

На правах рукописи



ДАШКЕВИЧ НИНА ИГОРЕВНА

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВОГО СОСТАВА И РАЗРАБОТКА НОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ
ПРИГОТОВЛЕНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИДОВ
ТИТАНА С ЦЕЛЮ ПОЛУЧЕНИЯ ФАСОННЫХ ОТЛИВОК С ЗАДАННЫМ КОМПЛЕКСОМ
СЛУЖЕБНЫХ СВОЙСТВ

Специальность 05.16.04. – «Литейное производство»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2018

Диссертационная работа выполнена на кафедре «Литейные технологии и художественная обработка материалов» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС».

Научный руководитель:

д.т.н., профессор,
заведующий кафедрой «Литейные технологии и художественная обработка материалов»
НИТУ «МИСиС»

Белов Владимир Дмитриевич

Научный консультант:

д.т.н., профессор,
главный научный сотрудник кафедры
«Обработка металлов давлением»
НИТУ «МИСиС»

Белов Николай Александрович

Официальные оппоненты:

д.т.н., профессор,
проректор по научной работе
и региональному развитию
МГУТУ им. К.Г. Разумовского

Аксенов Андрей Анатольевич

д.т.н., профессор,
заведующий кафедрой «Литейное производство»
ЮУрГУ (НИУ)

Кулаков Борис Алексеевич

Ведущая организация:

**ФГБОУ ВО «Уфимский
государственный авиационный
технический университет»**

Защита диссертации состоится «28» июня 2018 г. в 10:00 на заседании Диссертационного совета Д 212.132.02 при Национальном исследовательском технологическом университете «МИСиС» по адресу: 119049, г. Москва, Ленинский проспект, д. 6, аудитория в корпусе А.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» – <http://misis.ru>.

Отзывы на автореферат диссертации (в двух экземплярах, заверенных печатью учреждения) просьба отправлять по адресу: 119049, г. Москва, Ленинский проспект, д.4, Учёный совет. Копии отзывов можно присылать на электронную почту: misistlp@mail.ru. Автореферат разослан «__» _____ 2018 г.

Учёный секретарь диссертационного
совета Д 212.132.02,
кандидат технических наук, доцент



А.В. Колтыгин

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время в мире область интерметаллидных материалов активно развивается и продолжит свое развитие в будущем. Эти материалы с улучшенными служебными характеристиками необходимы, в том числе, для создания изделий авиационной техники нового поколения. В России реализуются приоритетные Правительственные программы по созданию перспективных газотурбинных двигателей, в частности семейства двигателей на базе ПД-14, ПД35, двигателей 5 и 6 поколений и др. Определены основные задачи двигателестроения в России. В гражданской авиации для газотурбинных двигателей стоит задача увеличения полного назначенного ресурса, повышения экономичности на 10-15 %, снижения эмиссии вредных веществ и уровня шума, трудоемкости в техобслуживании – в 2 раза. Реализация поставленных задач возможна только при использовании новых материалов, в том числе на основе интерметаллидов.

Литейные сплавы на основе гамма-алюминиды титана TiAl (далее гамма-сплавы) являются одними из наиболее перспективных материалов для получения лопаток газотурбинных двигателей. Гамма-сплавы сочетают низкую плотность и высокие механические свойства. При замене никелевых сплавов гамма-сплавами происходит снижение почти в 2 раза массы лопаток, что обеспечивает уменьшение действующих центробежных напряжений в компрессоре и турбинах почти в 2 раза.

Особенностью гамма-сплавов является высокая чувствительность их фазового состава даже к небольшим изменениям концентраций легирующих элементов и параметрам технологии производства. Фазовый состав определяет структуру сплавов, их механические и литейные свойства. По этой причине контроль фазового состава гамма-сплавов на количественном уровне необходим для обеспечения заданных эксплуатационных характеристик лопаток.

Современные гамма-сплавы содержат кроме алюминия другие легирующие компоненты (Nb, Cr, Mo, Zr, W и др). Перспективными являются гамма-сплавы 3-его поколения типа TNM-B1 (Ti_{43,5}Al₄Nb₁Mo_{0,1}B).

Для разработки новых составов и организации производства в России отливок из гамма-сплавов требуется количественный анализ фазового состава тройных, четверных и пятерных систем в области гамма-сплавов на основе алюминиды титана и разработка эффективной технологии получения гамма-сплавов и отливок из них.

