

## ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу Агуреева Леонида Евгеньевича

на тему:

**«Разработка способа получения алюмокомпозитов высокой прочности  
модифицированием микродобавками порошков наноксидов»,**

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.06 – Порошковая металлургия и композиционные материалы в диссертационный совет Д 212.132.05 при Национальном исследовательском технологическом университете «Московский институт стали и сплавов»

Совершенствование техники невозможно без постоянного развития способов создания новых материалов и технологий их получения. Одним из таких прогрессивных способов является получение дисперсно-упрочненных материалов методами порошковой металлургии. Ярким примером подобных материалов и технологий явилось создание в прошлом веке композиционных материалов (КМ) на основе алюминия типа САП и на основе никеля типа ТД-никель. Характерной особенностью многих КМ является применение в качестве упрочняющих добавок оксидных частиц в значительных количествах (единицы и десятки объемных процентов), что приводит к существенному повышению прочности, но сопровождается падением пластичности. Поэтому поставленная и, сразу отмечу, решенная в данной работе задача изучения влияния введения микродобавок оксидных частиц нанодисперсного размера на формирование структуры и свойства КМ на основе алюминия и разработки способа получения изделий из них является, несомненно, актуальной.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов и списка цитируемой литературы, содержащего 109 наименований. Объем диссертации – 153 страницы машинописного текста, 91 рисунок, 26 таблиц, 4 приложения.

Во введении рассмотрены некоторые направления по применению КМ на алюминиевой основе для изготовления ряда деталей, работающих в конструкциях космических аппаратов, авиационной и других областях техники. Цель данной работы сформулирована автором как «разработка способа упрочнения алюмокомпозитов вводом микродобавок (0,01- 0,15) % об. оксидных наночастиц ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{SiO}_2$ )». Для ее достижения определен ряд задач исследования, из которых основными выделено изучение влияния природы и количества микродобавок оксидов на процессы уплотнения при холодном прессовании и спекании, структуру и свойства КМ на основе алюминия и сплава алюминий –

Рассмотрены возможности компьютерного моделирования с привлечением градиентной модели межфазного слоя для прогнозирования уровня свойств алюмокомпозитов.

В научно-техническом обзоре (глава 1) достаточно подробно рассмотрены сведения о конструировании КМ, в том числе на основе алюминия. Показано, что основные сведения по КМ на основе алюминия относятся к алюмокомпозитам со значительной долей упрочняющей фазы, сведений о влиянии микродобавок упрочняющей фазы нанометрических размеров на формирование структуры и свойства КМ чрезвычайно мало. Обсужден выбор материала упрочняющих фаз и методы их получения в виде дисперсных (десятки нанометров) частиц. Особое внимание уделено рассмотрению влияния т.н. межфазного слоя на упрочнение матрицы КМ (в рамках градиентной модели) и возможности прогнозирования уровня свойств с использованием моделирования в рамках этого аналитического подхода.

Во второй главе приведены сведения, касающиеся составов материалов, примененных в работе технологических схем получения КМ, а также методик их исследования. В качестве матрицы КМ использовали алюминий (дисперсностью  $\sim 20\text{мкм}$ ) и смесь алюминий - 1,5% об. меди (дисперсностью  $\sim 1\text{мкм}$ ) в виде соответствующих порошков.

В качестве упрочняющей фазы были выбраны частицы оксидов  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{MgO}$  и  $\text{SiO}_2$ , изготовленные плазмохимическим методом, причем частицы  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$  получены с участием автора при проведении данной работы. Далее по схемам, обычным в порошковой металлургии, проводили получение шихты, холодное прессование и спекание заготовок из указанных КМ. Следует отметить, что автором применены дополнительные, отличные от обычно используемых, меры, способствующие уменьшению агрегации порошков с образованием крупных кластеров из чрезвычайно дисперсных и склонных к слипанию частиц оксидов.

Для исследования морфологии и структуры исходных материалов, технологических свойств и структуры прессовок и спеченных КМ, уровня механических и эксплуатационных свойств в работе применен широкий круг взаимодополняющих методик исследования.

В главе 3 рассмотрены особенности процесса плазмохимического синтеза упрочняющих оксидных наночастиц, а также влияние технологических параметров деформационного уплотнения (величины давления при холодном прессовании) и спекания (температуры и длительности) на усадку КМ на основе алюминия и смеси алюминия и меди. Выявлены закономерности влияния природы и количества вводимых наночастиц на усадку КМ и их структуру.



Подробные исследования формирования микроструктуры КМ на основе алюминия и сплава алюминий-медь при введении различных по природе и количеству наночастиц позволили установить основные технологические параметры процесса консолидации при спекании, необходимые для получения КМ с однородной структурой.

Четвертая глава посвящена изложению результатов исследования эксплуатационных свойств КМ на основе алюминия и его сплава с медью, упрочненных наноразмерными частицами. Установлены зависимости ряда механических свойств (модуля упругости, пределов прочности на сжатие, изгиб и растяжения, микротвердости) и жаростойкости от количества введенных наноразмерных частиц. Установлено, что в области микроконцентраций (от 0,01% до 0,15% об.) упрочняющих частиц зависимости указанных механических характеристик имеют экстремальный характер.

На основе микромеханической модели, построенной с применением градиентной теории упругости, выполнено аналитическое прогнозирование механических свойств алюмокомпозитов в зависимости от содержания наночастиц.

