

## **ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

на диссертацию Шукина Александра Сергеевича

«Исследование взаимодействия продуктов горения системы Ni-Al с тугоплавкими металлами W, Mo и Ta»,

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности: 01.04.17 – химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества.

### **Актуальность выполненной работы и избранной темы**

Метод самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) один из наиболее перспективных не традиционных методов получения материалов нового поколения для высокотехнологичных отраслей машиностроения. Актуальной является задача повышения прочностных свойств интерметаллидных материалов на основе Ni-Al созданием эвтектических сплавов, содержащих наноразмерные структуры из W и Mo. Тугоплавкие металлы, такие как W, Mo и Ta обладают низкой устойчивостью к окислению, поэтому актуально создание покрытий из NiAl на их поверхности.

Автором поставлена цель: получить методом СВС композитные (гетерогенные) и слоистые материалы на основе систем Ni-Al-Me (Me - W, Mo, Ta) и исследовать особенности их фазо- и структурообразования, а также их свойства.

**Актуальность исследований** подтверждается её выполнением по проектам РФФИ, Программе научных исследований Президиума РАН № 26 «Горение и взрыв», Госзаданиям ИСМАН № 007-01828-17-00, № 007-00339-18-00.

### **Структура диссертации**

Диссертация Шукина А.С. состоит из введения, пяти глав, выводов и списка используемых источников. Объём диссертации составляет 170 страниц. Во введении диссертационной работы обоснована актуальность темы исследований, сформулированы цели и задачи работы, представлены научная новизна результатов и их практическая значимость, сформулированы защищаемые положения.

В главе 1 представлен литературный обзор, в котором рассмотрены свойства сплавов на основе интерметаллида NiAl, способы их получения и применение, рассмотрены основы метода СВС и использование его для синтеза интерметаллидных соединений, проанализированы диаграммы состояния и фазовые превращения в тройных системах Ni-Al-W, Ni-Al-Mo и Ni-Al-Ta.

В главе 2 приведён перечень используемых материалов, описаны использованные экспериментальные и исследовательские методики. Глава 3 посвящена исследованию взаимодействия интерметаллидов на основе Ni-Al с W в процессе СВС. Показана

возможность получения наноразмерных вольфрамовых нитей из продуктов горения при помощи химического травления. Синтезирован композиционный материал высокой плотности на основе системы Ni-Al-W методом электротеплового взрыва (ЭТВ).

В главе 4 представлены результаты исследований взаимодействия интерметаллидов на основе Ni-Al с Mo в процессе СВС. Описаны результаты исследований слоевых систем NiAl-Mo. Показаны особенности структуры в переходных областях, формирующихся при взаимодействии Mo подложки с интерметаллидным покрытием.

Результаты исследований взаимодействия интерметаллидов на основе Ni-Al с Ta в процессе СВС представлены в главе 5. Показан способ нанесения покрытия из Ni-Al на танталовую подложку методом механической активации. Показаны результаты исследований по взаимодействию в слоевых системах NiAl-Ta, продемонстрированы отличительные особенности в структуре переходных зон между интерметаллидом NiAl и Ta подложкой. В заключении приведены основные выводы по диссертационной работе. Список литературы содержит 192 источника.

#### **Наиболее важные результаты диссертации, отличающиеся научной новизной.**

Полученные данные по взаимодействию интерметаллидов на основе Ni-Al с W, Mo и Ta в процессе СВС, а так же с применением метода механической активации и термообработки, на слоевых и перемешанных (порошковых) системах обладают несомненной научной новизной. Получены новые экспериментальные данные при исследовании процесса СВС образцов составов  $(\text{Ni}+\text{Al}) + 5 \text{ ат. \% W} + 1\div 5 \text{ ат. \% NiO}$ , что показало наличие двух последовательных волн горения.

Обнаружены сходные структурные компоненты в структурах переходных зон, формирующихся при взаимодействии тугоплавких металлов (W и Mo) с продуктами безгазового горения в системе Ni-Al – зёрна и дендриты W и Mo, псевдобинарные эвтектики NiAl-W и NiAl-Mo, наноразмерные преципитаты W и Mo в зёрнах и дендритах NiAl. Из продуктов взаимодействия систем Ni-Al-W и Ni-Al-Mo химически выделены тонкие нити тугоплавких металлов W и Mo толщиной  $25\div 100 \text{ нм}$  и длиной до  $300 \text{ мкм}$ .

Обнаружено, что при взаимодействии Ta подложки с продуктами горения системы Ni-Al формируется переходный слой содержащий тройные интерметаллиды TaNiAl (фаза Лавеса),  $\text{TaNi}_2\text{Al}$  (фаза Геслера), эвтектику NiAl-TaNiAl.

