

## ОТЗЫВ

Официального оппонента на диссертационную работу Логачёвой Аллы Игоревны «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».

Для развития авиакосмической техники, в условиях постоянного возрастания рабочих температур и нагрузок, требуются новые материалы с повышенными эксплуатационными характеристиками и новые технологии их производства. Методы металлургии гранул традиционно используют для изготовления критических деталей двигателей и турбонасосных агрегатов - дисков, валов, проставок, дефлекторов и др., изготовленных из жаропрочных никелевых и титановых сплавов. Вместе с тем, в последнее время назрела потребность существенного расширения области применения металлургии гранул и реализации её уникальных возможностей для производства тонкостенных элементов конструкций космических аппаратов, например, бесшовных топливных баков, лейнеров, герметичных трубчатых элементов сложной конфигурации, камер сгорания ЖРД и др.

Разработка перспективной ракетно-космической техники потребовала качественно другого класса конструкционных материалов. Существенно повысились требования к уровню физико-механических свойств материалов и особенно их стабильности при работе в экстремальных условиях космических полетов. Для решения возникающих проблем необходимо было проводить глубокие материаловедческие исследования. Это одна из задач, которая решалась в диссертационной работе А.И. Логачевой.

С учетом требований ракетно-космической техники в работе выбраны никель, титан, интерметаллидные сплавы системы титан-никель и  $Ni_3Al$ , обеспечивающие создание материалов с требуемыми свойствами. Решение



задачи модернизации известных сплавов напрямую связано с обеспечением надежной эксплуатации космических аппаратов.

Модернизация всего технологического цикла производства изделий методом металлургии гранул, разработка новых жаропрочных и функциональных материалов для ракетно-космической техники, ряда технологических процессов изготовления сложных тонкостенных герметичных элементов космических аппаратов из гранул титановых сплавов для систем разгонных блоков, композиционных баллонов и др., сплава на основе соединения  $Ni_3Al$ , работоспособного при температуре до  $1250^{\circ}C$  для камер сгорания ЖРД подтверждают актуальность темы диссертации.

Актуальность темы работы подтверждается также тем, что она выполнена в рамках целого ряда Государственных контрактов с Федеральным Космическим Агентством в 2003-2015 г.г., ОКР, Федеральной Космической Программы РФ на 2006-2015 г.г., ФЦП развития ОПК на 2007-2010 г.г. и до 2015 года.

Научная новизна и значимость диссертационной работы А.И. Логачёвой состоит в том, что разработаны научные основы и создана комплексная технология на основе металлургии гранул, позволяющей получать сплавы нового поколения для ракетно-космической техники, заготовки и детали, узлы, обеспечивающие требования современных материаловедческих разработок по тонкостенности и герметичности при предельно тонкой толщине стенки изделия (1,6-2,0 мм), модернизацию структуры и свойств сплавов за счет химической и структурной однородности гранул.

Тонкостенные элементы конструкций, играющие важную роль в аппаратах космической техники, выделены автором в отдельную группу объектов. Этот прием оказался очень удачным и позволил применить для конструирования герметичных тонкостенных изделий современные теории расчета оболочек.



В тонкостенных деталях возрастает критическая роль границ зерен, наиболее слабых элементов микроструктуры сплавов. Например, нарушение герметичности топливных баков происходит, в первую очередь, за счет протекания по границам зерен. Для минимизации этого недостатка тонкостенных сечений А.И. Логачёва предложила легировать сплавы переходными металлами, которые обогащают границы зерен и укрепляют их. Разработана методология определения систем легирования сплавов на основе никеля и титана с упрочненными границами и технологии получения новых сплавов методами металлургии гранул.

В тонкостенных изделиях возрастают требования к качеству материала, в котором должно быть низкое содержание примесей, и к фракционному составу гранул, крупность которых должна быть менее 100 мкм, из которых путем ГИП формируется заготовка. Для получения высококачественных сферических гранул, удовлетворяющих этим критериям, разработаны технологические принципы улучшения качества гранул. Это позволило разработать новое поколение оборудования для производства гранул и модернизировать весь технологический цикл металлургии гранул применительно к сплавам на основе титана и никеля.

Разработанные А.И. Логачёвой химические составы новых интерметаллидных сплавов на основе алюминидов никеля и технологии металлургии гранул обеспечивают производство из них узлов и деталей для авиакосмической техники.

Для данной работы характерен комплексный подход к производству элементов ракетно-космических аппаратов, в котором тесно увязаны материаловедческие, конструкторские и технологические разработки.

Обоснованность и достоверность результатов исследований не вызывает сомнений и определяется эффективным использованием современных теоретических и экспериментальных методов исследования структуры, химического состава и механических свойств сплавов, применением компьютерных методов для проведения расчетов и обработки



экспериментальных данных, проведением комплексных испытаний имитаторов и реальных узлов и деталей, внедрением разработанных технологий на предприятиях ракетно-космической промышленности.

