 10 – Микроструктура сплава МЛ15 (а), сплава МЛ15-0.5 масс.%AlN (б) и зависимость среднего размера зерна магниевого сплава МЛ15 от содержания наночастиц AlN (в)

РЭМ изображения (рисунок 11) микроструктуры полученных материалов показали, что введение наночастиц нитрида алюминия в магниевый сплав МЛ15 не приводит к значительным изменениям в микроструктуре магниевой матрицы. Незначительно (с 2 до 4 %) увеличивается пористость. Элементный анализ представленных поверхностей не позволяет определить азот в фазовом составе материала из-за малого содержания.

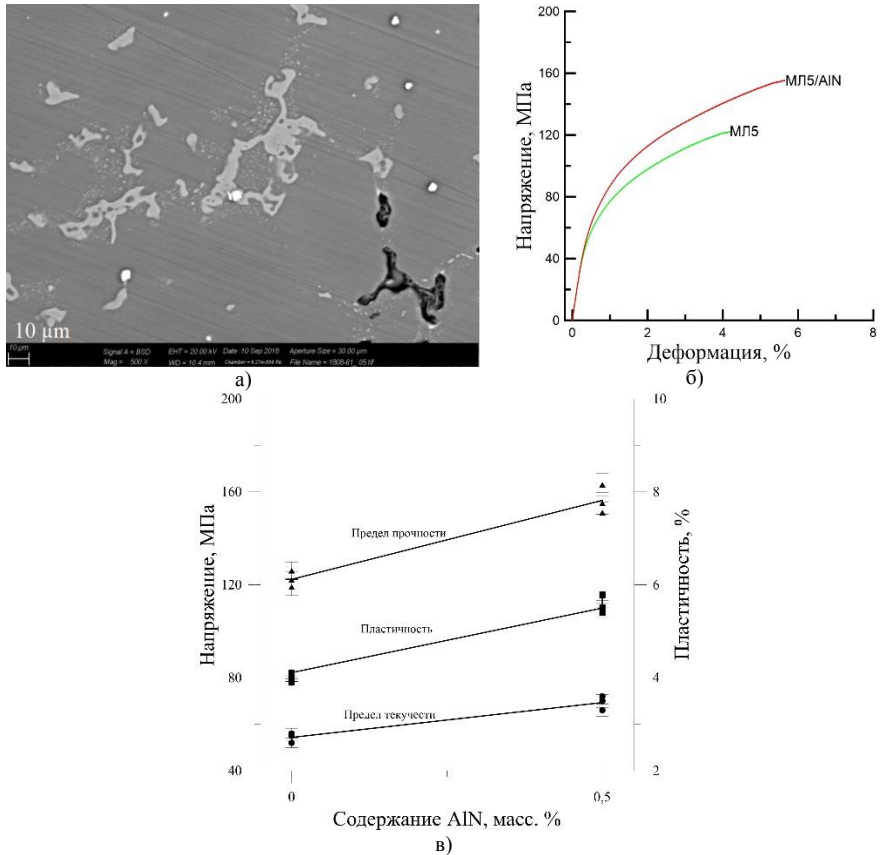


Рисунок 11 – РЭМ изображение микроструктуры сплава МЛ5-0.5 масс.%AlN (а), диаграммы растяжения сплавов (б) и зависимость механических свойств от содержания наночастиц (в)

Эксперименты при растяжении показали, что введение наночастиц AlN приводит к увеличению условного предела текучести ($\sigma_{0.2}$) и предела прочности (σ_B) на 27 %, в то время как пластичность (δ) увеличилась на 37.5 % (таблица 2).

Таблица 2 – Экспериментальные данные образцов магниевых сплавов

Сплав	Размер зерна, μm	$\sigma_{0.2}$, МПа	σ_B , МПа	Пластичность, %
МЛ5 исходный	610±19	55±4	122±9	4±0.4
МЛ5-0.5 масс.%AlN	420±14	70±6	155±11	5.5±0.6

С использованием лазерного Допплеровского измерителя скорости VISAR были получены профили скорости свободной поверхности и результаты измерений откольной прочности сплавов в зависимости от скорости деформирования в волне разрежения литейного магниевого сплава МЛ5 и сплава МЛ5-0.5 масс.%AlN (рисунок 12).

