

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Иванова Дмитрия Алексеевича «Физико-химические закономерности процессов получения композиционных материалов на основе высокодисперсного алюминиевого порошка ПАП-2», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.16.06 – «Порошковая металлургия и композиционные материалы»

### Актуальность темы

Разработка композиционных материалов, а также методов получения из них различных деталей с регламентированными свойствами является одним из основных направлений развития материаловедения и современного машиностроения. При этом большое внимание уделяется разработке композиционных материалов на основе металлической матрицы из алюминия и его сплавов.

Типичным представителем таких материалов является САП (спеченный алюминиевый порошок), зарубежным аналогом которого является SAP, содержащие  $Al_2O_3$  в пределах 4–23 %. Примечательно, что материал САП, в отличие от алюминиевых сплавов, сохраняет высокую прочность до 500 °С, что объясняется стабильностью частиц  $Al_2O_3$  в алюминиевой матрице.

При разработке КМ активно используют различные приемы введения в алюминиевую матрицу упрочняющих дисперсных частиц наноразмерного диапазона. Однако реализация таких технологических подходов часто затруднена из-за эффекта агломерирования наночастиц. В связи с этим особый интерес представляет такой вид порошковой продукции из алюминия, как пудра. При этом наибольшей дисперсностью обладает пудра марки ПАП-2.

Однако ранее пудра не использовалась в традиционных процессах порошковой металлургии из-за крайне низких технологических свойств, главным из которых было отсутствие формуемости.

Поэтому исследование процессов получения композиционных материалов на основе алюминиевой пудры марки ПАП-2 представляется актуальной задачей как с научной, так и с практической стороны.

Актуальность выполненных исследований подтверждена также тем, что они проведены в рамках базовой части государственного задания вузам №11.7568.2017/Б4.

## **Цель работы**

Цель работы состоит в установлении физико-химических закономерностей процессов получения, формирования структуры и свойств новых нанослоистых алюмоматричных КМ и пористой алюмооксидной керамики из высокодисперсного порошка ПАП-2 и разработке на этой основе эффективные технологии их производства.

В этой связи в диссертационной работе Иванова Дмитрия Алексеевича сформулирован взаимосвязанный комплекс четких основных задач, решение которых позволяло достичь цель исследования.

## **Научная новизна положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Считаю, что автор четко выделил основные научные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. Впервые показана принципиальная возможность получения новых нанослоистых алюмоматричных дисперсно-упрочненных и волоконно-армированных КМ из промышленного высокодисперсного алюминиевого порошка ПАП-2 с чешуйчатой формой частиц субмикронной толщины, перспективных для применения их в качестве конструкционных, жаропрочных и функциональных материалов. Разработаны керметы Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с варьированием алюмооксидной фазы от 5 до 40 об %, высокопористая (от 30 до 90 %) алюмооксидная керамика, алюмоматричные КМ на основе Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, в том числе, упрочнённые волокнами аустенитной стали 08X17H13M2;

2. Установлено, что отсутствие прессуемости порошка ПАП-2 в состоянии поставки обусловлено существенным наклепом его частиц и наличием покрытия из стеарина на их поверхности. Термообработка порошка на воздухе или в вакууме значительно улучшает его прессуемость, что делает возможным применение традиционных методов порошковой металлургии для получения из него заготовок и деталей;

3. Показано, что замещение стеаринового покрытия на частицах порошка пленкой из оксида алюминия толщиной до 10 нм обеспечивается при нагреве ПАП-2 на воздухе до 350 °С с последующей изотермической выдержкой. Образующиеся при этом газообразные продукты сгорания стеарина, представляющие собой смесь газов CO, CO<sub>2</sub> и паров H<sub>2</sub>O, играют в процессе отжига роль защитной среды;

4. Установлено, что после нагрева ПАП-2 на воздухе и последующего его отжига в вакууме (термообработка в режиме «воздух-вакуум»), происходит образование слоистых гранул размером 10–50 мкм из алюминиевых частиц, на поверхности которых формируются округлые алюмооксидные включения ( $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) наноразмерного диапазона. Предложен механизм образования этих включений, основанный на различии коэффициентов термического расширения поверхностной алюмооксидной пленки и алюминиевой основы;