#### **Научная и практическая значимость**

Полученные результаты расширяют представления о природе процессов, происходящих при взаимодействии интерметаллида NiAl с тугоплавкими металлами W, Mo и Ta. Показана возможность создания прочного соединения тугоплавких металлов W, Mo и Ta с интерметаллидом NiAl с помощью метода СВС при температурах ниже



температуры плавления металлических подложек.

Продемонстрирована возможность получения методом СВС наноразмерных нитей-волокон разветвлённой формы из тугоплавких металлов (W, Mo), которые могут быть использованы при создании компонентов современных высокотехнологичных устройств.

В АО «НПО Прибор» и ФГБУН ИСМАН синтезирован и испытан высокоплотный сплав с высокими механическими свойствами, который может быть использован для изготовления различных деталей специального назначения.

**Публикации:** опубликовано 25 печатных работ, в том числе 8 статей в рецензируемых научных журналах рекомендованных ВАК и входящих в базы данных Web of Science и Scopus, 16 тезисов и докладов в сборниках трудов конференций, а также подана заявка на патент

#### **Достоверность и обоснованность положений и выводов.**

Представленная диссертационная работа выполнена на высоком научно-техническом уровне, обоснованность и достоверность полученных результатов и выводов подтверждается большим объёмом полученных экспериментальных данных, применением современного аналитического оборудования для микроструктурного анализа, а так же сопоставлением результатов с существующими литературными данными.

#### **Замечания по диссертационной работе.**

Несмотря на высокий уровень проведенных исследований по диссертационной работе имеются следующие замечания:

1. Работа Щукина А.С. посвящена получению композитных и слоистых материалов методом СВС. Порошок NiAl, полученный этим методом, может быть нанесён на подложки из W, Mo, Ta другими методами, например ионно-плазменным. Однако автор в литературном обзоре не проанализировал и не сравнил другие методы нанесения покрытий с СВС.

2. Автором впервые показана возможность синтеза тяжёлого сплава состава 90 масс.% W + 10 масс.% Ni + Al методом ЭТВ под нагрузкой. Определены его физико-механические свойства. В работе не указано сколько образцов изготовлено и испытано, какая повторяемость?

3. На стр.59 показано время 1-2 сек в течение которого существует расплав Ni-Al в процессе СВС. Формирование интерметаллидов возможно только в этот период. На стр. 61 указано, что время взаимодействия в соответствии с полученными экспериментальными данными составляет 5-10 сек. Почему такое несоответствие или экспериментальные данные другие?

4. На стр. 119 написано: "Длина пучка составляет около 50 мкм, а толщина отдельной Mo-нити составляет примерно 100÷300 нм." На стр.120 в выводах "Выделены

структурные составляющие на основе Мо в виде разветвлённых пучков нитей толщиной отдельной нити около 100 нм и длиной до 300 мкм ..." Вопрос: Какого размера Мо-нити выявил автор?

5. Автором исследованы особенности строения переходных зон, формирующиеся при горении системы Ni-Al с подложками из W, Mo, Ta. Однако почему на поверхностях металлов одной переходной группы образуются различные структурные составляющие: глобулы и дендриты на W подложке, пучки наноразмерных волокон на Mo, пористое покрытие на Ta в работе не раскрыты?

6. Автор в исследованиях широко использует метод микротвёрдости. Этот метод структурочувствительный и результат измерения зависит в какую структурную составляющую сделан укол. Структура переходных зон неоднородная. Из текста диссертации и автореферата неясно каков разброс значений микротвёрдости в одних и тех же зонах, это результат нескольких измерений или одного?

### Заключение

Указанные замечания не снижают ценность и значимость диссертационной работы Щукина А.С. Она является законченным исследованием, выполнена на высоком научном уровне, выводы по работе обоснованы и аргументированы, автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа Щукина А.С. является научно-квалификационной работой и содержит новые научные знания. По объёму полученных результатов и научной значимости диссертация соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК Российской Федерации (Постановление Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г.), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор Щукин Александр Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.17 – химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества.

*Лев*  
08.11.2018.

Первухин Леонид Борисович  
доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией ФМК-6,  
ФГУП "Центральный научно - исследовательский институт им. И.П. Бардина",  
105005, Москва, ул. Радио 23/9, стр. 2. Тел. +7-916-564-8784, E-mail: bitrub@mail.ru

Подпись Первухина Леонида Борисовича заверяю  
Учёный секретарь