Усовершенствованы закономерности процесса и технология производства гранул жаропрочных титановых, никелевых, интерметаллидных сплавов методом быстровращающейся (до 35000 об/мин) литой заготовки на новой установке УЦРТ-9, созданной по техническому заданию автора диссертации, при получении сферических гранул крупностью 50-100 мкм.

Созданы новый титановый сплав СТ6У и технология его производства, включая плавку и литье слитков-электродов, изготовление сферических гранул, параметров ГИП.

Всесторонне исследована микроструктура компактного материала, проведены кратковременные и длительные испытания его характеристик в широком температурном диапазоне.

Разработаны технологические процессы изготовления сплава на основе соединения  $Ni_3Al$  (ИНГК-5), работоспособного при температуре 1250°C и выше, конструкционного функционального интерметаллидного сплава системы Ni-Ti для систем разгонных блоков, особотонкостенных деталей космических аппаратов, для камер сгорания ЖРД.

Наиболее значимым практическим результатом диссертационной работы является разработка комплексной технологии изготовления особотонкостенных элементов аппаратов ракетно-космической техники, основанных на применении методов металлургии гранул. К ним относится, в первую очередь, технология изготовления особотонкостенного бесшовного топливного бака из гранулированного титанового сплава ВТ23П и бесшовного лайнера методом металлургии гранул из титанового сплава ВТ6П. Новая технология обеспечила высокие герметичность и прочностные характеристики, а также заметное снижение веса изделия.



Сохранение герметичности капсул при таких сверхтонких стенках (1,6-2,0 мм) следует выделить отдельно как очень важное достижение.

Получение элементов замковых соединений из гранулированного интерметаллидного сплава ТН-1 с эффектом памяти формы для безударного разделения отсеков и спецоборудования ракетно-космической техники является значительным технологическим достижением. Сочетая металлургию гранул с винтовой прокаткой, автору настоящей работы удалось изготовить критические элементы конструкции - замковые втулки с высокими показателями функциональных свойств.

Важной является разработка гранулированного интерметаллидного сплава на основе  $Ni_3Al$  функционального назначения с температурой эксплуатации более  $1250^{\circ}C$  для камер сгорания жидкостных ракетных двигателей. Важной функциональной особенностью гранулированного варианта  $Ni_3Al$  является хорошая свариваемость с нержавеющей сталью, что обеспечило требуемое улучшение конструкторско-технического решения по соединению камеры сгорания с форсуночной головкой микродвигателей для изделий типа "Союз ТМ".

Создание нового поколения специального оборудования (установки «УЦРТ-9») по техническому заданию диссертанта для производства гранул металлических и интерметаллидных сплавов является значительным технологическим достижением.

Новая установка обеспечивает получение гранул крупностью менее 100мкм путем плазменного центробежного распыления быстровращающихся литых заготовок в среде сверхчистых инертных газов с содержанием кислорода в гранулах на уровне исходной заготовки 0,004% для никелевых сплавов. Данная установка используется в ОАО «Композит» как базовое оборудование для отработки новых технологий и производства высококачественных сферических гранул.



Под руководством А.И. Логачёвой проведена модернизация всей технологической линии основного оборудования участка металлургии гранул ОАО «Композит».

Работы по обоснованию технологических параметров горячего газостатического прессования гранул различных металлических и интерметаллидных сплавов также являются важным техническим достижением диссертанта.

Публикации и апробация работы подтверждаются тем, что диссертационная работа изложена на 407 страницах машинописного текста и состоит из введения, восьми глав, выводов, списка литературы и приложения. Результаты, полученные в диссертации, отражены в 52 публикациях, включая 23 работы в журналах из перечня ВАК, и 14 патентах РФ, доложены на многочисленных международных и отраслевых конференциях.

#### **Замечания по диссертационной работе А.И. Логачевой**

1. Диссертанту не следовало отказываться от подробного изложения общей технологии производства и результатов испытаний механических и жаропрочных свойств разработанного автором жаропрочного дискового сплава на основе никеля, который назван НГК-6. По-существу, в работе представлены только основные принципы выбора химического состава данного сплава. Дело в том, что в авиакосмической технике для изготовления критических деталей двигателей в основном применяется сплав ЭП741НП, разработанный в ВИЛС'е несколько десятилетий назад. Сплав ЭП741НП оказался настолько удачным, что широко используется в современном авиадвигателестроении до настоящего времени. Однако в последние годы созданы новые дисковые сплавы для ракетной техники, включая представленный в работе А.И. Логачёвой сплав НГК-6, предназначенные для производства методами металлургии гранул, которые по некоторым параметрам превосходят известный сплав ЭП741НП. Поэтому в диссертационной работе хотелось бы видеть систематический анализ



эксплуатационных характеристик новых опытных сплавов для оценки перспективы возможного замещения ими дисковых жаропрочных сплавов в космической технике.