5. Показано, что использование порошка ПАП-2 после термообработки в режиме «воздух-вакуум», прессования и спекания в вакууме (600 °С, 1 час), обеспечивает получение нанослоистого дисперсно-упрочненного КМ, в объеме слоев которого содержатся равномерно распределенные наночастицы  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ;

6. Установлено, что реакционное спекание в режиме фильтрационного горения порошковых заготовок на воздухе, обеспечивает получение нанослоистого композиционного материала (кермета  $\text{Al-Al}_2\text{O}_3$ ) с возможностью варьирования содержания оксида алюминия до 40 об %. Показано, что при реакционном спекании добавка порошка тонкомолотого натрий-силикатного стекла выступает в качестве активатора спекания порошковых заготовок из ПАП-2.

Предложен механизм формирования мелкокристаллического  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  покрытия на изделиях, основанный на реализации последовательности газотранспортных реакций взаимодействия паров  $\text{Al}$  и атомарного кислорода с образованием летучих субоксидов –  $\text{AlO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}$  и, в конечном итоге, сконденсированной фазы –  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ .

7. Установлено, что нагрев и выдержка в вакууме (630 °С, 1 час) порошковых заготовок из ПАП-2, содержащих стеарин, обеспечивает его термическое разложение с формированием углеродного остатка в поверхностных слоях чешуйчатых алюминиевых частиц с последующим синтезом карбида алюминия и образованием расплава эвтектического состава  $\text{Al-Al}_4\text{C}_3$ . При охлаждении в слоистой структуре заготовок формируются наноразмерные кристаллы  $\text{Al}_4\text{C}_3$ .

## Практическая значимость полученных автором результатов

1. Разработаны технологии получения новых нанослоистых алюмоматричных дисперсно-упрочненных и волокнонно-армированных КМ, а также высокопористой керамики на основе  $Al_2O_3$  при использовании в качестве исходного сырья порошка марки ПАП-2:

- кермета  $Al-Al_2O_3$  путем реакционного спекания в режиме фильтрационного горения и обычного твердофазного спекания на воздухе порошковых заготовок из ПАП-2 при варьировании алюмооксидной фазы от 5 до 40 об %. Материал предназначен для использования в качестве износостойких и уплотнительных элементов, а также абразивного инструмента;

- композиционного материала  $Al-Al_2O_3$  с мелкокристаллическим алюмооксидным ( $\alpha-Al_2O_3$ ) покрытием на его поверхности, основанный на фильтрационном горении на воздухе порошковой заготовки из ПАП-2. Материал использован в качестве притира на финишной стадии обработки сферических титановых изделий взамен чугунных притиров;

- алюмоматричных нанослоистых дисперсно-упрочненных (частицами  $\gamma$  ( $\delta$ ) –  $Al_2O_3$  и  $Al_4C_3$ ) КМ спеканием порошковых заготовок из ПАП-2 в вакууме для использования их в качестве легких ( $2,6 \text{ г/см}^3$ ) и жаропрочных (до  $500 \text{ }^\circ\text{C}$ ) элементов конструкций, а также триботехнических изделий;

- легкого ударопрочного алюмоматричного нанослоистого КМ  $Al-Al_2O_3$  (матрица) – сталь (волокно), в объеме которого содержатся в качестве армирующего компонента волокна аустенитной стали 08X17H13M2. Данный материал прошел испытание в качестве элемента в экспериментальном бронемодуле и показал перспективность данной разработки;

- высокопористой (пористость = 30 – 90%,) керамики на основе  $Al_2O_3$  путем спекания на воздухе порошковых заготовок, содержащих ПАП-2, для применения в качестве термостойких элементов конструкций, высокотемпературной теплоизоляции (эффективный коэффициент теплопроводности в температурном интервале  $20-1000 \text{ }^\circ\text{C}$  –  $0,06-0,17 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ ), фильтров для газовых или жидких сред.

2. Разработана методика и устройство для определения термостойкости керамики конструкционного назначения, что позволило существенно повысить точность оценки данной характеристики.

На способы получения новых материалов получено 13 патентов РФ.

## **Достоверность полученных результатов определяется:**

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждена результатами большого объема выполненных экспериментов и исследований, проведенных с использованием современных аналитических методов и аттестованного оборудования.

