

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Хрусталёва Антона Павловича  
«Исследование физико-механических свойств дисперсно-упрочнённых  
композитов на основе алюминия и магния»,  
представленную на соискание учёной степени кандидата  
физико-математических наук  
по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твёрдого тела

Сплавы алюминия и магния являются основными конструкционными материалами, демонстрирующими рекордные значения удельной прочности и поэтому широко используемыми в качестве материалов, прежде всего для изготовления деталей конструкций планеров летательных аппаратов и других изделий. Кроме этого, в последнее десятилетие активно разрабатываются медицинские биodeградируемые магниевые сплавы, одним из требований к которым является высокая удельная прочность. Ресурсы современных методов литья и термо-механической обработки литейных и деформируемых (после получения традиционными методами литья), позволяющие улучшить достигнутые на сегодня служебные характеристики рассматриваемых сплавов во многом исчерпаны, поэтому одним из наиболее активно развиваемых направлений улучшения механических и других свойств алюминиевых и магниевых сплавов является применение методов порошковой металлургии. При этом принципиально важным является поиск новых способов компактирования порошков и их обработки для формирования заданной структуры, достижения максимальных эффектов дисперсного (в том числе наноструктурного), твердорастворного и субструктурного упрочнения. Именно этим вопросам посвящена диссертационная работа А. П. Хрусталёва и её актуальность не вызывает сомнений.

Структура диссертации сформирована в традиционном виде и состоит из введения, шести глав, заключения и списка использованной литературы. Диссертация изложена на 127 страницах машинописного текста, включая 70 рисунков, 13 таблиц. Список литературы включает 120 наименований.

**Во введении** представлены все требуемые данные о диссертационной работе, в том числе обоснование актуальности, степень разработанности темы исследования, цель работы и задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость диссертационного исследования, сформулированы выносимые на защиту научные положения и другие необходимые данные.

Оригинальной части работы предшествует аналитический обзор литературных данных (**первая глава диссертации**), как по методам получения и обработки, так и по результатам исследований структуры и свойств современных сплавов и композитов с металлической матрицей и, прежде всего, систем на основе алюминия и магния.

**Вторая глава** диссертации посвящена постановке задач исследований, обоснованию выбора материалов и методик исследования, включающего не только физический эксперимент и технологические разработки,

но и математическое моделирование процессов ударно-волнового компактирования порошков и порошковых смесей. Подробно описан метод ударно-волнового компактирования изучаемых порошковых смесей и методы литья для получения композита магний-нитрид алюминия, алюминиевых и магниевых сплавов, содержащих наночастицы в качестве упрочнителя.

**В третьей главе диссертации** даны характеристики исходных порошков и представлены результаты экспериментальных работ, относящихся к технологиям получения порошков и структуре дисперсно-упрочненных композитов.

**В четвёртой главе** описана математическая модель для расчета величины давления, достаточного для образования плотного контакта между частицами порошков в порошковых смесях при ударно-волновом компактировании. Дано обоснование стадийности этого процесса. Разработанная модель применена для расчёта условий реализации процессов плавления, а также струйной очистки поверхности порошков, необходимой для ускоренного формирования плотного компакта из порошковой заготовки. Проверка корректности модели проведена на примере порошков алюминиевого сплава и алмазного порошка.

**Пятая глава** содержит описание результатов исследований взаимосвязи структуры и фазового состава с особенностями механических свойств полученного методом ударно-волнового компактирования композита магний - нитрид алюминия.

**Шестая, самая большая по объёму, глава** диссертации посвящена изучению процессов формирования, в том числе при использовании ультразвуковой обработки в процессе получения сплава, и влияния структуры на эффекты деформационного упрочнения при растяжении исследуемых алюминиевых и магниевых сплавов, упрочнённых наночастицами.

**В заключении** приводятся основные результаты и выводы диссертационной работы.

Основные результаты диссертации А. П. Хрусталёва отвечают заявленным целям диссертационного исследования.

Достоверность и новизна научных положений, выводов и практических рекомендаций

Полученные результаты работы, безусловно, отличаются научной новизной, так как расширяют и уточняют знания о закономерностях деформации и разрушения дисперсно-упрочнённых сплавов на основе алюминия и магния при квазистатическом и динамическом нагружении.

**К наиболее важным результатам, полученным в диссертационной работе, можно отнести следующие:**

1. Впервые, судя по доступным литературным источникам, реализована постановка задачи и её выполнение в рамках комплексного сравнительного исследования процессов получения особенностей структуры и формирования дисперсно-упрочненного состояния с наноразмерными частицами вторичных фаз и влияния указанных факторов на деформационное поведение композитов на основе сплавов алюминия и магния, получаемых традиционными методами литья (в том числе с использованием ультразвуковой обработки расплава) и ударно-волнового компактирования (УВК). Это позволило обосновать

практические рекомендации по улучшению свойств указанных сплавов, широко применяемых в практике.

2. Важным дополнением к комплексной постановке сравнительных исследований явилась проведенная в рамках диссертационной работы разработка математической модели ударно-волнового компактирования порошковых материалов. Эта модель дала возможность оценить пороговые значения давления и необходимого времени воздействия для формирования прочного компакта с учетом физических характеристик материала частиц.

Достоверность результатов и выводов диссертации подтверждается оригинальной и, вместе с тем надежно обоснованной постановкой задачи экспериментальных исследований в комплексе с разработкой теоретической модели, а также применением современного сертифицированного испытательного оборудования и экспериментальных методик.

### **Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Выносимые на защиту положения, выводы к диссертационной работе и практические рекомендации надежно обоснованы результатами экспериментальных и теоретических исследований, соответствуют известным принципам современной механики деформируемого твердого тела.

