

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Института
структурной макрокинетики и проблем
материаловедения им. А.Г. Мержанова
Российской академии наук

д.т.н., профессор, чл.-корр. РАН

М.И. Алымов

«21» ноября 2024 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Маркова Георгия Михайловича
на тему «Получение новых порошковых жаропрочных сплавов на основе алюминидов
титана и их применение в технологии селективного лазерного сплавления»,
представленную на соискание ученой степени
кандидата технических наук по специальности
2.6.5 – Порошковая металлургия и композиционные материалы

Диссертационная работа Маркова Г.М. посвящена разработке технологии получения новых жаропрочных сплавов на основе алюминидов титана и получение из них сферических порошков с последующей апробацией в технологии селективного лазерного сплавления.

Актуальность темы работы

Жаропрочные сплавы на основе алюминидов титана представляют собой новое поколение материалов, которые по ряду характеристик превосходят традиционные никелевые и титановые сплавы. Они отличаются повышенной термической стабильностью структуры и фазового состояния, обладают высокой жаропрочностью и жаростойкостью. Эти преимущества делают их особенно привлекательными для авиакосмической отрасли, где постоянно растут требования к эффективности газотурбинных двигателей (ГТД).

Ведущие мировые державы сконцентрировали исследования на разработке γ -сплавов на основе алюминидов титана и совершенствовании технологий их производства. Однако традиционные металлургические методы производства деталей из данных сплавов характеризуются высокими капитальными затратами и значительными потерями материала.

Актуальность диссертации заключается в получении высоколегированных порошков на основе алюминидов титана по комбинированной технологии, включающей высокоэнергетическую механическую обработку (ВЭМО), самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС). Также актуальность работы заключается в применении полученных сплавов на основе алюминидов титана, прошедших этап плазменной сфероидизации для селективного лазерного сплавления (СЛС).

Основные научные положения диссертации Маркова Г.М. теоретически обоснованы, аргументированы и подтверждены экспериментально. Приведенные результаты достоверны и могут быть полезны для решения ряда прикладных задач. Комплексный характер работы проявляется не только в разработке инновационных

аддитивных технологиях и создании композиционных материалов, но и в использовании широкого спектра современного технологического и аналитического оборудования, позволившего провести всесторонний анализ микроструктуры, физико-технологических характеристик и механических свойств полученных материалов.

Актуальность работы подтверждается выполнением следующих проектов: государственное задание Минобрнауки РФ № 0718-2020-0034 и РФФИ № 22-33-70212\19.

Структура и основное содержание работы

Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав, выводов, списка литературы - 154 наименования и 6 приложений. Работа изложена на 162 страницах, содержит 24 таблицы и 79 рисунков.

Во введении дана общая характеристика работы, в том числе ее актуальность, основные цели и задачи, научная и практическая значимость полученных результатов, а также положения, выносимые на защиту.

Первая глава диссертации посвящена комплексному обзору литературы, где описываются характеристики сплавов на основе алюминидов титана, их физико-механические параметры, структурные особенности и практическое применение. Рассмотрены закономерности легирования и их влияние на деформационные свойства. Значительное внимание уделяется методологии порошковой металлургии, где комбинирование технологий ВЭМО и СВС представлен как предпочтительный метод производства порошков-прекурсоров. Описаны традиционные производственные технологии, методы аддитивного производства, в частности селективное электронно-лучевое сплавление (СЭЛС) и селективное лазерное сплавление (СЛС). Проанализированы методы получения порошков, пригодных для АТ, включая плазменную сфероидизацию. Рассмотрены методы постобработки изделий аддитивного производства, где значительную роль в минимизации дефектов и оптимизации свойств играют горячее изостатическое прессование (ГИП) и термическая обработка (ТО). По итогам анализа сформулированы приоритетные научно-технические задачи и обоснован выбор жаропрочного сплава TNM-B1, работоспособного при температурах свыше 700°C.

Во второй главе описаны характеристики исходных материалов, технологического и аналитического оборудования, а также приведены методики исследования.

Сферический порошок из сплава на основе алюминидов титана получали по технологии, включающую синтез из элементов в режиме теплового взрыва, механическое измельчение спеков, воздушную классификацию, обработка в потоке термической плазмы и ультразвуковая очистка порошка. Полученный порошок применяли в технологиях горячего прессования (ГП), ГИП и СЛС. Приведено описание перечня основного аналитического оборудования и методов исследования, в том числе структурных исследований на растровом электронном микроскопе и кристаллическую структуру фазовых составляющих методом просвечивающей электронной микроскопии. Описана методика испытаний сплавов на жаростойкость при проведении окислительных отжигов.

