

АННОТАЦИЯ

диссертационной работы на тему:

«РАЗРАБОТКА ПЕРСПЕКТИВНЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ТИТАНА С ВЫСОКИМ УРОВНЕМ МЕХАНИЧЕСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ»

представленной на соискание степени доктора философии PhD
по специальности 6D071000 – Материаловедение и технология новых
материалов

АЛИМЖАНОВОЙ АЛИИ МАРГУЛАНОВНЫ

Оценка современного состояния решаемой научной или научно-технологической проблемы. В настоящее время трудно представить развитие и дальнейшее совершенствование современного машиностроения без широкого применения титановых сплавов. В ближайшем будущем предполагается не только двукратное увеличение объемов потребления титановых сплавов в авиационной промышленности, но и повышение спроса на титановые полуфабрикаты в других отраслях промышленности, как судостроение, медицина, атомная и химическая промышленность, автомобилестроение, производство товаров народного потребления и др.

Преимуществами титановых сплавов перед другими материалами являются их высокая удельная жаропрочность и прочность, в сочетании с высокой коррозионной стойкостью. Кроме того, титан и его сплавы хорошо поддаются к электро и газосварке и обладают парамагнитными свойствами.

К настоящему времени разработано несколько сотен опытных композиций и более сотни промышленных сплавов титана различного назначения. Исследование их структуры и свойств посвящены многочисленные научные работы, в которых неоднократно предпринимались попытки установить количественную связь между механическими свойствами и химическим составом сплавов. Однако они не дали однозначных результатов из-за высокой чувствительности свойств сплавов к их фазовому составу и структурному состоянию, а также к колебанию содержания легирующих элементов и примесей в пределах марочных составов.

Среди промышленных сплавов титана особое значение имеют жаропрочные титан-алюминиевые интерметаллиды с управляемой микроструктурой, которые используются для изготовления лопаток газосжигающих турбин, тепловых электростанций и авиационных газотурбинных двигателей. Применение легких сплавов на основе Ti-Al, имеющих плотность 4-4,5 г/см³, позволит в будущем повысить эффективность энергопроизводящих турбин до 35 % и до 20 % увеличить отношение «подъемная сила/вес» авиадвигателей по сравнению с современными аналогами, созданными на основе никелевых специальных сплавов с плотностью 8-8,5 г/см³. Особое значение имеют γ -TiAl сплавы, применение которых уже позволило уменьшить массу турбин и в целом массу самолета, что

способствовало снижению потребления керосина и объема выбросов CO₂ до 15,0%.

Дальнейший прогресс применения TiAl-интерметаллидов в авиа турбинах связан с последовательной заменой никелевых турбинных лопаток на легкосплавные материалы в более горячих зонах газотурбинных двигателей. Для этого требуется повышение их жаропрочности и жаростойкости новых материалов до температур 600 °С и более. В США, странах Евросоюза и Китае проводятся интенсивные исследования в этом направлении. Основная причина повышенного интереса к интерметаллидным сплавам со стороны ведущих промышленных гигантов связана с оптимальным сочетанием эксплуатационных и технологических свойств при температурах, характерных для работы газотурбинных двигателей нового поколения.

Основание и исходные данные для разработки темы. Казахстан производит в достаточном количестве высококачественный губчатый титан, который может быть исходным сырьем для перспективных титановых сплавов. Выход АО «УКТМК» (Усть-Каменогорский титано-магниевый комбинат) на внутренний рынок и использование отечественной титановой продукции в производстве газо-энергетических установок и в нефтегазовом секторе Казахстана, предусматривает создание производства по выпуску титановых сплавов с высоким уровнем качества.

Обоснование необходимости проведения данной научно-исследовательской работы. В настоящее время задача получения жаропрочных титановых сплавов, способных обеспечить длительную работу машин и механизмов в диапазоне температур 600-700 °С, находится в стадии разработки, как в России и странах СНГ, так и за рубежом.

Новые титановые сплавы и изделия из них должны обладать необходимым комплексом технологических и эксплуатационных свойств (как правило трудно сочетаемых), в частности, высокой прочностью, пластичностью, жаропрочностью и жаростойкостью. Известно, что в результате легирования, термической и термомеханической обработки можно получить нужный комплекс свойств большинства промышленных сплавов, в том числе и на основе титана. Однако, трудность решения этой задачи состоит в том, что в отличие от большинства промышленных сплавов на основе железа и никеля, титановые сплавы характеризуются высокой структурной чувствительностью к концентрации легирующих элементов, режимам термической и термомеханической обработки.