2. Предложенная автором концепция повышения когезивной прочности границ зерен в порошковых сплавах представляет большой интерес, поскольку проблема упрочнения «слабых» границ зерен всегда была одной из центральных в материаловедении дисковых жаропрочных сплавов. Однако фактически эта проблема исследована в работе не полностью, а именно, в содержательной цепочке «теоретическая модель - физический эксперимент - технология» отсутствует звено физического эксперимента, то есть не проведена экспериментальная верификация развитых представлений (например, отсутствует экспериментальное исследование зернограничной сегрегации, не проведено измерение энергии адгезии границ и др.). Желательно увидеть в будущих работах А.И. Логачёвой результаты проверки предложенной модели с помощью физического эксперимента.

3. Всегда возникают вопросы, когда проблематика наномасштабных материалов обсуждается применительно к жаропрочным никелевым сплавам. Дело в том, что одной из важнейших характеристик таких сплавов является высокая структурная стабильность, которой по определению не обладают наноструктуры в условиях воздействия высоких температур и нагрузок. Именно по этой причине микроструктуры классических жаропрочных никелевых сплавов не являются наномасштабными: например, типичный размер выделений упрочняющей  $\gamma'$ -фазы в  $\gamma$ -матрице составляет  $\sim 0,5$  мкм, а размер зерен в дисковых сплавах (это мелкозернистые объекты) равен 10-100 мкм. Поэтому название Главы 7 диссертационной работы вызывает сомнения (см. с. 278 «Комплексная технология... механосинтеза...  $Ni_3Al$  для получения порошков с нанокристаллическими элементами субструктуры»). Механическое сплавление действительно применяется для получения порошков жаропрочных сплавов, но зачем при этом делать акцент на получении наноструктур.



4. В автореферате и в диссертации не раскрыты положения научной новизны основных достижений работы. Это не сделано и в выводах. Например, вывод 1 диссертации (см. с. 52 автореферата: «разработана концепция нового подхода к изготовлению тонкостенных элементов методом порошковой металлургии...с изотропными химическими и механическими свойствами на основе теории оболочек»).

Во-первых, элементов чего? Во-вторых, как на основе теории оболочек можно получить изотропные химические и механические свойства?

Фактически в выводах изложены итоги крупной технологической работы, но не выводы.

5. В ряде мест диссертации противопоставляется порошковая металлургия и металлургия гранул, а по-существу – это одно и то же. И их технологии аналогичны.

6. Зачем в диссертации приводится подробный расчет параметров работы установки УЦРТ-9 и формирования сферической гранулы в процессе полета частички металла в нейтральном газе рабочей камеры? Последнее показано в работах д.т.н. Мусленко В.Т. и к.т.н. Орлова В.К. еще в 80-х прошлого века. И вообще, это задача конструкторов машины из ОАО «Электромеханика» из города Ржева Тверской губернии.

7. В выводах п.3 указаны очень низкие показатели выходов годного – 75% для никелевых сплавов и 65% – для титановых сплавов, для гранул крупностью менее 100 мкм. Эти цифры подрывают «авторитет» установки УЦРТ-9. Фактически для никелевых сплавов выход годного составляет 83-85 %, а для титановых сплавов ниже, около – 70 %.

8. Удручает бесчисленное количество грамматических ошибок и неудачных выражений в автореферате и в тексте диссертации.

В диссертационной работе А.И. Логачевой представлены научно обоснованные технические и технологические решения, которые внедрены на предприятиях ракетно-космической отрасли, обеспечивая тем самым развитие экономики страны и повышение ее обороноспособности.



Рассмотренная диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой изложены научно-обоснованные структурные и технологические принципы изготовления методами металлургии гранул особотонкостенных элементов конструкций аппаратов ракетно-космической техники, на основании которых предложены новые технические решения, получившие широкое внедрение в оборонной промышленности.

Диссертация соответствует критериям п. 9 Положения ВАК РФ и специальности 0.5.16.06 «Порошковая металлургия и композиционные материалы», а ее автор, Логачева Алла Игоревна, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук.

Заместитель Генерального директора,  
ученый секретарь института,  
доктор технических наук, профессор



Г.С. Гарибов

Адрес, ОАО «ВИЛС»  
г. Москва, 121596, ул. Горбунова, 2  
Контактный телефон: 8-495-773-39-17  
ОАО «ВИЛС» – Открытое акционерное общество  
«Всероссийский институт легких сплавов»