Исходя из вышесказанного, актуальным является исследование фазового состава и разработка новой технологии приготовления российских гамма-сплавов с целью получения фасонных отливок с заданным комплексом служебных свойств.

Цель работы. Разработка эффективной технологии получения гамма-сплавов и отливок из них на основе количественного анализа фазового состава тройных, четверных и пяттерных систем в области гамма-сплавов на основе алюминидов титана.

Научная новизна.

1. Установлены особенности фазовых превращений при равновесной и неравновесной кристаллизации, составы фаз при различных температурах и температуры фазовых переходов в системах Ti-Al-X, Ti-Al-X-Y, Ti-Al-Nb-X-Y. Определено влияние различных легирующих элементов на интервал кристаллизации гамма-сплавов на основе алюминидов титана.

2. Определены составы перспективных гамма-сплавов с оптимальным соотношением α , γ , β , α_2 фаз, обеспечивающим повышение эксплуатационных свойств отливок: Ti-43Al-4Nb-1Mo, Ti-40Al-4Nb-1Mo, Ti-43Al-4Nb-1Mo-1Cr, Ti-43Al-4Nb-1Mo-1Cr-1Zr.

3. Установлено влияние примесей в исходной титановой шихте на структуру гамма-сплавов и отливок из них. Показано, что требуемую структуру сплава, соответствующую базовому сплаву TNM-B1, нельзя получить, используя в шихте губчатый титан марки ТГ 110, но возможно ее получение при применении иодного титана.

Практическая значимость.

1. Разработана новая импортозамещающая технология получения гамма-сплавов Ti-Al, основанная на использовании лигатур Al-Mo и Al-Nb, обеспечивающих введение основных легирующих элементов в расплав с максимальной эффективностью их усвоения за счет температуры плавления и плотности лигатур.

2. Определены составы лигатур Al-Mo и Al-Nb и исследованы их свойства (плотность, теплоемкость, теплопроводность, электропроводность), подтверждающие перспективность получения гамма-сплавов одностадийным переплавом в индукционной печи. Этот способ существенно эффективней по сравнению с многостадийным дуговым переплавом.

3. Предложен новый способ получения отливок из гамма-сплавов Ti-Al, основанный на совмещении процесса приготовления сплава с использованием лигатур и литья в многоцветные графитовые формы, изготовленные по безмодельной технологии.

Апробация работы

Основные положения работы докладывались на: 10-ой международной научно-практической конференции «Прогрессивные литейные технологии» (13-17 ноября 2017 г., Москва, НИТУ «МИСиС»); 25-ой юбилейной Международной научно-технической конференции «Литейное производство и металлургия 2017. Беларусь» (18-19 октября 2017,

Минск); научных семинарах кафедры технологии литейных процессов НИТУ «МИСиС» (2014 – 2017 гг.)

Результаты диссертации отражены в 5 публикациях в журналах, входящие в перечень ВАК), 1 учебном пособии.

Структура и объем диссертации.

Диссертационная работа состоит из 5 глав, общих выводов и 5 приложений. Работа изложена на 255 страницах формата А4, содержит 89 таблиц, 6 формул, 148 рисунков. Библиографический список включает 125 наименований.

2. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

2.1. Обзор и анализ литературных источников по теме исследования

Рассмотрены общие сведения о гамма-сплавах на основе алюминидов титана. Проанализированы принципы легирования современных гамма-сплавов, которые содержат, кроме алюминия, другие легирующие компоненты (Nb, Cr, Mo, Zr, W и др). Определено влияние легирующих элементов на структуру и свойства гамма-сплавов. Показано, что наиболее перспективными на сегодняшний день являются гамма-сплавы типа TNM-B1, в состав которых кроме титана и алюминия входят ниобий и молибден. Рассмотрены особенности технологий изготовления слитков гамма-сплавов и фасонных отливок. Показано, что в настоящее время для изготовления слитков гамма-сплавов используется многократный переплав в дуговой печи. Для изготовления отливок требуется учитывать особенности гамма-сплавов, в том числе низкие литейные свойства, высокую реакционную способность по отношению к материалу формы и склонность к трещинообразованию.

На основе литературного обзора сделан вывод о том, для исследования гамма-сплавов требуется рассмотрение четырех- и пятикомпонентных фазовых диаграмм. Для изготовления отливок на российских предприятиях требуется разработка новой эффективной технологии получения гамма-сплавов.

