

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ИСМАН
чл.-корр. РАН М.И. Алымов

« 01 » декабря 2016 г.

О Т З Ы В

ведущей организации на диссертационную работу

Картавых Андрея Валентиновича

«Инженерия микроструктуры и свойств конструкционных интерметаллидов на основе TiAl(Nb), TiAl(Nb, Cr, Zr) при направленной кристаллизации, микролегировании бором и лантаном», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.16.09 – материаловедение (металлургия)

Необходимость увеличения мощности и производительности современных энергетических установок турбинного типа непосредственно связана с разработкой конструкционных материалов с повышенным комплексом свойств, функционирующих в экстремальных условиях эксплуатации (одновременное воздействие высоких температур, давлений и механических нагрузок). В настоящее время наиболее широко используются сложнолегированные никелевые жаропрочные сплавы (НЖС). Благодаря совершенствованию способов кристаллизации, дополнительной термообработки и прецизионного подбора легирующих элементов рабочая температура современных НЖС достигла 1150°C. Однако дальнейший потенциал улучшения свойств НЖС практически исчерпан.

Для создания энергетических установок следующего поколения необходимо решение 2-х основных задач:

1) Повышение температуры в камере сгорания и «горячей» зоне газотурбинного агрегата и, как следствие, создание высокотемпературных

материалов, способных работать при 1300–1400 °С. Наиболее перспективными материалами для решения этой задачи считаются сплавы на основе тугоплавких металлов (Nb и Mo) с композиционным упрочнением соединениями Nb, Mo, W, Ti, Zr, Cr и др.

2) Снижение массы двигателя и, как следствие, создание высокотемпературных материалов с пониженной плотностью. Для решения данной задачи наиболее перспективными материалами являются жаропрочные титан-алюминиевые интерметаллиды с регламентируемой микроструктурой. Применение лёгких сплавов на основе TiAl, имеющих плотность 4-4.5 г/см³ позволит в будущем до 35% повысить эффективность энергопроизводящих турбин и до 20 % увеличить отношение «подъёмная сила/вес» авиадвигателей по сравнению с современными аналогами, созданными на основе никелевых спецсплавов (superalloys) с плотностью 8-8.5 г/см³. «Тяжёлые» никелевые сплавы составляют около 40% от общей массы современного авиадвигателя, и потенциал её снижения является существенным.

Актуальность работы диссертации А.В. Картавых определяется необходимостью разработки научных подходов и технологических принципов получения новых жаропрочных сплавов на основе TiAl, предназначенных для работы до температур 800 °С. Поставленная в работе цель включала разработку лабораторных технологий получения интерметаллидных жаропрочных сплавов (ИЖС) систем TiAl(Nb) и TiAl(Nb,Cr,Zr) и экспериментальное опробование фундаментальных научных и технологических основ управления структурой, фазовым составом и физико-механическими свойствами интерметаллических γ -сплавов с применением функционального легирования и методов направленной кристаллизации.

Подтверждением актуальности и востребованности выбранных объектов исследования является выполнение данной работы в рамках интеграционного междисциплинарного проекта Евросоюза (Intermetallics

Processing in Relation to Earth and Space Solidification» (IMPRESS) - контракт ЕС NMP3-CT-2004-500635, а также в рамках нескольких проектов Федеральной Целевой Программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2012 годы» 1-(Исследование условий наноразмерной структурно-фазовой сегрегации в слитках жаропрочного интерметаллида TiAlNb при кристаллизации в тиглях из бескислородной спецкерамики, Госконтракт № 02.513.11.3316), 2-(Разработка подходов и способов создания материалов на основе легированных гамма-алюминидов титана с упорядоченной наноструктурой для применения в жаропрочных компонентах газотурбинных двигателей, Соглашение № 14.575.21.0042). Кроме того, работы выполнялись в рамках НИР Государственного задания № 11.951.2014/К Минобрнауки России и проектов РФФИ: № 10-03-00338, № 13-03-00500, № 16-03-00757.

Достоверность и научную новизну диссертационной работы определяют полученные лично соискателем результаты исследования, обобщающие данные о закономерностях структурообразования в системах TiAl(Nb), TiAl(Nb,Cr,Zr) в зависимости от сочетания легирующих компонентов и степени легирования, а также разработанные новые технологические решения в области материаловедения конструкционных интерметаллических сплавов на основе γ -TiAl.

