



Государственный  
научный центр РФ  
ЦНИИТМАШ



атомэнергомаш  
ГРУППА КОМПАНИЙ РОСАТОМА



Государственный научный центр  
Российской Федерации  
Акционерное общество  
«Научно-производственное объединение  
«Центральный научно-исследовательский институт  
технологии машиностроения»  
\* \* \*

(АО «НПО «ЦНИИТМАШ»)  
115088, Москва, Шарикоподшипниковская, 4  
Телефон: (495)675-83-02. Факс: (495)674-21-96  
<http://www.cniitmash.ru>  
E-mail: [cniitmash@cniitmash.ru](mailto:cniitmash@cniitmash.ru)

УТВЕРЖДАЮ  
Заместитель генерального директора  
по научной работе  
ГНЦ РФ АО «НПО «ЦНИИТМАШ»  
Проф., д.т.н. Косырев К.Л.  
16 марта 2017 года



### Отзыв

ведущей организации о диссертационной работе Логачёвой Аллы Игоревны на тему: «Комплексная технология изготовления тонкостенных элементов методом порошковой металлургии для производства деталей из конструкционных и функциональных сплавов на основе титана и никеля для изделий ракетно-космической техники», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.16.06 «Порошковая металлургия и композиционные материалы».

**Актуальность темы.** Развитие ракетно-космической техники требует постоянного повышения эксплуатационных характеристик, надежности и ресурса элементов конструкций летательных аппаратов, и в частности, повышения работоспособности турбонасосных агрегатов ракетных двигателей. Рабочие характеристики критических элементов конструкции двигателей удалось повысить путем использования методов порошковой металлургии, которые обеспечивали высокую однородность химического состава и структуры деталей из жаропрочных сплавов на основе титана (BT5-1КТ) и никеля (ЭП741НП), что позволило изготовить диски ротора и крыльчатки двигателя 11Д122 с высокими энергетическими характеристиками.

Эффективность технологий порошковой металлургии для изготовления дисков и крыльчаток двигателей из жаропрочных сплавов указывает на принципиальный потенциал этих технологий применительно к другим критическим элементам летательных аппаратов – тонкостенным элементам их конструкции. Очевидно, что структурная и химическая однородность имеет особенно важное значение для тонкостенных деталей, поскольку различного

вида неоднородности вызывают локальное ослабление и повреждение материала. Однако до постановки настоящей работы не было создано эффективных технологий производства тонкостенных элементов конструкций методом порошковой металлургии. И это обстоятельство является одним из главных факторов, подтверждающих актуальность диссертационной работы А.И. Логачёвой, в которой представлены подобные технологии.

В тонкостенных конструкциях возрастает критическая роль дефектов кристаллической структуры материалов, и в первую очередь границ зерен. Поэтому предложенные в диссертации методы укрепления границ – повышение когезивной прочности путем специального легирования – особенно важны и актуальны применительно к тонкостенным элементам конструкций летательных аппаратов.

Новые технологии порошковой металлургии, представленные в работе А.И. Логачёвой, позволили автору приступить к решению актуальной задачи производства интерметаллидных сплавов конструкционного и функционального назначения. Кроме этого, возможность получения гранул малого размера ( $\leq 100$  мкм) открыло интересные перспективы их применения в актуальной области аддитивных технологий.

Поэтому не вызывает сомнений актуальность темы диссертационной работы А.И. Логачёвой, посвященной разработке научных основ модернизации жаропрочных сплавов на основе никеля, титана, никелидов титана со свойствами, отвечающими требованиям ракетно-космической техники нового поколения и комплексной технологии их получения методами порошковой металлургии.

Актуальность работы подтверждается ее выполнением в 2003 – 2015 гг. в рамках серии Государственных контрактов с Федеральным космическим агентством (Федеральная космическая программа России 2006-2015 гг.) и Федеральной целевой программы «Развитие оборонно-промышленного комплекса РФ на 2007 - 2010 годы и на период до 2015 года».

### **Научная новизна исследования и полученных результатов.**

Для разработки научных основ и создания технологии производства тонкостенных изделий методами порошковой металлургии потребовался всесторонний научный анализ и комплексная модернизация всего цикла получения изделий. Отметим наиболее существенные научные результаты, полученные в диссертационной работе.