2.2. Методика исследования

Объектом теоретических исследований являлись тройные, четверные и пятерные системы в области гамма-сплавов на основе Ti-Al. В композициях кроме Ti и Al использовали Nb, Mo, Cr, V, Zr, W, Mn и Si.

Объектами экспериментального исследования являлся интерметаллидный гамма-сплав на основе алюминида титана TNM-B1 следующего химического состава: 43,5% Al; 4% Nb; 1% Mo; 0,1%B, сумма примесей – не более 0,275 %.

Гамма-сплавы выплавляли в вакуумной индукционной плавильно-заливочной установке с медным водоохлаждаемым тиглем и центробежно вращающейся формой Consarc в ПАО «ОДК-УМПО» и в вакуумной дуговой печи Arc200 в НИТУ «МИСиС».

В установке Consarc было проведено 2 серии экспериментов. На первом этапе использовали сплав TNM в виде слитков, которые были переплавлены и залиты в формы.

На втором этапе в качестве основы шихты также использовали слитки сплава TNM-B1. Для подшихтовки применялись чистые металлы: титан, алюминий, ниобий, молибден, хром и цирконий. Мощность на индукторе печи поддерживалась максимальной 300 – 305 кВт. Параметры литья: Температура заливки: 1650 °С; Температура керамической формы: 700 °С; Скорость вращения формы 400 об./мин.

Для приготовления гамма-сплавов в дуговой печи Arc200 использовали кусковую шихту, в состав которой входил губчатый титан ТГ110 ГОСТ 17746-96 и иодидный титан ТИ-1, алюминий А995 ГОСТ 11069-74, лигатуры Al-Nb (50-50) и Al-Mo (50-50), бор 99,95. Вакуум до плавки $1 \cdot 10^{-4}$ мм рт.ст. Давление аргона 250-300 мм рт.ст. Сила тока 250-500 А. Напряжение 25-30 В. Количество переворотов садки: 4-5 раз. Заливку образцов осуществляли в стальные изложницы и в графитовые формы, изготовленные на станке с ЧПУ.

Для приготовления лигатур Al-Nb и Al-Mo в лабораторной вакуумной дуговой печи Arc200 использовали алюминий А995 ГОСТ 11069-74, ниобий Nb1 ГОСТ16099-80 и молибден МЧ ТУ 48-19-245-84.

Горячее изостатическое прессование литых образцов гамма-сплавов проводили в ОАО «Композит» по следующему режиму: температура 1250 °С, давление 170 МПа, время выдержки 4 ч. Вакуумный отжиг при 1250 °С проводили в вакуумной печи сопротивления ВЭ-3-16. Вакуум составлял $5 \cdot 10^{-5}$ мм рт.ст. Отжиг при 800 °С проводили в муфельной печи СНОЛ.

Микроструктуру и химический состав образцов изучали на электронном сканирующем микроскопе TESCAN VEGA 3 с микроанализатором INCA SDD X-MAX.

Механические свойства образцов при комнатной температуре оценивали по результатам испытаний на одноосное растяжение плоских образцов, вырезанных из отливок, на универсальной испытательной машине Zwick Z250 и по результатам измерения твердости по методу Виккерса на универсальном твердомере Wilson Wolpert 930N при нагрузке 5 кг и времени испытания 15 с.

Испытание на сжатие при повышенных температурах проводили на комплексе физического моделирования термомеханических процессов Gleeble 3800 с установленным модулем Hydrowedge II. По результатам испытаний определяли зависимость модуля Юнга, предела текучести и предела пропорциональности в интервале температур 20-1000 °С.

Расчет фазового состава проводился с помощью программы Thermo-Calc (версия TCW5) с использованием базы данных TTTIAL1: Thermotech TiAl-based Alloys Database.

Расчетный анализ заливки и формирования отливки проводился в программе ProCAST версии 2017 года.

2.3 Количественный анализ фазового состава тройных, четверных и пятерных систем в области гамма-сплавов на основе алюминидов титана

Проведен расчетный анализ тройных, четверных и пятерных систем на основе Ti-Al в области гамма-сплавов. В композициях, кроме Ti и Al, использовали Nb, Mo, Cr, V, Zr, W, Mn и Si (эти элементы входят в состав известных сплавов). Расчет фазового состава проводился с помощью программы Thermo-Calc с использованием базы данных TTTIAL1: Thermotech TiAl-based Alloys Database.

Расчетный анализ тройных систем Ti-Al-X.