Третья глава содержит результаты по оптимизации параметров механической обработки при синтезе модифицированного сплава TNM-B1, включая анализ влияния различных схем зашихтовки на свойства материалов. В исследовании проанализированы четыре схемы компоновки элементных порошков: от одноступенчатого получения гомогенной смеси Ti-Al-Nb-Mo-V до комплексных подходов с предварительным смешиванием и поэтапным добавлением компонентов. Исследования показали, что наиболее эффективна схема, основанная на высокоэнергетическом смешивании Ti-Nb-Mo-

В с последующим введением алюминия в ШВМ. Данный подход обеспечивает оптимальное распределение легирующих элементов и минимальное содержание примесей. Дополнительно изучалось влияние частичной замены титана на TiH_2 , где выявлено, что 10%-ное замещение способствует измельчению зеренной структуры и снижению концентрации кислорода до 0,45% за счет образования восстановительной среды при разложении гидрида в процессе синтеза.

Четвертая глава посвящена исследованию влияния различных модификаторов (C, Si, Y_2O_3) на структуру и свойства сплавов TNM-B1, полученных по комбинированной технологии ВЭМО и СВС. Установлено, что введение 1,0% Y_2O_3 обеспечивает оптимальные механические характеристики при комнатной температуре, достигая прочности на сжатие $\sigma_b = 1587$ МПа при удовлетворительной пластичности ($\epsilon = 10 \pm 1\%$), что превосходит показатели других модификаций на 95-190 МПа. Исследования жаростойкости продемонстрировали стабильность всех модификаций при $800^\circ C$ с формированием рутилового защитного слоя. При $1100^\circ C$ модификация Y_2O_3 показала особую эффективность благодаря формированию комплексного защитного слоя $Y_2Ti_2O_7$ и $Al_2O_3/Y_2Ti_2O_7$. Изучение термомеханических свойств в интервале $800-1100^\circ C$ выявило преимущество ламеллярной структуры над глобулярной, что подтверждается высокой энергией активации ползучести и особенностями деформационного поведения. Внедренные наночастицы Y_2O_3 эффективны при температуре $1100^\circ C$ и способствуют замедлению процессов деградации с образованием микротрещин на границе с матрицей.

В пятой главе представлены результаты исследований по оптимизации технологии получения и обработки узкофракционных сферических порошков модифицированного Y_2O_3 сплава TNM-B1 для последующего применения в процессах ГИП и СЛС. Экспериментально доказана эффективность использования водородсодержащей термической плазмы, обеспечивающей высокую степень сфероидизации (99%) при одновременном снижении содержания примесного кислорода с 0,45 до 0,23 масс.%. Определены оптимальные технологические параметры: ток дуги (150 А), энтальпия потока ($3,8$ кВтч/ m^3), производительность ($1,2$ кг/ч) с применением смеси Ar+H₂. Установленный режим позволяет достичь сферичности частиц 96% при минимизации нежелательной нанодифракции. Для процесса СЛС определены оптимальные параметры формирования бездефектных заготовок: объемная плотность энергии лазера $40-50$ Дж/ mm^3 , мощность 60 Вт, скорость сканирования более 900 мм/с.

В шестой главе исследованы особенности взаимодействия модифицированного сплава TNM-B1 с армирующим компонентом SiC. Исследования показали формирование после горячего прессования комплексной многослойной реакционной зоны, включающей слои TiC, MAX-фазы и гибридную зону Ti_2AlNb/Ti_2AlC . Разработанные параметры горячего прессования обеспечивают оптимальное реагирование углеродного слоя на поверхности SiC при сохранении целостности дискретного наполнителя.

В приложениях А-Е представлены акты об изготовлении и проведенных испытаниях, технологическая инструкция и ноу-хау, выпущенные по результатам диссертационной работы.

Диссертационную работу завершают общие выводы, которые позволяют объективно оценить значимость проведенных исследований.

Автореферат и представленные публикации в полной мере соответствуют диссертационной работе, в достаточной степени отражают научную новизну, и содержание диссертации.

Научная новизна заключается в следующем:

1. Установлено, что частичное замещение титана его гидридом в порошковой смеси Ti/TiH₂-Al-Nb-Mo-V позволяет уменьшить содержание примесного кислорода после ВЭМО и СВС с 0,65 % до 0,4 %, что объясняется созданием локальной восстановительной атмосферы при СВС порошковых брикетов в результате термического разложения TiH₂; введение концентраций TiH₂ выше оптимальной, равной 10 %, приводит к увеличенному газовыделению при СВС и формированию мелкозернистой структуры, что приводит к более активной адсорбции кислорода на поверхности спека.

2. Определен вклад наночастиц Y₂O₃ в процессы фазообразования при окислении сплава TNM-B1, заключающийся в формировании в оксидном слое защитного двойного оксида Y₂Ti₂O₇, препятствующего зернограницной диффузии кислорода в объем сплава, и подавлении роста нежелательного слоя на основе рутила TiO₂.