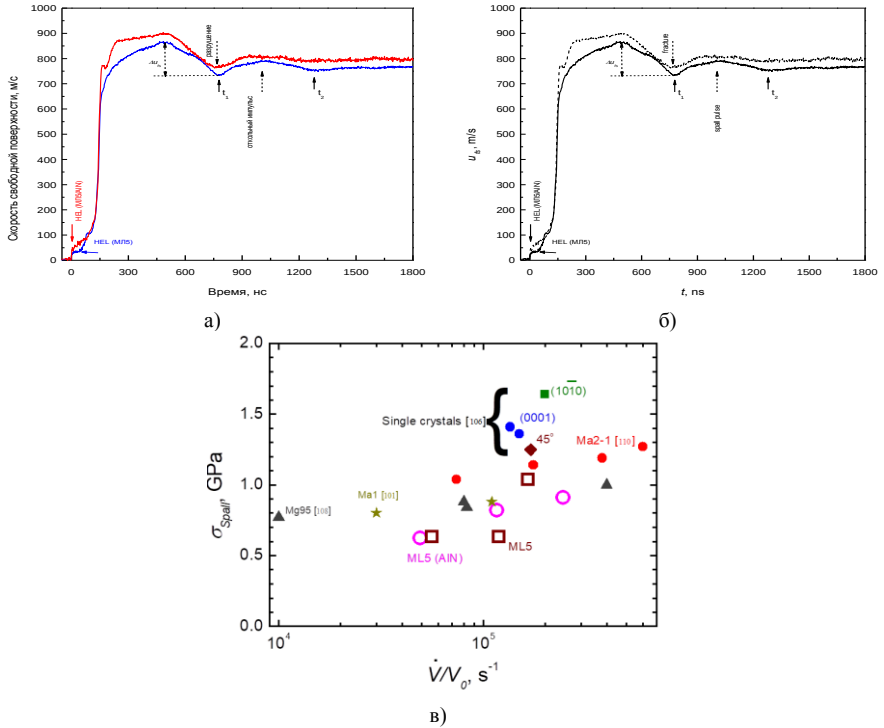


Рисунок 12 – Профили скорости свободной поверхности литейного магниевого сплава МЛ15 и сплава МЛ15-0.5 масс. %AlN с ударником толщиной 2 мм (а), 0.8 мм (б) и результаты измерений откольной прочности сплавов в зависимости от скорости деформирования в волне разрежения (в)

Введение наночастиц нитрида алюминия способствует увеличению динамического предела текучести с 174 до 268 МПа для ударника толщиной 2 мм и с 158 до 196 МПа для ударника толщиной 0.8 мм, откольной прочности с 635 до 820 МПа для ударника толщиной 0.8 мм (таблица 3).

Таблица 3 – Результаты измерений динамических пределов упругости и откольной прочности образцов литейного магниевого сплава МЛ15 и сплава МЛ15-0.5 масс. %AlN

Сплав	$h_{образца}$, мм	$h_{ударника}$, мм	σ_{HEL} / σ_T , МПа	σ_{spall} , МПа	h_{spall} , мм
МЛ15	4.895	2.009	174 / 102	634	1.43
МЛ15-0.5 масс. %AlN	4.890	1.995	268 / 157	626	1.28
МЛ15	4.894	0.732	158 / 93	635	0.32
МЛ15-0.5 масс. %AlN	4.898	0.725	196 / 115	820	0.64

В заключении приведены основные научные результаты и выводы, полученные в диссертационной работе:

1. Исследованы механические свойства новых дисперсно-упрочненных алюминиевых и магниевых сплавов на основе порошковых смесей Al-ScF_3 и Mg-AlN , полученных с использованием механического перемешивания в стеариновой кислоте и петролейном эфире. Показано, что равномерное распределение в объеме указанных сплавов наночастиц ScF_3 или AlN с концентрацией до 1.5 масс. % приводит уменьшению размеров зерна в 5 раз и к повышению предела прочности на 79 %, а деформации до разрушения в 2.4 раза.

2. Предложенная математическая модель ударно-волнового компактирования порошковых материалов позволяет рассчитывать пороговые значения давления и время воздействия для получения прочного компакта, исходя из свойств материала частиц.

3. Установлено, что ударно-волновое компактирование не влияет на кристаллическую структуру и фазовый состав порошковой смеси $\text{Mg-5\%AlN}$, что позволяет увеличить твёрдость ударно-компактированного композита $\text{Mg-5\%AlN}$ с 30 до 45 HV за счет сохранения наночастиц нитрида алюминия в его структуре.