Диапазон по алюминию для изотермических разрезов тройных систем составлял от 30 до 60 мол. %, т.е. заведомо охватывая область гамма-сплавов. Рассчитываемые диапазоны концентраций третьих элементов (X) составляли: до 15 мол.% Nb, до 6 мол.% Mo, Cr, V, Zr, Mn и до 3 мол.% W и Si. Эти значения перекрывают концентрации данных добавок в известных марках сплавов. Политермические разрезы рассчитывали при 45 мол. % Al, что отвечает его среднему содержанию в известных гамма-сплавах. Изотермические разрезы рассчитывали при 1200 и 800 °С. Первая температура характерна для операции горячего изостатического прессования (ГИП), вторая температура близка верхнему пределу рабочих температур деталей (в частности, лопаток газотурбинных двигателей), изготовленных из гамма-сплавов. Примеры политермических и изотермических разрезов тройных систем представлены на рисунке 1.

Расчет систем Al-Ti-X в указанных диапазонах показал наличие следующих фаз: α – твердый раствор на основе ГП -решетки (α -титана); β – твердый раствор на основе ОЦК -решетки (β -титана); β_2 – твердый раствор на основе ОЦК-решетки (с повышенным содержанием β -стабилизатора); γ – твердый раствор на основе алюминидов TiAl; α_2 – твердый раствор на основе алюминидов Ti₃Al; Ti₅Si₃ – силицид титана; σ – фаза на основе соединения AlX₃; λ – фаза на основе соединения TiX₂ (фаза Лавеса); TiAl₃– твердый раствор на основе алюминидов TiAl₃. Полученные результаты позволяют выявить раздельное влияние каждого элемента на формирование структуры.

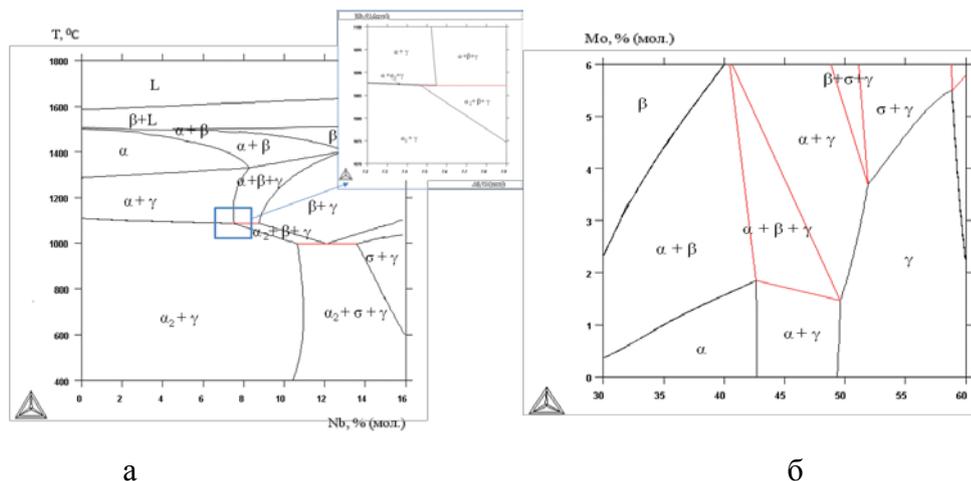
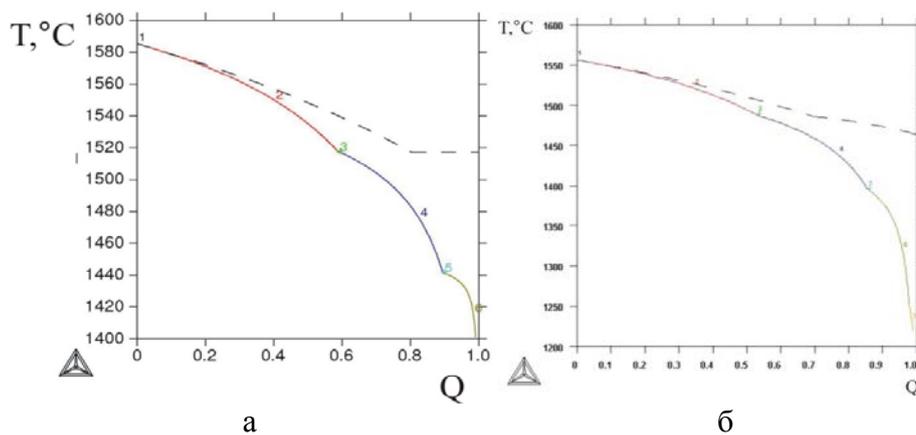


Рисунок 1 – Политермическое сечение системы Ti–Al–Nb (а) и изотермическое сечение системы Ti–Al–Mo при 1200 °С (б)

Политермические сечения позволяют оценить влияние третьего элемента на температуру фазовых переходов и фазовый состав сплава. Расчет изотермических сечений позволяет определить фазовый состав сплава при определенных температурах, а также границы концентраций элементов, при которых не появляются нежелательные фазы.