1. Для разработки нового поколения титановых, никелевых и интерметаллидных сплавов применительно к тонкостенным деталям автором выделен «критически слабый» элемент микроструктуры – границы зерен - и предложены принципы укрепления границ зерен путем легирования

поверхностно-активными переходными металлами, которые повышают когезивную прочность границ. Такой научный подход является универсальным в двух отношениях: во-первых, он применим ко многим металлическим сплавам, включая сплавы на основе титана и никеля, и во-вторых, одновременно с укреплением границ зерен обеспечивает повышение энергии когезии матрицы сплавов. Установлены параметры, характеризующие влияние легирующих элементов на когезивную прочность границ (работа расщепления границы) и на энергию когезии объема (парциальная молярная энергия когезии), и предложены методы расчета указанных параметров. В работе представлены результаты расчетов параметров когезии в титановых и никелевых сплавах, установлены «полезные» легирующие элементы, легирование которыми обеспечило разработку нового поколения конструкционных сплавов. Большой удачей работы является практическая реализация теоретической концепции – разработка нового поколения жаропрочных сплавов на основе титана и никеля, химический состав и технология производства которых защищены патентами РФ.

2. Проведен анализ существующих способов производства порошков сплавов и для получения тонкостенных деталей автором выбрана гранульная металлургия (технология вращающегося электрода с плазменным нагревом (PREP)). Это очень важный результат работы, во многом обеспечивший ее успешное развитие. Действительно, модернизация всех звеньев существующей технологии позволила получить порошки титановых, никелевых и интерметаллидных сплавов, обладающие уникальным комплексом характеристик: сферической формы, без сателлитов, малого размера ( $\leq 100$  мкм), с низким содержанием примесей и включений. Основой модернизированной технологии является новая установка для получения микрослитков – гранул путем центробежного распыления заготовок в среде инертных газов («УЦРТ-9»), предназначенная для получения порошков (гранул) металлических и интерметаллидных сплавов с низким содержанием кислорода в гранулах - на уровне исходной заготовки. Данная установка используется в ОАО «Композит» как базовое оборудование для отработки новых технологий и производства высококачественных сферических гранул.

3. Разработана новая комплексная технология, сочетающая гранульную металлургию и винтовую прокатку, для получения изделий из интерметаллидного сплава на основе NiTi (ТН-1) с эффектом памяти формы. Данный сплав, имеющий высокие показатели функциональных свойств, использован для изготовления элементов замковых соединений для безударного разделения отсеков и спецоборудования ракетно-космической техники.

4. Разработанный автором новый гранулированный интерметаллидный сплав на основе Ni<sub>3</sub>Al для эксплуатации до температур 1250<sup>0</sup>С и изготовления из

него камер сгорания для жидкостных ракетных двигателей представляет большой интерес. Важной функциональной особенностью данного сплава является его хорошая свариваемость со сталью 12Х18Н10Т путем аргонодуговой сварки. Это позволило изготовить камеры сгорания из сплава на основе соединения  $Ni_3Al$  с приваренными к ней элементами форсуночной головки из стали 12Х18Н10Т. Стендовые огневые испытания опытных камер сгорания, проведенные по методике ФГУП «Центр Келдыша», показали хорошие результаты: параметры плазматрона при огневых испытаниях изменялись в сторону повышения максимальных значений температуры с  $1100^{\circ}C$  до  $1400^{\circ}C$ , при этом не наблюдалось существенного уноса интерметаллида  $Ni_3Al$  до температуры  $1580^{\circ}C$ .

5. Разработанная А.И. Логачёвой концепция изготовления тонкостенных элементов конструкции летательных аппаратов методом порошковой металлургии и ее полное технологическое обеспечение являются новыми и заслуживают высокой оценки. Это позволило изготовить тонкостенный бесшовный топливный бак из гранулированного титанового сплава ВТ 23 и бесшовный лейнер из гранул титанового сплав ВТ 6 для перспективных изделий ракетно-космической техники нового поколения с повышенными тактико-техническими характеристиками.

**Обоснованность и достоверность основных положений и результатов диссертации** не вызывает сомнений.

Основу методологии работы составили публикации и патенты отечественных и зарубежных исследователей, которые анализируются в диссертации. Главные технологические эксперименты проведены на установках модернизированного комплекса гранульной металлургии, основой которого является новая установка для получения гранул путем центробежного распыления заготовок в среде инертных газов («УЦРТ-9»). Обоснование данного выбора технологий представлено в диссертационной записке. Достоверность основных положений и результатов диссертации обеспечена:

- эффективным использованием и развитием фундаментальных методов теории сплавов,

- успешной разработкой и применением компьютерных методов конструирования сплавов, а также статистических методов обработки экспериментальных результатов,

- применением комплекса современных экспериментальных методов исследования структуры, химического состава и испытаний механических свойств и эксплуатационных характеристик конструкционных и функциональных материалов,

- внедрением новых технических решений на предприятиях ракетно-космической отрасли промышленности.