3. Установлено, что наночастицы Y₂O₃ повышают сопротивление деформации при ползучести сплавов TNM-B1, за счет уменьшения средней длины свободного пути дислокаций в сплавах с глобулярной микроструктурой и за счет подавления рекристаллизационных процессов и сохранения дисперсной структуры колоний в сплавах с ламеллярной микроструктурой.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

Разработаны составы жаропрочного сплава на основе алюминидов титана и комплексная технология получения узкофракционного порошка сочетанием методов самораспространяющегося высокотемпературного синтеза из элементов и плазменной сфероидизации (зарегистрировано в депозитарии ноу-хау НИТУ МИСИС № 03-732-2024 ОИС от 27 марта 2024, номер государственного учета РИД 624052700021-9).

Полученные в диссертационной работе результаты имеют большое прикладное значение для предприятий аэрокосмической отрасли. По результатам работ разработана и зарегистрирована технологическая инструкция на процесс изготовления узкофракционных сферических СВС-порошков из сплавов на основе алюминидов титана. Также по оптимальным технологическим режимам СЛС изготовлены модельные образцы рабочей крыльчатки ГТД из разработанного узкофракционного сфероидизированного порошка модифицированного сплава TNM-B1. Результаты проведенных испытаний кольцевых мишеней-катодов из модифицированного сплава TNM-B1 подтвердили их пригодность для использования в технологии магнетронного осаждения покрытий. Разработанные материалы рекомендованы к практическому применению в технологическом процессе получения металлматричных материалов на предприятии АО «Композит».

По материалам диссертации имеется 17 публикаций, в том числе 5 статей в журналах из перечня ВАК и входящих в базы данных Scopus, Web of Science, 11 тезисов докладов в сборниках трудов международных конференций и 1 «Ноу-хау».

Представленные в диссертации научные положения и выводы имеют достаточное экспериментальное подтверждение и теоретическое обоснование. Надежность полученных результатов базируется на обширном массиве экспериментальных данных, их тщательной статистической обработке и всестороннем анализе с учетом современных научных публикаций. Высокая достоверность исследования обеспечивается использованием комплекса современных высокоточных методов анализа и передового технологического оборудования.

По диссертационной работе имеются следующие замечания:

- 1). В главе 3 автор не обсуждает влияние нерастворенного ниобия на механические свойства сплава. Стоило бы привести пояснения.

- 2). В главе 5 на рис. 5.2. приведен гранулометрический состав сплава TNM-B1+1%Y₂O₃ после СВС с использованием логарифмической шкалы измерения, что затрудняет восприятие полученных результатов.
- 3). В главе 5 автором установлено, что при плазменной сфероидизации произошло восстановление оксидов в порошке (удаление растворенного кислорода), но не указывается, не произошло ли восстановление оксида иттрия и как это могло повлиять на структуру и свойства сплава.
- 4). Автором не обоснован выбор температуры инициирования горения в режиме теплового взрыва при 900 °С, что требует дополнительного объяснения.

Отмеченные замечания не влияют на общую положительную оценку работы Маркова Г.М. и не снижают теоретической и практической значимости диссертационной работы.

Заключение

Диссертационная работа Маркова Г.М. представляет собой законченное научное исследование, обладающее научной новизной и содержащее решение актуальной научно-практической задачи в области порошковой металлургии – разработке технологии получения новых жаропрочных сплавов на основе алюминидов титана и получение из них сферических порошков.

Диссертационная работа «Получение порошков жаропрочных никелевых сплавов и их применение в аддитивных технологиях» по объему и оригинальности полученных результатов, научной и практической значимости выводов, целям и задачам соответствует требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям п.п. 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденным Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 года, а ее автор, Марков Георгий Михайлович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.5 - Порошковая металлургия и композиционные материалы.

Отзыв составлен и принят на основании анализа диссертации, автореферата и обсуждения доклада Маркова Г.М. на заседании секции Ученого совета ИСМАН «Материалообразующие процессы горения и взрыва» 10.09.2024 протокол № 34.

Председатель секции Ученого совета ИСМАН
главный научный сотрудник
лаборатории жидкофазных СВС-процессов
и литых материалов,
д.т.н., профессор

Юхвид
Владимир Исаакович

Подпись Юхвида В.И. заверяю.
Ученый секретарь ИСМАН, к.т.н.

Петров
Евгений Владимирович

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мерджанова
Российской академии наук (ИСМАН),
142432, Московская обл., г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, д. 8.
Тел.: 8 (49652) 46-376, Факс: 8 (49652) 46-222, E-mail: isman@ism.ac.ru,