Исследованы особенности неравновесной кристаллизации тройных систем Ti–Al–X. Определено влияние элементов на интервал кристаллизации сплавов, который определяет литейные свойства. Пример расчета представлен на рисунке 2. Как видно, при введении в сплав хрома в количестве 2 мол.% интервал неравновесной кристаллизации увеличивается практически вдвое со 184 до 337 °С.



а – сплав Ti45Al; б – сплав Ti45Al2Cr

Рисунок 2 – Расчетные зависимости суммарной мольной доли твердых фаз (Q) от температуры для сплавов, содержащих 45 мол.% Al

Расчетный анализ четверных систем Ti–Al–X–Y

Рассмотрены четверные системы Ti–Al–X–Y (где X, Y– Nb, Mo, Cr, V, Zr, Mn, W, Si), включая политермические и изотермические разрезы, а также количественные данные по фазовому составу и температурам фазовых превращений отобранных сплавов. В этих

системах имеются те же фазы, что и в тройных системах (к ним добавляется соединение TiZrSi в Ti–Al–Zr–Si), однако состав этих фаз усложняется, поскольку они содержат 4 компонента.

Политермический и изотермический разрезы четверной системы Ti–Al–Nb–Mo, характерной для сплава TNM-B1, представлен на рисунке 3.

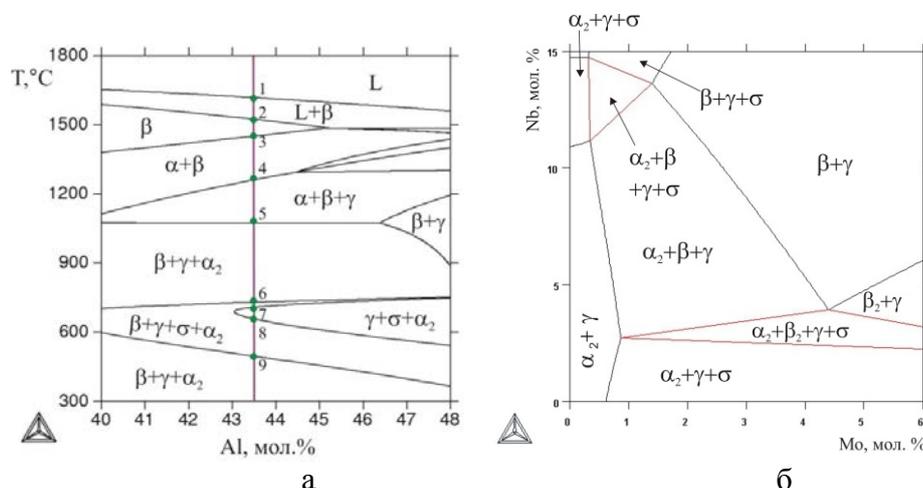


Рисунок 3 – Политермическое (а) и изотермическое при 800 °С (б) сечения системы Ti–Al–Nb–Mo при 4 мол.% Nb и 1 мол.%Mo (а)

Сплавы, содержащие до 45 мол. %, Al, являются β -затвердевающими (Рис. 3а). Равновесная кристаллизация таких гамма-сплавов характеризуется только двумя температурами: ликвидуса (T_L) и солидуса (T_S). После охлаждения в β -области должно начаться полиморфное $\beta \rightarrow \alpha$ -превращение (точка T_α), а затем выделение вторичных γ -кристаллов (точка T_γ). Точка T_E соответствует эвтектоидному превращению $\alpha \rightarrow \alpha_2 + \gamma$, которое в значительной мере определяет конечную структуру. В данной четверной системе имеется не трехфазная ($\alpha \rightarrow \alpha_2 + \gamma$), а четырехфазная ($\alpha \rightarrow \alpha_2 + \gamma + \beta$) реакция. Последняя согласно фундаментальным закономерностям является моновариантной (в отличие от тройных систем, где она невариантна), т.е. должна протекать в интервале температур. Этот интервал весьма узок (менее 2 °С).