4. Установлено, что введение наночастиц ScF_3 в алюминиевый сплав АК7 приводит к одновременному увеличению предела прочности и пластичности сплава с 130 до 215 МПа и с 1.4 до 4 %. Эффект может быть описан при учете вкладов трёх физических механизмов: передачи нагрузки от частиц к матрице, уменьшения среднего размера зерна и разности коэффициентов термического расширения алюминиевой матрицы и частиц ScF_3 .

5. Установлено, что введение 1.5 масс. % наночастиц нитрида алюминия в сплав МЛ12 приводит к одновременному увеличению прочности и пластичности с 150 до 210 МПа и с 7 до 18 % соответственно за счёт вклада передачи нагрузки от частиц к матрице и закона Холла-Петча.

6. Установлено, что введение 0.5 масс. % наночастиц нитрида алюминия приводит к измельчению размера зерна магниевого сплава МЛ15, за счёт чего происходит увеличение механических характеристик сплава при квазистатическом растяжении предел текучести с 55 до 70 МПа, предел прочности с 122 до 155 МПа, пластичности с 4 до 5.5 %.

7. Установлено, что дисперсное упрочнение сплавов магния позволяет существенно повысить величины Гюгониевского предела упругости и откольной прочности. Показано, что введение 0.5 масс.% наночастиц нитрида алюминия приводит к повышению динамического предела текучести с 174 до 268 МПа для ударника толщиной 2 мм, с 158 до 196 МПа для ударника толщиной 0.8 мм, и повышению откольной прочности с 635 до 820 МПа для ударника толщиной 0.8 мм.

СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, включённых в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук:

1. Данилов П. А. Анализ влияния внешних физических воздействий на процессы литья легких сплавов / П. А. Данилов, **А. П. Хрусталёв**, А. Б. Ворожцов, И. А. Жуков, В. В. Промахов, М. Г. Хмельёва, Е. В. Пикушак, А. В. Кветинская // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2018. – № 55. – С. 84–98. – DOI: 10.17223/19988621/55/8. – 0,93 / 0,21 а.л.

в переводной версии журнала, входящей в Web of Science:

Danilov P. A. Analysis of the effect of external physical fields on the casting of light alloys / P. A. Danilov, **A. P. Khrustalev**, A. B. Vorozhtsov, I. A. Zhukov, V. V. Promakhov, M. G. Khmeleva, E. V. Pikushchak, A. V. Kvetinskaya // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta-Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics. – 2018. – № 55. – P. 84–98.

2. **Хрусталёв А. П.** Влияние структуры металломатричного композита магний-нитрид алюминия на его сопротивление деформированию при квазистатическом и динамическом нагружении / А. П. Хрусталёв, Г. В. Гаркушин, И. А. Жуков, С. В. Разоренов // Письма в журнал технической физики. – 2018. – Т. 44, вып. 20. – С. 20–28. – 1,12 / 0,28 а.л.

в переводной версии журнала, входящей в Web of Science:

Khrustalyov A. P. The Influence of the Structure of a Magnesium–Aluminum Nitride Metal–Matrix Composite on the Resistance to Deformation under Quasi–Static and Dynamic Loading / A. P. Khrustalyov, G. V. Garkushin, I. A. Zhukov, S. V. Razorenov // Technical Physics Letters. – 2018. – Vol. 44, № 10. – P. 912–915. – DOI: 10.1134/S1063785018100255.

3. **Хрусталёв А. П.** Структура и механические свойства композиционных материалов на основе магния, упрочненных наночастицами нитрида алюминия / А. П. Хрусталёв, С. А. Ворожцов, И. А. Жуков, В. В. Промахов, В. Х. Даммер, А. Б. Ворожцов // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2016. – Т. 59, № 12. – С. 176–178. – 0,19 / 0,08 а.л.

в переводной версии журнала, входящей в Web of Science:

Khrustalyov A. P. Structure and Mechanical Properties of Magnesium-Based Composites Reinforced with Nitride Aluminum Nanoparticles / A. P. Khrustalyov, S. A. Vorozhtsov, I. A. Zhukov, V. V. Promakhov, V. Kh. Dammer, A. B. Vorozhtsov // Russian Physics Journal. – 2017. – Vol. 59, № 12. – P. 2183–2185. – DOI: 10.1007/s11182-017-1034-6.