Можно выделить следующие наиболее значимые результаты:

- Найдены новые приемы управления структурообразованием интерметаллических сплавов на основе γ -TiAl с использованием методов тигельной вертикальной направленной кристаллизации в многозонных трубчатых печах и высокоградиентной (300 °C/см) бестигельной индукционной зонной плавки (БЗП). Определены режимы устойчивого формирования столбчатой и равноосно-зернистой микроструктур для сплава Ti-46Al-8Nb, формируемых в условиях вертикальной направленной кристаллизации (ВНК) в трубчатом тигле с управляемым температурным

градиентом в диапазоне 5-50 °С/см. Впервые обнаружен и промоделирован эффект осевой структурно-композиционной перитектической сегрегации в слитках Ti-46Al-8Nb, установлен механизм возникновения такой сегрегации и сформулированы методы её предотвращения для получения структурно-однородных изделий при ВНК.

- Впервые применен гексаборид лантана (LaB_6) в качестве лигатуры жаропрочных сплавов на основе TiAl. Выявлена комплексная эффективность лигатуры LaB_6 как относительно дешёвого модификатора, обеспечивающего формирование более дисперсной микроструктуры и одновременного снижения концентрации растворённого кислорода в слитке.
- Впервые методом БЗП сформирована ориентированная трёхфазная ($\gamma + \alpha_2 + \text{B}_2$) структура сплава Ti-44Al-5Nb-3Cr-1.5Zr, обладающая высокой прочностью до 900-950 °С, и приемлемой пластичностью при нормальных температурах. Основные достигнутые показатели включают:
 - предел текучести (при 20°С) $\sigma_{0.2} = 550$ МПа; предел прочности $\sigma_{\max} = 1780$ МПа; степень максимальной деформации на сжатие $\varepsilon_{\max} = 22.8$ %, максимальное относительное удлинение $\delta^{20} = 1.45$ %, плотность 4.11 г/см³;
 - предел текучести (при 950 °С) $\sigma_{0.2} = 470$ МПа; $\varepsilon_{\max} > 50$ %; модуль упругости (Юнга) $M_{\text{ю}} = 95$ ГПа при нулевой скорости ползучести под нагрузкой 200 МПа.
- Исследованы механизмы формирования мелкодисперсных структур с диаметром зерна 120 и 30 мкм в слитках γ -TiAl(Nb) и γ -TiAl(Nb,Zr,Cr) при микролегировании борсодержащими лигатурами TiB_2 и LaB_6 . Выявлено, что исходные лигатуры подвергаются растворению и последующей рекристаллизации в Nb-содержащих расплавах TiAl с образованием микрокристаллов твёрдых растворов $\text{Ti}_{(1-x)}\text{Nb}_x\text{B}$ на основе моноборида титана. В системе TiAl(Nb) они являются центрами зарождения зёрен первичной β -фазы.

Научная новизна исследований и полученных результатов полностью отражена в выводах диссертации. Проведенные научные исследования можно характеризовать как научно обоснованные разработки, способствующие решению важных прикладных задач в области создания новых интерметаллидных (“легких”) жаропрочных сплавов (ИЖС) с высокими физико-механическими свойствами.

Достоверность и новизна полученных результатов диссертационной работы подтверждена значительным количеством экспериментальных результатов, полученных с использованием комплекса современных аналитических методов исследования структуры, фазового состава и свойств изучаемых сплавов и сопоставлением этих результатов с данными других авторов. Полученные диссертантом основные результаты апробированы более чем на 15-ти международных конференциях, а также опубликованы в 23 статьях в ведущих профильных Российских и международных журналах, индексируемых в Web of Science и Scopus. Кроме того, по результатам работы диссертанта получен 1 патент РФ и поданы 2 патентные заявки в ФИПС.

Значимость результатов исследования состоит в том, что полученные и систематизированные автором данные позволяют внести вклад в понимание природы структурообразования при использовании различных технологий приготовления сплавов на основе мультилегированных систем TiAl, а также в создание научных основ разработки новых жаропрочных материалов с высокими физико-механическими свойствами.