Из изотермических разрезов следует, что в сплаве типа TNM-B1 при 1200 °С имеются лишь 3 области: $\alpha + \gamma$, $\alpha + \beta + \gamma$ и $\beta + \gamma$. Увеличение концентраций Nb и Mo меняет фазовый состав базового сплава Ti–45 мол. % Al именно в этой последовательности. При 800 °С строение разреза становится более сложным, в частности появляется четырехфазная область $\alpha_2 + \beta + \gamma + \sigma$, в которую могут попадать сплавы типа TNM (Рис. 3б). При содержании ниобия свыше 3-4 мол. % гамма-сплавы не содержат фазу σ , так как они попадают в область $\alpha_2 + \beta + \gamma$. Таким образом, из данного разреза следует положительное влияние ниобия на фазовый состав сплавов, содержащих только одну добавку молибдена.

На рисунке 4 представлен расчет зависимости массовой доли разных фаз (QM) в сплаве TNM от температуры.

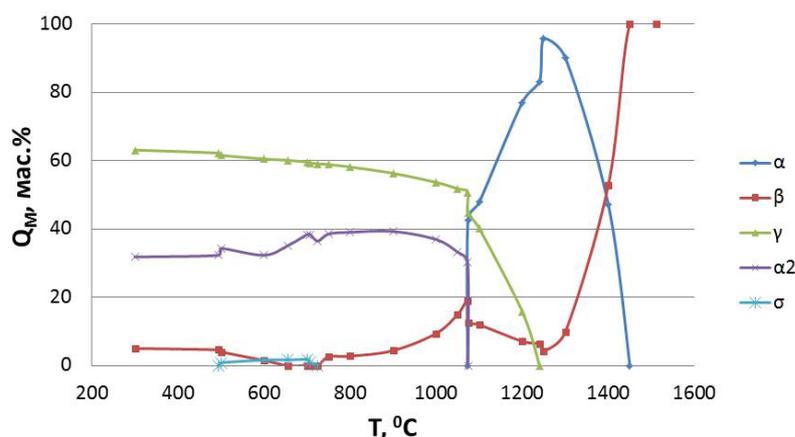


Рисунок 4 – Расчетные зависимости массовой доли разных фаз (QM) в сплаве TNM от температуры

Расчетный анализ пятерных систем Ti-Al-X-Y-Z

Пятерные системы имеют еще более сложное строение по сравнению с четверными системами. Политермические разрезы пятерных систем содержат настолько много фазовых областей, что изображение даже одного из них требует нескольких рисунков. В ряде систем, как это и следует из общих закономерностей, выявляются 5-фазные области и 6-фазные неинвариантные реакции. Из-за чрезвычайной загруженности политермических разрезов в диссертации они не приводятся. Изотермические разрезы пятерных систем Ti-Al-Nb-X-Y рассчитывали при постоянной концентрации алюминия (45 мол. %) и ниобия (5 мол. %). Разрезы рассчитывали при тех же температурах (1200 и 800 °C), что и разрезы тройных и четверных систем. Пример расчетов представлен на рисунке 5.

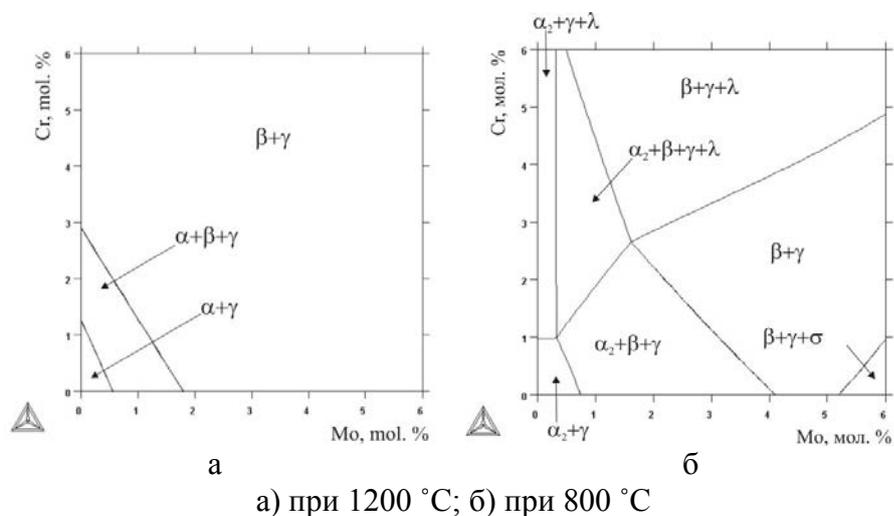


Рисунок 5 – Изотермические сечения системы Ti-Al-Nb-Mo-Cr при 45 мол. % Al и 5 мол. % Nb