### **Значимость для науки и практики полученных автором результатов**

Полученные в диссертационной работе результаты расширяют известные представления о закономерностях пластической деформации и разрушения алюминиевых и магниевых дисперсно-упрочнённых сплавов, и композитов на их основе.

Разработанная модель расширяет возможности применения нового метода ударно-волнового компактирования порошков для получения композитов и элементов конструкций различных изделий техники. Результаты экспериментальных исследований и проведенный в диссертационной работе их анализ обеспечивают расширение объема знаний о закономерностях процессов деформации и разрушения, в том числе при сравнении для условий квазистатического и динамического нагружений дисперсно-упрочнённых сплавов.

Результаты диссертационной работы могут применяться при решении как прикладных, так и научных поисковых задач. Установленные закономерности процессов деформирования исследованных дисперсно-упрочнённых сплавов будут полезны при проектировании элементов новой техники в авиакосмической, судостроительной, автомобилестроительной и других отраслях техники, а также при разработке медицинских магниевых сплавов нового поколения.

### **Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации**

Результаты диссертационной работы А. П. Хрусталёва могут быть использованы в академических, отраслевых и вузовских организациях и предприятиях, выполняющих исследовательские и опытно-конструкторские работы, связанные с созданием новых материалов для техники и медицины из исследованных в диссертационной работе материалов или их аналогов. К таким организациям, в частности, относятся: Всероссийский институт авиационных материалов (г. Москва), ЦНИИ «Прометей» (г. Санкт-Петербург), НИТУ

«МИСИС» (г. Москва), Центральный институт авиационного моторостроения им. П. И. Баранова (г. Москва) и другие.

### **Замечания по содержанию и оформлению диссертации**

По диссертационной работе А. П. Хрусталёва можно сделать следующие замечания:

1. Несмотря на то, что существующими правилами не запрещается выносимые на защиту Положения формулировать в виде перечислений названий полученных результатов (именно так это и сделано в диссертационной работе), в выполненной на актуальную тему и на высоком научном уровне рассматриваемой диссертационной работе, содержащей установленные конкретные новые закономерности процессов формирования изучаемых композитов в комплексе с построением математической модели, установлением особенностей структуры и её влияния на механические свойства, закономерностей деформационного поведения вполне можно было бы сформулировать и конкретные Положения, отражающие научную суть полученных результатов и их практическое значение.

2. В разделе 5 диссертационной работы (см. стр. 84–89) при «более глубоком анализе структуры» (стр. 86) автор диссертации ограничивается исследованиями с использованием методов только растровой электронной микроскопии, в том числе с анализом распределения образующим частицу химических элементов по объему материала (картирование). Такие исследования действительно являются необходимым признаком наличия наночастиц в матрице сплава магний – нитрид алюминия, однако для однозначного заключения о размере, кристаллической структуре и характере сопряжения мелкодисперсных частиц второй фазы с кристаллической решеткой матрицы необходимо проведение исследований с использованием просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ) с достаточно высоким, а лучше – с прямым разрешением кристаллической решетки. Например, характер сопряжения частиц с матрицей оказывает существенное влияние на уровень упругих внутренних напряжений на границе раздела частица-матрица, а также возможность релаксации микронапряжений, возникающих за счет различия физических свойств частиц и матрицы. Последнее может быть важным для проводимого в диссертации анализа механизмов деформационного поведения исследуемых в диссертационной работе дисперсно-упрочненных композитов.

Автор диссертации владеет методом ПЭМ, поскольку данная методика была им использована при изучении распределения наночастиц трифторида скандия по размерам в исходном порошке (см. стр. 69), поэтому данное замечание можно рассматривать как пожелание для дальнейшей работы автору диссертации.

Сделанные замечания не являются принципиальными и не снижают общей, безусловно высокой, оценки диссертационной работы, которая, в дополнение к указанным выше достоинствам, написана грамотным языком и аккуратно оформлена.

**Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней**

Тема диссертационного исследования соответствует п. 4 паспорта специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела.

Оформление диссертации в целом отвечает требованиям, установленным ВАК. Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации. Основные результаты диссертации отражены в 19 работах, в том числе 5 статьях 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.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что диссертационная работа Хрусталёва Антона Павловича «Исследование физико-механических свойств дисперсно-упрочнённых композитов на основе алюминия и магния» по содержанию, научной новизне, объёму проведённых исследований, теоретической и практической значимости результатов полностью соответствует требованиям п. 9 действующего Положения о присуждении учёных степеней, а её автор Хрусталёв Антон Павлович, заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твёрдого тела.

Официальный оппонент:

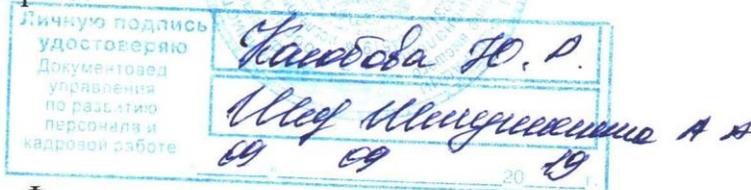
Заведующий кафедрой наноматериалов и нанотехнологий ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет» заслуженный деятель науки РФ, доктор физико-математических наук (01.04.07 – Физика конденсированного состояния), профессор

09 сентября 2019 г.

*Ю. Р. Колобов*

Колобов Юрий Романович

Подпись Ю. Р. Колобова удостоверяю:



Сведения об организации: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет»; 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85; (4722) 30-12-11; Info@bsu.edu.ru; http://www.bsu.edu.ru