Основное внимание в работе уделено комплексному анализу зависимости фазового состава, микроструктуры и механических свойств образцов сплавов на основе TiAl от способов легирования исходных составов.

Экспериментально уточнена расчётная фазовая диаграмма состояния – псевдобинарная изоплета Ti-Al-8ат.% Nb для состава Ti-46Al-8Nb (ат.%). Показано, что первичной твёрдой фазой сплава является $\beta(\text{Ti})$, а путь его

фазовых превращений расположен близко (в пределах 1-1.5 ат. %) от перитектики $\beta + \alpha$.

Впервые разработаны приёмы структурного контроля интерметаллических сплавов на основе γ -TiAl методами тигельной вертикальной направленной кристаллизации в многозонных трубчатых печах (ВНК) и высокоградиентной (300 °C/см) бестигельной индукционной зонной плавки (БЗП). БЗП заявлена к патентованию как способ обработки интерметаллидов на основе TiAl.

Впервые установлены окислительные процессы и физико-химические механизмы износа β -стабилизированных сплавов при трибологических испытаниях в паре с хромистой сталью. Доказана высокая трибохимическая стойкость сплава Ti-44Al-5Nb-3Cr-1.5Zr и его бор-лантан-содержащих производных в воздушной среде.

Основные положения диссертационной работы основываются на исследованиях, выполненных лично или при непосредственном личном участии автора. Автор принимал участие в разработке методик проведения экспериментов, проведении экспериментов, обсуждении, анализе и оформлении результатов в виде научных публикаций.

Практическое значение результатов работы определяется тем, что они будут способствовать развитию технологий получения и расширению области практического применения высокотемпературных интерметаллических сплавов на основе TiAl, перспективных для создания ответственных изделий новых энергетических установок и спецтехники.

Уже на стадии выполнения диссертационной работы, полученные в её ходе экспериментальные сплавы и теоретические результаты применялись в междисциплинарных научно-исследовательских проектах в АО «ГНЦ РФ Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского» (Обнинск), ООО «Технологические Системы Защитных Покровов» (Москва) и Российско-германском центре лазерных технологий (ИЛиСТ) (Санкт-Петербург).

Соответствующие акты о практическом применении результатов представлены в приложении к диссертационной работе (стр. 320-322).

Оригинальность разработанных составов и способов получения исследуемых в работе материалов запатентована или представлена к патентованию:

- Патент РФ № 2362651 «Способ получения слитков и литых изделий из интерметаллических сплавов.
- Заявка на патент РФ № 2015149049 «Способ обработки интерметаллических сплавов на основе гамма-алюминиды титана».
- Заявка на патент РФ № 2015154794 «Интерметаллический сплав на основе TiAl».

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации в соответствии с п. 24 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК РФ.

Несмотря на уже достигнутые важные результаты, предполагается целесообразным продолжить работу в направлении оптимизации составов жаропрочных сплавов на основе систем Ti-Al-(X-компоненты), где X - Nb, Zr, Cr и др. с учетом широких возможностей по легированию исследуемых материалов и комбинированию технологических подходов.

Разработанные научно-технические принципы получения сплавов могут быть реализованы на стадии опытно-технологической работы (ОТР) и последующего внедрения в условиях инновационных предприятий, венчурных компаний и металлургических предприятий РФ, специализирующихся на получении материалов для высокотемпературного применения, среди них следует выделить:

- АО «Авиадвигатель»;
- АО «Композит»;
- АО «Пермский моторный завод»;
- ПАО «Уфимское моторостроительное производственное объединение» (ПАО УМПО);

- ФГУП «Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова» (ФГУП ЦИАМ);
- ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» ГНЦ РФ (ФГУП ВИАМ) и др.

Общая оценка содержания и оформления диссертации. Особо следует отметить высокий научный уровень работы. Работа спланирована и выполнена в относительно короткие сроки, включая достаточно трудоёмкое исследование, опубликование основных результатов и их патентование в .

В целом результаты диссертации имеют высокую научную значимость, поскольку направлены на решение одной из наиболее актуальных задач современного материаловедения – создание новых материалов для работы в экстремальных условиях (одновременного воздействия повышенных температур, нагрузки и агрессивных сред).