В главе 5 приведены результаты практического опробования предложенных составов и режимов получения изделий из КМ на основе алюминия. Опробование показало высокий уровень свойств изделий, что подтверждает правильность выбора режимов получения КМ. Новаторство предложенных технических решений подтверждается заявкой на патент. Результаты проведенных исследований внедрены в ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша» в технологический процесс изготовления типовых втулок болтовых креплений, что повысило надежность и ресурс работы изделий. Также в этой главе сообщается о перспективности применения результатов данного исследования для изготовления целого ряда деталей для использования в ракетно-космической технике.

Эти сведения свидетельствуют о высокой практической ценности диссертационной работы. Основная научная новизна представленного исследования заключается в установлении экстремального характера изменения механических, в первую очередь прочностных, свойств алюмокомпозитов от концентрации микродобавок оксидных наночастиц, что согласуется с теорией упрочнения КМ при малых концентрациях упрочняющих частиц и объясняется формированием напряженного поля вокруг частиц. Другим научным достижением является предложенная компьютерная оптимизационная модель оценки прочностных свойств КМ, реализованная в соответствии с положениями градиентной теории упругости.

Замечания и предложения по работе:

1. Нельзя согласиться со следующими утверждениями:

(стр. 76, 93): обволакивание частиц алюминия наночастицами происходит «благодаря их большой поверхности» – обволакивание происходит из-за высокой поверхностной энергии наночастиц;

(стр. 76, 93): «наноразмерные частицы по причине своей большой поверхностной энергии вызывают сильные искажения кристаллической решетки алюминия» – каковы факты, подтверждающие такое утверждение? Результаты РФА, приведены в данной работе (стр. 72), опровергают это утверждение.

(стр. 77, 94): влияние этанола, в котором проводили смешивание компонентов шихты, сказывается на усадку при спекании прессовок – спекание проводится при температуре 650°C, т.е. значительно выше температуры испарения этанола.

2. (стр. 80): Нельзя согласиться с предположением о том, что более высокие значения усадки в КМ на основе Al-Cu по сравнению с КМ на основе Al «свидетельствуют об активации при спекании при зернограницном проникновении легкоплавкой добавки Cu и об образовании  $\Theta$ -фазы». При температуре спекания (650°C) КМ на основе Al-Cu происходит взаимная диффузия матричных элементов с образованием в предельном случае  $\alpha$ -твердого раствора на основе алюминия. Наличие  $\Theta$ -фазы в структуре спеченных КМ объясняется распадом  $\alpha$ -твердого раствора при охлаждении после спекания.

3. Также нельзя согласиться с объяснением повышенной жаростойкости КМ на основе Al-Cu как «возникновением зон ГП, а также формированием фазы  $\text{CuAl}_2$  по границам зерен матрицы». При температуре испытаний (600°C) указанные структурные составляющие отсутствуют.

4. Имеются неточности в значениях объемной усадки, приведенных в табл. 3.4 и на рис. 3.10, 3.13 для одних и тех же образцов;

на графиках, иллюстрирующих изменение плотности при спекании (рис. 3.10, 3.13) и прочностных свойств КМ от содержания наночастиц (рис. 4.4 – 4.6), не указаны величины разброса измерений.

5. (стр. 104): Вклад в упрочнение КМ, обусловленный различием в коэффициентах термического расширения матрицы и оксидных частиц, указан как связанный с различием в коэффициентах теплопроводности, вероятно, ошибочно.

6. (стр. 57-65): Наличие неинформативных сведений при описании методик исследований (фотографий приборов, стандартных расчетных формул, например, при определении плотности методом гидростатического взвешивания



6. (стр. 57-65): Наличие неинформативных сведений при описании методик исследований (фотографий приборов, стандартных расчетных формул, например, при определении плотности методом гидростатического взвешивания и твердости при внедрении индентора). Вероятно, достаточно было ограничиться перечислением методов с указанием соответствующих стандартов.

Сделанные замечания не снижают научный уровень и высокую практическую значимость диссертации, не изменяют ее общей положительной оценки. Для диссертанта характерно подробное и доказательное изложение материалов работы. Тщательный анализ результатов, применение разнообразных взаимодополняющих методик, сопоставление с теоретическими и экспериментальными данными в литературных источниках подтверждают добротность выполненного исследования.

Материал диссертации хорошо систематизирован и оформлен. Автореферат диссертации и публикации автора полностью соответствуют ее содержанию. Основные результаты диссертационной работы являются новыми, достоверными и актуальными, опубликованными в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК.

Диссертация является законченной научно-исследовательской работой, соответствует п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013г. № 842.

Диссертационная работа удовлетворяет, безусловно, требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатской диссертации по специальности 05.16.06 – Порошковая металлургия и композиционные материалы, а ее автор, Агуреев Леонид Евгеньевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по данной специальности.

Официальный оппонент:


начальник лаборатории металлофизических  
исследований ОАО «ВИЛС», к.т.н., с.н.с.

 Е.Я.Капуткин

Отзыв начальника лаборатории металлофизических исследований  
ОАО «ВИЛС» заверяю.

Заместитель генерального директора  
по науке и производству ОАО «ВИЛС», д.э.н., проф.



 Г.Д.Ковалев  
02 ноября 2015 г.