4. Vorozhtsov S. The Influence of ScF₃ Nanoparticles on the Physical and Mechanical Properties of New Metal Matrix Composites Based on A356 Aluminum Alloy / S. Vorozhtsov, I. Zhukov, V. Promakhov, E. Naydenkin, **A. Khrustalyov**, A. Vorozhtsov // JOM. – 2016. – Vol. 68, № 12. – P. 3101–3106. – DOI: 10.1007/s11837-016-2141-5. – 0,37 / 0,11 а.л. (*Web of Science*).

5. Vorozhtsov S. A. The Application of External Fields to the Manufacturing of Novel Dense Composite Master Alloys and Aluminum-Based Nanocomposites / S. A. Vorozhtsov, D. G. Eskin, J. Tamayo, A. B. Vorozhtsov, V. V. Promakhov, A. A. Averin, **A. P. Khrustalyov** // Metallurgical and Materials Transactions A. – Physical Metallurgy and Materials Science. – 2015. – Vol. 46A, is. 7. – P. 2870–2875. – DOI: 10.1007/s11661-015-2850-3. – 0,37 / 0,12 а.л. (*Web of Science*).

Патенты:

6. Патент 2654225 Российская Федерация, В22F 3/08, C1. Способ взрывного компактирования порошковых материалов / Архипов В. А. (RU), Ворожцов А. Б. (RU), Ворожцов С. А. (RU), Промахов В. В. (RU), Жуков А. С. (RU), **Хрусталёв А. П.** (RU), Жуков И. А. (RU); заявитель и патентообладатель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» (ТГУ) (RU). – № 2017119053; заявл. 31.05.2017, опубл. 17.05.2018, Бюл. № 14.

7. Патент 2631996 Российская Федерация, МПК C22C 1/03, C22C 26/00, C22C 21/00, B82Y 30/00, C2. Способ получения дисперсно-упрочнённого нанокompозитного материала на основе алюминия / Ворожцов А. Б. (RU), Архипов В. А. (RU), Ворожцов С. А. (RU), Промахов В. В. (RU), Жуков И. А. (RU), **Хрусталёв А. П.** (RU); заявитель и патентообладатель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» (ТГУ) (RU). – № 2015151548; заявл. 01.12.2015, опубл. 29.09.2017, Бюл. № 28 (II ч.).

8. Патент 2621198 Российская Федерация, МПК C22C 1/03, C22C 23/00, C22C 32/00, B82Y 30/00, C2. Способ получения упрочнённого нанокompозиционного материала на основе магния / Ворожцов А. Б. (RU), Архипов В. А. (RU), Ворожцов С. А. (RU), Промахов В. В. (RU), Жуков А. С. (RU), Жуков И. А. (RU), **Хрусталёв А. П.** (RU), Кветинская А. В. (RU); заявитель и патентообладатель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» (ТГУ) (RU). – № 2015144401; заявл. 15.10.2015, опубл. 01.06.2017, Бюл. № 16 (II ч.).

Статьи в сборниках материалов конференций, представленных в зарубежных научных изданиях, входящих в Web of Science и Scopus:

9. Vorozhtsov S. Structure and Deformation Characteristics in Magnesium Alloy ZK51A Reinforced with AlN Nanoparticles [Electronic resource] / S. Vorozhtsov, **A. Khrustalyov**, M. Khmeleva, I. Zhukov // AIP Conference Proceedings. – 2016. – Vol. 1772 : 13th International conference of students and young scientists «Prospects of Fundamental Sciences Development» (PFSD). Tomsk, Russia, April 26–29, 2016. – Article number 030004. – 6 p. – URL: <https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.4964542> (access date: 12.12.2018). – DOI: 10.1063/1.4964542. – 0,37 / 0,19 а.л. (*Web of Science*).

10. **Khrustalev A.** Influence of scandium fluoride on the structure and phase composition of Al-Si alloy [Electronic resource] / A. Khrustalev, A. Vorozhtsov, L. Kazantseva, V. Promakhov, M. Kalashnikov, D. Eskin, I. Kurzina // MATEC Web of Conferences. – Vol. 243 : 14th International Workshop on High Energy and Special Materials: Demilitarization, Antiterrorism and Civil Application, HEMs-2018. Tomsk, Russia, September 03–05, 2018. – Article number 00020. – 5 p. – URL: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2018/102/mateconf_hems2018_00020.pdf (access date: 12.12.2018). – DOI: 10.1051/mateconf/201824300020. – 0,3 / 0,11 а.л. (*Scopus*).