Работа представлена в 11 главах, написана хорошим языком, основные результаты опубликованы. Работа изложена на 319 страницах, включая 161 рисунок и 41 таблицу. Библиография включает 236 наименований. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Вместе с тем, отмечая достоинства диссертационной работы, следует высказать ряд замечаний.

Общие замечания. Общий анализ содержания диссертации выявил недостатки, среди которых следует выделить следующие:

- Следует отметить, что в работе не полностью нашел отражение вопрос о жаростойкости полученных материалов. Практическое использование ИЖС предполагает эксплуатацию в высокотемпературных окислительных средах, где низкие показатели жаростойкости могут нивелировать высокие характеристики жаропрочности.
- Формат диссертации не оптимизирован. Диссертация, включающая 11 глав, могла быть оптимизирована до 7 глав, что соответствует общепринятому формату.

- Следует явно выделить общую склонность автора к неоправданному использованию англоязычных терминов, например:
 - *верификация*, русский аналог – проверка или подтверждение,
 - *частицы-нуклеанты*, русский аналог – дисперсионные частицы,
 - стр. 155, «Расчет экспериментального *бенчмарка* из работы [182] ».
 - стр. 189, «...причины расхождения между *предиктивной теорией* и практикой формирования микроструктуры сплавов».
 - стр. 209 «...*микропреципитантов* ...»
 - стр. 235 «...*Со-преципитация* ...»
 - стр. 239 «...*Нано-преципитаты*...»,
- Присутствуют в тексте диссертации и спорные утверждения такие как:
 - стр. 27. «Интерметаллиды (природные композиты).... »
 - стр. 51. «...Однако, использование некоторых из них (тигельных материалов) невозможно или затруднено из-за *относительно низкой температуры плавления* Al_2O_3 , SeO»,
 - стр. 216. «...*Гранулярная* микроструктура сплава Ti-46Al-8Nb (ат.%)»,
- В тексте диссертации на некоторых рисунках встречаются обозначения на английском языке для осевых подписей и на обозначениях экспериментальных кривых.

Выявленные замечания не влияют на общую положительную оценку работы.

Закключение. Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную исследовательскую работу на актуальную тему. Выводы и рекомендации работы обоснованы. В соответствии с п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК РФ, представленную работу по совокупности разработанных теоретических положений и полученных практических результатов следует квалифицировать как научное достижение в области материаловедения конструкционных интерметаллических сплавов на основе γ -TiAl.

Новые научные результаты, полученные диссертантом, имеют

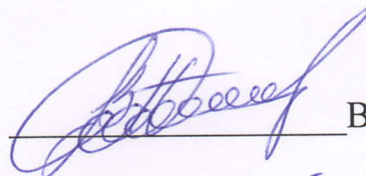
существенное значение для российской науки и практики в области создания новых «легких» жаропрочных материалов с высокими физико-механическими свойствами. Их внедрение может внести значительный вклад в развитие новых наукоемких технологических отраслей промышленности.

Работа отвечает требованиям ВАК, которые предъявляются к диссертациям на соискание ученой доктора технических наук (пп. 9–14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 №842), а ее автор, Картавых Андрей Валентинович, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.16.09 – материаловедение (металлургия).

Диссертационная работа Картавых А.В. лично представлена автором, заслушана и обсуждена на постоянно действующем семинаре ИСМАН 22 ноября 2016 г., Протокол № 14/2016.

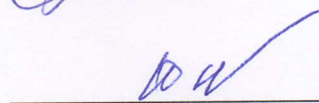
Рецензент,

И.о. зам. директора Института по научной работе, д.т.н.



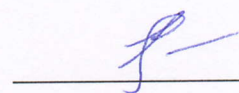
В.Н. Санин

Председатель семинара,
Зав. Лаб. № 5. «Жидкофазных СВС-процессов и литых материалов»,
д.т.н., профессор



В.И. Юхвид

Ученый секретарь ИСМАН,
к.ф.-м.н.



О.К. Камынина

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения Российской академии наук, 142432 г. Черноголовка, М.О., ул. Академика Осипьяна д. 8, тел.: 8 496 524 63 76, E-mail: isman@ism.ac.ru