В силу многофакторной зависимости структурно-фазового состава и свойств сплавов на основе титана, необходимо комплексное исследование особенностей физико- химического взаимодействия компонентов титановых сплавов на стадии их получения в области жидко-твердого состояния и последующего охлаждения. Эту задачу можно решить путем построения фазовых диаграмм многокомпонентных систем на основе титана и изучения закономерностей фазовых превращений в зависимости от их состава и температуры. Знание фазовых диаграмм позволяет также установить

оптимальные научно-обоснованные режимы предварительной и окончательной обработки соответствующих сплавов титана и изделий из них, включая разные виды термического и деформационного воздействия для формирования их заданного структурно-фазового состояния и их свойств.

Сведения о планируемом научно-техническом уровне разработки, о патентных исследованиях и выводы из них. Проведен анализ научно-технических и патентных публикаций, включающий 109 наименований литературных источников в области разработки сплавов на основе титана с высоким уровнем механических и технологических свойств.

Планируемый научно-технический уровень разработки предполагает, что структурно-фазовое состояние, обеспечивающее необходимый уровень свойств современных титановых сплавов, в основном достигается путем комплексного легирования тугоплавкими металлами в сочетании с определенными режимами термической, термо-механической и термо-деформационной обработки. К недостаткам титановых сплавов относятся их термическая нестабильность в процессе длительной эксплуатации и низкая жаростойкость (сплавы окисляются при нагреве выше 500 °С), а также они характеризуются довольно низкой технологичностью. До настоящего времени проблема создания промышленных титановых сплавов нового поколения полностью не решена. Поэтому создание перспективных титановых сплавов и разработка передовых технологий, обеспечивающих высокий уровень механических и эксплуатационных характеристик, требует нового подхода к выбору состава, методов и средств внешнего воздействия на всех стадиях их технологического цикла.

Сведения о методологическом обеспечении диссертации.

При проведении научно-исследовательских работ использовано следующее метрологическое обеспечение:

НИТУ МИСиС (Россия, Москва, кафедра «Технология литейных производств») - вакуумная дуговая печь ArcastArc200 с медным охлаждаемым подом, сканирующий электронный микроскоп Tescan Vega 3 LM с приставкой EDX Oxford X-Max80, универсальная испытательная машина Zwick Z250, универсальный твердомер DIGI-TESTOR 930 HB 250 кгс;

РГП «Национальный центр по комплексной переработке минерального сырья РК» (Казахстан, Алматы) - вакуумно-индукционная печь (ИПП-18KW), печь муфельная (Type 1300, ModelFB1315M), шкаф сушильный (Model 615);

Институт Промышленной инженерии имени А. Буркитбаева кафедра «Станкостроение, материаловедение и технология машиностроительного производства» - электронный растровый микроскоп с энерго - дисперсионной приставкой. Jeol, JSM 6490 LA, дифрактометр ДРОН-4, рентгеновский дифрактометр XPert MPD PRO, металлографический микроскоп МЕТАМ ЛВ-31 (ЛОМО).

Всё используемое оборудование и приборы сертифицированы и имеют документальное подтверждение соответствующими контрольными

организациями. Метрологические исследования выполнялись на контрольно-измерительных приборах, поверенных в соответствии с нормативными документами.

Актуальность темы. Высокие эксплуатационные характеристики изделий из титана и его сплавов, обеспечивающие снижение массы оборудования, увеличение кислотостойкой и коррозионной стойкости деталей машин и механизмов, повышение жаропрочности открывают возможности их использования в аэрокосмической отрасли, нефтегазодобывающей и химической промышленности Республики Казахстан. В ближайшем будущем, в условиях более жесткой эксплуатации современной техники и оборудования, потребность в высококачественных титановых сплавах на мировом рынке будет только увеличиваться, а требования к их качеству непрерывно возрастать. Поэтому актуальной проблемой становится разработка научных основ создания и обработки высококачественных титановых сплавов нового поколения из отечественного сырья.

Для разработки перспективных титановых сплавов необходимо осуществить научно-обоснованный поиск новых принципов легирования многокомпонентных сплавов, режимов их термической и деформационной обработки для расширения интервала рабочих температур, обеспечения жаропрочности, повышения коррозионной стойкости в агрессивных средах. Приоритетом при постановке и организации научно-исследовательских работ в этом направлении является снижение трудозатрат, связанных с подбором оптимального комплекса легирующих элементов, отработкой оптимальных технологий термической, термомеханической и термо-деформационной обработки сплавов и изделий из них.

Необходимость усложнения химического состава для обеспечения эксплуатационных характеристик сплавов и переход к многокомпонентным системам, делает задачу разработки сплавов сложной для выполнения стандартными методами и приемами. Выполнение этой задачи возможно только при использовании современных методов компьютерного моделирования, методов расчета и программного обеспечения, например, Thermo-Calc. Он основан на изучении закономерностей физико-химического взаимодействия в многокомпонентных системах в области жидко-твердого состояния и при последующем охлаждении сплавов.