Публикации в прочих научных изданиях:

11. Жуков И. А. Использование тугоплавких наночастиц в технологиях получения алюминиевых и магниевых сплавов с повышенными физико-механическими свойствами / И. А. Жуков, А. Б. Ворожцов, В. Х. Даммер, М. Г. Хмелева, **А. П. Хрусталёв** // Цветные металлы и минералы : сборник докладов десятого международного конгресса. Красноярск, 10–14 сентября 2018 г. – Красноярск, 2018. – С. 1459–1467. – 0,56 / 0,17 а.л.

12. Кахидзе Н. И. Исследование влияния неметаллических включений на структуру и механические свойства алюминиевых композиционных материалов / Н. И. Кахидзе, **А. П. Хрусталёв**, А. Б. Ворожцов // Высокоэнергетические и специальные материалы: демилитаризация антитерроризм и гражданское применение : сборник тезисов XIV Международной конференции «HEMs-2018». Томск, 03–05 сентября 2018 г. – Томск, 2018. – С. 190–191. – 0,12 / 0,08 а.л.

13. Валихов В. Д. Синтез, исследование структуры и механических свойств лёгких сплавов на основе магния / В. Д. Валихов, **А. П. Хрусталёв**, А. Б. Ворожцов // Высокоэнергетические и специальные материалы: демилитаризация антитерроризм и гражданское применение : сборник тезисов XIV Международной конференции «HEMs-2018». Томск, 03–05 сентября 2018 г. – Томск, 2018. – С. 223–224. – 0,12 / 0,07 а.л.

14. **Khrustalyov A.** Structural and mechanical properties of magnesium based materials processed by explosive compaction / A. Khrustalyov, S. Vorozhtsov // Energetic Materials and their Applications : abstracts of the 6th International Symposium. Sendai, Japan, November 06–10, 2017. – Sendai, 2017. – P. 164. – 0,06 / 0,04 а.л.

15. Kudryashova O. B. Ultrasonic impact on a metal melt containing electrostaticly charged nanoparticles / O. B. Kudryashova, S. A. Vorozhtsov, M. Yu. Stepinkina, **A. P. Khrustalyov** // Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надёжных конструкций : тезисы докладов международной конференции. Томск, 09–13 октября 2017 г. – Томск, 2017. – С. 377–378. – 0,12 / 0,05 а.л.

16. **Хрусталёв А. П.** Исследование свойств алюминиевых сплавов, модифицированных ультрадисперсными порошками оксида алюминия / А. П. Хрусталёв, И. А. Жуков, С. А. Ворожцов // Перспективы развития фундаментальных наук : сборник научных трудов XIV Международной

конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. Томск, 25–28 апреля 2017 г. – Томск, 2017. – Т. 2 : Химия. – С. 114–116. – 0,19 / 0,1 а.л.

17. **Хрусталеv А. П.** Деагломерация и распределение частиц в металлическом расплаве / А. П. Хрусталеv, С. А. Ворожцов, А. В. Кветинская, О. Б. Кудряшова // Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики : сборник материалов VI Международной молодежной научной конференции. Томск, 16–18 ноября 2016 г. – Томск, 2016. – С. 110–111. – 0,06 / 0,02 а.л.

18. Khmeleva M. G. The application of external fields to manufacturing new MMC based on aluminum alloy reinforced with ScF_3 nanoparticles with negative coefficient of thermal expansion / M. G. Khmeleva, **A. P. Khrustalyov**, S. A. Vorozhtsov // Перспективы развития фундаментальных наук : сборник научных трудов XIII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. Томск, 26–29 апреля 2016 г. – Томск, 2016. – Т. 2 : Химия. – С. 458–460. – 0,19 / 0,09 а.л.

19. **Khrustalyov A. P.** The physico-mechanical properties of Mg alloy reinforced with ALN nanoparticles / A. P. Khrustalyov, S. A. Vorozhtsov, V. V. Promakhov // Перспективы развития фундаментальных наук : сборник научных трудов XIII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. Томск, 26–29 апреля 2016 г. – Томск, 2016. – Т. 2 : Химия. – С. 470–472. – 0,19 / 0,1 а.л.

Издание подготовлено в авторской редакции.
Отпечатано на участке цифровой печати
Издательского Дома Томского государственного университета
Заказ № 6016/19 от «03» июля 2019 г. Тираж 100 экз.
г. Томск Московский тр.8 тел. 53-15-28