Интерпретация полученных экспериментальных зависимостей и трактовка предложенных теоретических положений не противоречат классическим научным представлениям, принятым в материаловедении и технологии композиционных материалов.

По тексту диссертационной работы и автореферата имеются следующие **замечания:**

1. На основе полученных закономерностей в работе желательно было бы обозначить перспективы развития используемых технологических подходов для получения нанослоистых композиционных материалов применительно к другим матричным материалам;

2. Из материалов работы остается не ясным являются ли достигнутые свойства разработанных автором нанослоистых композитов предельными или существует резерв для их дальнейшего повышения?

3. В работе следовало бы более четко обозначить возможные области применения разработанных материалов;

4. Работа в целом значительно выиграла бы если были бы затронуты вопросы технологии обработки полученных композиционных материалов при получении деталей и узлов, например, деформирования, пайки и сварки;

5. Необходимо заметить, что использование в процессах дегазации стеарина и спекания прессовок вакуумного оборудования может сделать материал достаточно дорогим. Поэтому не ясно по какой причине в работе не рассмотрен более экономичный вариант технологии с дегазацией и спеканием материала в атмосфере водорода?

Отмеченные замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы, а ее автора – как специалиста высокой квалификации. Замечания носят рекомендательный характер для планирования и организации последующих научно-исследовательских работ в рамках данной тематики.

Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 05.16.06 – «Порошковая металлургия и композиционные материалы» в следующих разделах:

п1. Изучение закономерностей физико-механических, физико-химических процессов получения дисперсных систем в виде частиц и волокон (в том числе и наноразмерных) из материалов на основе металлов, сплавов, интерметаллидов, керамики, углеродных, органических и других соединений. Создание технологии получения этих материалов и оборудования. Термодинамика и кинетика фазовых превращений в частицах, волокнах и наноразмерных порошковых материалах.

п.2. Исследование и моделирование физико-химических процессов синтеза полуфабрикатов и изделий из порошковых и композиционных материалов с металлической, углеродной, керамической и полимерной матрицей и армирующими компонентами разной природы, разработка оборудования и технологических процессов их получения.

п.5. Изучение структуры и свойств порошковых, композиционных полуфабрикатов и изделий, покрытий и модифицированных слоев на полуфабрикатах и изделиях, полученных методом порошковой металлургии или другими способами.

п.6. Разработка новых и совершенствование существующих технологических процессов производства, контроля и сертификации полуфабрикатов и изделий различного назначения из порошковых и композиционных материалов, а также материалов и изделий с покрытиями и модифицированными слоями.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

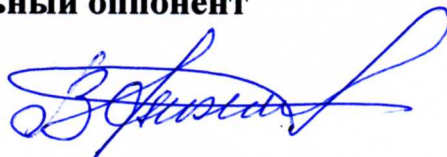
Результаты диссертационной работы, выносимые на защиту, прошли апробацию на научно-технических конференциях, опубликованы в статьях в ведущих рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК.

### **Заключение:**

В целом диссертационная работа Иванова Д.А. представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой на основании выполненных автором исследований получены новые, научно обоснованные технические и технологические решения проблемы получения новых нанослоистых алюмоматричных КМ и пористой алюмооксидной керамики из высокодисперсного порошка ПАП-2.

По научному уровню, полученным результатам, содержанию и оформлению диссертационная работа на тему « Физико-химические закономерности процессов получения композиционных материалов на основе высокодисперсного алюминиевого порошка ПАП-2», соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук, п.п. 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842. Автор диссертации Иванов Дмитрий Алексеевич заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.16.08 – «Порошковая металлургия и композиционные материалы».

**Официальный оппонент**



Овчинников Виктор Васильевич

доктор технических наук, профессор, академик Международной академии информатизации, начальник лаборатории сварочных процессов АО «Российская самолетостроительная корпорация «МиГ», профессор кафедры "Материаловедение" ФГБОУ ВО "Московский политехнический университет"

Подпись Овчинникова В.В. удостоверяю.

Начальник отдела кадрового администрирования



Новикова Ирина Николаевна

Акционерное общество «Российская самолетостроительная корпорация «МиГ»; Почтовый адрес: 125284, Москва, 1-й Боткинский проезд, д.7; Телефон:+7 (495) 721-81-00; Адрес электронной почты: [mig@migavia.ru](mailto:mig@migavia.ru)