Новизна темы:

- впервые с помощью программного продукта Thermo-Calc изучены фазовые превращения в многокомпонентных титановых сплавах систем,

- Ti-Al-Nb-Mo и модельной системы, для которой обнаружено полное соответствие между расчетными и экспериментальными значениями границ температурно-концентрационных областей;

- рассчитаны и построены политермические, изотермические разрезы и проекции поверхностей ликвидус и солидус соответствующих многокомпонентных диаграмм состояния;

- установлено, что концентрационные области устойчивого состояния γ -фазы имеют место при более низком содержании основного легирующего элемента алюминия (40-43%) по сравнению с известными стандартными промышленными сплавами (44-52%);

- на основе установленных закономерностей фазовых превращений научно обоснован выбор оптимального состава титанового сплава Ti-43Al-4Nb-1Mo, а также предложены оптимальные режимы плавки, литья и термической обработки;

- построены концентрационные зависимости физических характеристик (температура плавления, плотность, теплоемкость, теплопроводность, электропроводность) систем Nb-Al и Mo-Al и определены оптимальные составы лигатур, гарантирующих эффективное усвоение легирующих элементов и их равномерное распределение в объеме расплава.

- получены многокомпонентные γ -сплавы титана системы Ti-Al-Nb-Mo, состав которых рассчитан с помощью программного продукта Thermo-Calc, и определены их структура, фазовый состав, механические и технологические свойства при комнатной и повышенных температурах.

- предложен оптимальный режим термической и термомеханической обработки разработанных сплавов на основе титана, обеспечивающий получение беспористого материала с повышенными механическими и технологическими свойствами при температурах эксплуатации.

Связь данной работы с другими научно-исследовательскими работами. По результатам диссертационной работы опубликовано 10 печатных работ, в том числе 3 в изданиях, рекомендованных Комитетом по контролю в сфере образования и науки МОН РК, 2 научных статей в журнале, входящий в базу Web of Science Core Collection (Metal Science and Heat Treatment с импакт-фактором 0,215). Основные положения и результаты работы докладывались на Международных конференциях в виде устных и стендовых докладов: Международная научно-практическая конференция «Научное и кадровое сопровождение инновационного развития горно-металлургического комплекса». 27-28 апреля, 2017, Алматы, Казахстан; XIV INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONGRESS MACHINES. TECHNOLOGIES. MATERIALS: Year I, Issue 4(4), Vol. IV, TECHNOLOGIES. VARNA, BULGARIA. 13-16.09.2017, 2- ой Международный форум «Техноюнити – Электронно-лучевые технологии для микроэлектроники». 9-21 октября. 2017. Москва.

Получен патент.

Работа выполнялась в рамках грантового финансирования научных исследований МОН РК по теме 4521/ГФ4 на 2015-2017 гг. «Разработка перспективных титановых сплавов с высокой прочностью и технологичностью».

Целью исследований является разработка перспективных сплавов на основе титана с высоким уровнем механических и технологических свойств из казахстанского сырья с использованием расчетных методов

компьютерного моделирования и количественного анализа структурно-фазового состояния многокомпонентных систем.

Объектом исследований являются многокомпонентные титановые сплавы, легированные алюминием и тугоплавкими металлами – ниобием, молибденом, ванадием лигатуры систем Nb-Al и Mo-Al.

Предметом исследований является термодинамические расчеты температурно-концентрационных областей существования фазовых составляющих на диаграммах состояния Ti-Al-Nb-Mo; определение структур многокомпонентных титановых сплавов, оптимальных химических и фазовых составов; способы их получения, режимы термической и деформационной обработки сплавов, обеспечивающие высокий уровень механических и технологических свойств.

Задачи исследования, их место в выполнении научно-исследовательской работы в целом:

1) Рассчитать с помощью программного продукта Thermo-Calc и построить политермические и изотермические разрезы промышленного титанового сплава Ti-Al-V-Zr и показать наличие корреляции между его рассчитанным и действительным фазовым составом.

2) Рассчитать с помощью программного продукта Thermo-Calc и построить политермические и изотермические разрезы многокомпонентного титанового сплава системы Ti-Al-Nb-Mo и установить оптимальный состав легирующих элементов для получения устойчивого состояния γ -сплава.

3) Определить состав лигатур Nb-Al и Mo-Al, удовлетворяющий основным требованиям, предъявляемым к лигатурным сплавам по температуре плавления, плотности, теплопроводности и электропроводности, обеспечивающий максимальное усвоение легирующих элементов.

4) Приготовить опытные многокомпонентные титановые сплавы системы Ti-Al-Nb-Mo в соответствии с рассчитанным по программе Thermo-Calc составом, определить их структуру, фазовый состав и свойства после литья, отжига и ГИП-обработки.

5) Разработать режимы литья, термической и термомеханической обработки, обеспечивающие получение необходимого структурно-фазового состояния и комплекса эксплуатационно-технологических свойств нового титанового сплава.