На основе изотермических разрезов пятерных систем проведена оценка совместного влияния двух элементов X и Y (Mo, Cr, V, Zr, Mn, W, Si) на фазовый состав базового гамма-сплава. Рассмотрены особенности конкретных разрезов. Определены составы фаз при определенных температурах. Рассмотрены особенности неравновесной кристаллизации пятерных систем.

Определены составы перспективных гамма-сплавов на основе титана, которые могут быть рекомендованы для дальнейших исследований и применения в качестве российских сплавов-аналогов сплава TNM-B1: Ti-43Al-4Nb-1Mo; Ti-40Al-4Nb-1Mo; Ti-43Al-4Nb-1Mo-1Cr; Ti-43Al-4Nb-1Mo-1Cr-1Zr.

2.4. Технология приготовления гамма-сплавов Ti-Al, легированных Nb, Mo

Исследование процесса приготовления перспективных гамма-сплавов на основе Ti-Al в индукционной печи с холодным медным тиглем

Проведены исследования процессов получения экспериментальных гамма-сплавов в индукционной плавильно-заливочной установке Consarc. На первом этапе исследований в качестве базового использовали сплав TNM-B1 в виде слитков, изготовленных в Германии. В процессе переплава концентрация алюминия уменьшилась на 1,9 масс. %, но при этом содержание в составе Nb и Mo изменилось незначительно, соответственно на 0,4 и 0,1 масс. %. На втором этапе в качестве основы шихты использовали слитки сплава TNM-B1 с добавлением чистых металлов: титана, алюминия, ниобия, молибдена, хрома и циркония.

Было опробовано три режима приготовления титановых интерметаллидных сплавов на базе сплава TNM: Одновременная полная загрузка тигля шихтой (базовый сплав и легирующие металлы). Гарнисаж перед проведением новой плавки полностью извлекался из тигля; Загрузка в тигель всей навески базового сплава и всей массы алюминия. Ввод других легирующих элементов сплава через камеру дозагрузки печи. Гарнисаж перед проведением новой плавки из тигля не извлекался; Одновременная полная загрузка тигля шихтой (базовый сплав и легирующие металлы). Гарнисаж перед проведением новой плавки из тигля не извлекается.

Анализ результатов плавки по приготовлению титановых сплавов на базе сплава TNM-B1 в вакуумной плавильно-заливочной установке Consarc показал следующее:

1. При мощности 300 – 305 кВт на индукторе медного водоохлаждаемого тигля (ёмкость 8 кг) вакуумной плавильно-заливочной установки Consarc не реализуется в полной мере процесс растворения в Ti-Al расплаве тугоплавких легирующих элементов Nb, Mo, Cr и Zr. В первую очередь это связано с недостаточно высокой температурой перегрева расплава

Ti-Al, что обусловлено особенностями индукционной плавки с медным водоохлаждаемым тиглем.

2. Большое различие в плотностях (кг/м^3) расплава Ti-Al с легирующими элементами приводит к их быстрому осаждению на холодное дно водоохлаждаемого тигля и процесс растворения их в жидком металле заметно замедляется.

3. Достигаемая на индукторе мощность (300 – 305 кВт) не достаточна для ведения плавки. Длительная плавка ведёт к сильному угару алюминия.

4. Приготовление расплавов в тиглях с гарнисажом от предыдущих плавков показало возможность применения данного направления при работе на индукционных вакуумных печах с холодным тиглем. Масса гарнисажа составила 0,6 – 1,2 кг, что составляет 5-12 % от общей массы плавки. При этом имеет место уменьшение коэффициента расхода металла на лопатке КВД на 4-8 %.

Исследование и разработка технологии приготовления перспективных гамма-сплавов на основе Ti-Al в дуговой печи с использованием лигатур тугоплавких металлов

Исследовали процесс приготовления гамма-сплавов типа TNM с использованием лигатур Al-Mo и Al-Nb. Применительно к перспективным гамма-сплавам, в которых кроме титана и алюминия содержатся тугоплавкие элементы, включая Nb, Mo, Cr, Zr и др., использование более легкоплавких лигатур видится весьма перспективным.