**Большое значение для науки и производства результатов**, полученных автором, не вызывает сомнений.

Разработка автором концепции легирования гранулированных конструкционных сплавов комплексом поверхностно-активных переходных металлов имеет фундаментальное значение для материаловедения. Очевидно, что аналогичный подход может быть использован не только для улучшения эксплуатационных характеристик жаропрочных титановых и никелевых сплавов, как это показано в работе А.И. Логачёвой, но и для других конструкционных и функциональных материалов, для которых важное значение имеют функциональные характеристики тонкостенных деталей, особенно при повышенных температурах. Полученные в работе теоретические данные о влиянии легирующих элементов на когезивные свойства сплавов использованы в качестве фундаментальной основы для разработки нового поколения конструкционных и функциональных сплавов и развития новых технологий производства тонкостенных элементов летательных аппаратов.

Диссертация написана технически грамотным языком, оформлена в соответствии с действующими нормативами. Автореферат диссертации соответствует ее содержанию и публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК для публикации материалов диссертационных работ, достаточно полно отражают основное содержание диссертации.

**Вопросы и замечания по материалам диссертации:**

1. Вызывает сожаление, что в диссертации не рассмотрены вопросы специального легирования сталей по аналогии со сплавами на основе титана и никеля. Не понятно, почему большой класс материалов, широко используемый в авиакосмической технике, полностью выпал из поля зрения автора диссертационной работы. Например, хотелось бы иметь обобщенные рекомендации автора по принципам локального легирования жаропрочных сталей с целью укрепления границ зерен.

2. В диссертационной работе недостаточно полно отражены проблемы консолидации полученных порошков и получения компактных изделий – а ведь это важнейшая составляющая технологии порошковой металлургии. Основное внимание уделяется газостатической обработке, и это понятно: таким способом можно получать детали почти готовой формы. Однако, каковы принципы выбора параметров газостатической обработки при компактировании порошков разных материалов – различных сплавов на основе никеля, титана, интерметаллидов? Как

устанавливаются оптимальные параметры обработки – температура, давление, время?

3. При формировании тонкостенных изделий большое значение имеет состояние поверхностного слоя, структура и свойства которого отличаются от объема детали и могут оказывать существенное влияние на механические свойства – например, вызывать охрупчивание. При обработке порошка даже в хорошо вакуумированной капсуле будет неизбежно происходить диффузионное и химическое взаимодействие материала капсулы с поверхностью компакта. Кроме этого, состояние поверхности спекаемого порошка может также оказывать существенное влияние на структуру и свойства компакта. К сожалению, эти вопросы недостаточно полно отражены в диссертации.

Указанные замечания не меняют общего положительного впечатления о диссертации. В целом диссертационная работа А.И. Логачёвой выполнена на высоком научном уровне, а ее результаты получили широкое внедрение на предприятиях ракетно-космической отрасли промышленности.

Разработанные в диссертации структурные и технологические принципы порошковой металлургии материалов авиакосмической техники можно рекомендовать к использованию и дальнейшему развитию в научно-исследовательских организациях и предприятиях, занимающихся исследованием, разработкой и применением технологий порошковой металлургии: ИМЕТ РАН им. А.А. Байкова, ОАО «ВИЛС», ФГУП ВИАМ, ФГУП ЦНИИчермет им. И.П. Бардина, НИТУ «МИСиС», ОАО «Институт Цветметобработка» и других.

### **Заключение**

В диссертационной работе А.И. Логачёвой, на основании выполненных автором исследований, решена научная проблема, имеющая важное народнохозяйственное значение. Представлены новые научно обоснованные технологические решения, на базе которых созданы металлические гранулированные жаропрочные сплавы на основе титана и никеля, а также интерметаллидные сплавы конструкционного и функционального назначения. Разработанные материалы и технологии порошковой металлургии для производства конкретных элементов конструкции летательных аппаратов внедрены на предприятиях ракетно-космической отрасли промышленности, обеспечивая тем самым развитие экономики страны и повышение ее обороноспособности.

Диссертационная работа отвечает требованиям пункта 9 ВАК РФ Положения о присуждении ученых степеней (утверждено постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842), а ее автор

Логачёва Алла Игоревна заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.16.06 «Порошковая металлургия и композиционные материалы».

Доклад по диссертационной работе заслушан на заседании научно-технического совета Института технологии поверхности и наноматериалов (ИТПН) (протокол № 5 от 16 марта 2017 г.). В обсуждении работы принимали участие ведущие научные сотрудники АО «НПО «ЦНИИТМАШ». За предложенное заключение участники заседания проголосовали единогласно.

Председатель НТС,  
заместитель генерального директора,  
директор ИТПН  
ГНЦ РФ АО «НПО «ЦНИИТМАШ», к.т.н.

 В.В. Береговский

Ученый секретарь НТС института ИТПН, к.т.н.

 И.Ф. Арутюнова

Подписи В.В. Береговского, И.Ф. Арутюновой заверяю  
Ученый секретарь ГНЦ РФ АО «НПО «ЦНИИТМАШ»

 М.А. Бараненко