Методологическая база научных исследований:

В процессе исследований применялись следующие современные приборы:

1) оптический микроскоп AXIO Zeiss-A.1 для регистрации микроструктуры опытных сплавов;

2) электронный растровый сканирующий микроскоп JEOLJXA-8230 (Япония) для изучения тонкой структуры дисперсных систем;

3) рентгеновский дифрактометр ДРОН-4 для определения фазового состава.

Использовано следующее стандартное лабораторное оборудование

- 1) вакуумная печь сопротивления ВЭ-3-16 с графитовым нагревателем и поддержанием вакуума 5×10^{-5} мм рт.ст;
- 2) лабораторная вакуумная дуговая печь Arc200 (США);
- 3) муфельная электрическая печь SNOL – 1,6.2,3.0,8/9 – М1 с точностью поддержания температуры около 10К;
- 4) шлифовально-полировальные станки BUEHLER Phoenix;
- 5) универсальная электромеханическая испытательная машина Zwick Z250;
- 6) универсальный твердомер DIGI-TESTOR 930 НВ 250 кгс по результатам измерения твердости, программный продукт компьютерного моделирования «Thermo-Calc», основанный на базе данных о физико-химических взаимодействиях в многокомпонентных системах на основе титана.

Основные положения, выносимые на защиту

- 1) Фазовый состав в политермических и изотермических разрезах стандартного промышленного титанового сплава марки BT20Л (система Ti-Al-V-Zr) и корреляция между расчетными и экспериментальными данными.
- 2) Фазовый состав и температурно-концентрационные области устойчивого существования γ -фазы в новом разработанном многокомпонентном титановом сплаве системы Ti-Al-Nb-Mo, содержащем 40 и 43% алюминия.
- 3) Состав лигатур Nb-Al и Mo-Al, удовлетворяющий основным требованиям, предъявляемым к лигатурным сплавам по физико-химическим свойствам – температуре плавления, плотности, теплопроводности и электропроводности.
- 4) Структурно-фазовое состояние и эксплуатационно-технологические свойства новых разработанных сплавов титана и выбор оптимальной концентрации основного легирующего элемента – алюминия.
- 5) Режим термической и термомеханической (термо-деформационной) обработки, обеспечивающий получение высококачественного многокомпонентного титанового сплава с необходимым уровнем структуры, эксплуатационных и технологических свойств.

Практическая значимость работы заключается в том, что на основе построенных в работе фазовых диаграмм новых систем, впервые получены новые титановые сплавы с высокой прочностью и технологичностью. Разработаны их оптимальные составы, режимы плавки, литья и обработки. Получены фасонные отливки сплавов и деформированные полуфабрикаты из них.

Возможность управления фазовым состоянием и структурой титановых сплавов на базе построенных в работе фазовых диаграмм, способствует развитию научных основ создания новых высококачественных сплавов, имеет важное научное и практическое значение. Служат основой для разработки новых, научно-обоснованных технологий производства, литья и термической обработки титановых сплавов.

Публикации. Основные положения диссертационной работы опубликованы в 10 научных работах, 2 из которых опубликована в издании, индексируемом в базе Scopus; 3 статьи опубликованы в изданиях, рекомендованных Комитетом по контролю в сфере образования и науки МОН РК; 4 работы опубликованы в материалах международных конференций получен 1 патент.

Апробация работы. По результатам диссертационной работы опубликовано 10 печатных работ, в том числе 3 в изданиях, рекомендованных Комитетом по контролю в сфере образования и науки МОН РК, 2 научных статей в журнале, входящий в базу Web of Science Core Collection (Metal Science and Heat Treatment с импакт-фактором 0,215). Основные положения и результаты работы докладывались на Международных конференциях в виде устных и стендовых докладов: Международная научно-практическая конференция «Научное и кадровое сопровождение инновационного развития горно-металлургического комплекса». 27-28 апреля, 2017, Алматы, Казахстан; XIV INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONGRESS MACHINES. TECHNOLOGIES. MATERIALS: Year I, Issue 4(4), Vol. IV, TECHNOLOGIES. VARNNA, BULGARIA. 13-16.09.2017, 2-ой Международный форум «Техноюнити – Электронно-лучевые технологии для микроэлектроники». 9-21 октября. 2017. Москва.

Получен патент.

Работа выполнялась в рамках грантового финансирования научных исследований МОН РК по теме 4521/ГФ4 на 2015-2017 г.г. «Разработка перспективных титановых сплавов с высокой прочностью и технологичностью».

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 4 разделов, заключения, списка использованной литературы и приложений. Основной текст работы изложен на 115 страницах машинописного текста, содержит 52 рисунков, 30 таблиц, список использованной литературы состоит из 113 наименований.