В отличие от известного процесса производства гамма-сплавов Ti-Al методом многократного вакуумного дугового переплава расходуемого электрода, полученного прессованием чистых металлов, использование лигатур тугоплавких металлов с алюминием и их переплава вместе с губчатым титаном и чистым алюминием в вакууме или защитной атмосфере может обеспечить:

- отсутствие необходимости подготовки первичного электрода, в частности операций по измельчению, смешиванию и прессованию шихты.

- потенциальную возможность использования индукционного переплава для получения гамма-сплавов с заданным химическим составом и структурой, который обеспечивает интенсивное перемешивание расплава и за счет этого равномерное распределение элементов в результате только одного переплава.

- потенциальную возможность совмещения процессов приготовления сплава в индукционной печи в результате только одного переплава и получения слитков с требуемыми размерами для последующего изготовления фасонных отливок.

- потенциальную возможность совмещения процессов приготовления сплава в индукционной печи в результате только одного переplava и производства фасонных отливок методом литья в центробежно вращающиеся формы.

Проведено исследование по изготовлению и использованию лигатур на основе Al-Mo и Al-Nb. Определен состав лигатур исходя из обеспечения температуры плавления не выше 1600 °С и плотности, сопоставимой с плотностью расплава TiAl. Для лигатуры Al-Mo содержание молибдена принято 22 % ат (50 % масс), температура плавления порядка 1560 °С. Для лигатуры Al-Nb наиболее эффективным является содержание алюминия ~75 % ат (46 % масс), температура плавления составляет 1680 °С. Микроструктуры лигатур Al-Mo и Al-Nb представлены на рисунке 6.

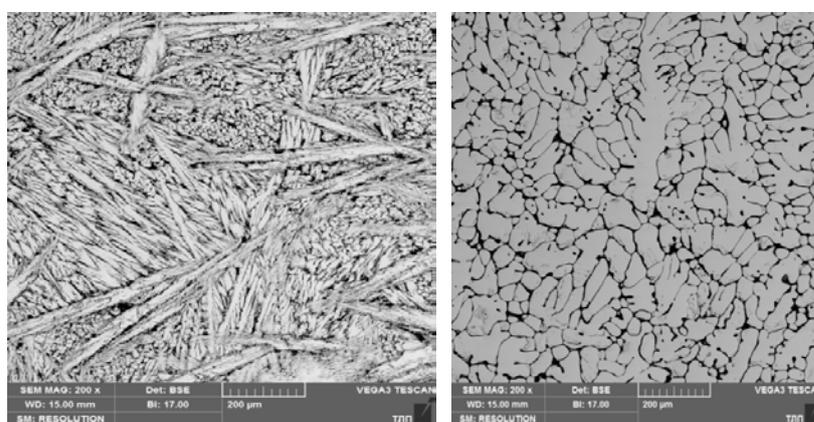


Рисунок 6 – Микроструктура лигатуры Al-Mo (а) и Al-Nb (б)

Согласно расчетам, лигатура Al-Mo при содержании Mo на уровне 50 % масс имеет плотность 4272 кг/м³. Лигатура Al-Nb при содержании Nb 54 % масс имеет плотность 4285 кг/м³. Полученные значения плотности сопоставимы с плотностью гамма-сплавов (4160 кг/м³), что должно благоприятно сказаться на их усвоении в расплаве.

При массовой доле алюминия порядка 50 %, теплопроводность и теплоемкость лигатуры Al-Mo составляют 170 Вт/м·К и 401 Дж/кг·К, а для лигатуры Al-Nb эти же параметры составляют 289 Вт/м·К и 416 Дж/кг·К, что существенно меньше соответствующих значений для алюминия. Совокупность свойств лигатур Al-Mo и Al-Nb создает предпосылки для их эффективного использования при приготовлении гамма-сплавов.

Для последующего сопоставления литой структуры и химического состава провели плавку базового сплава TNM-B1. Результаты EDS анализа представлены в таблице 1. Микроструктура литого образца сплава TNM-B1 представлена на рисунке 7.

Таблица 1 – Результаты EDS анализа образца базового сплава TNM-B1

Номер спектра	Содержание элементов, % масс.				Содержание элементов, ат.			
	Al	Ti	Nb	Mo	Al	Ti	Nb	Mo
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Суммарный спектр карты	27,78	60,25	9,59	2,38	42,63	52,07	4,27	1,02

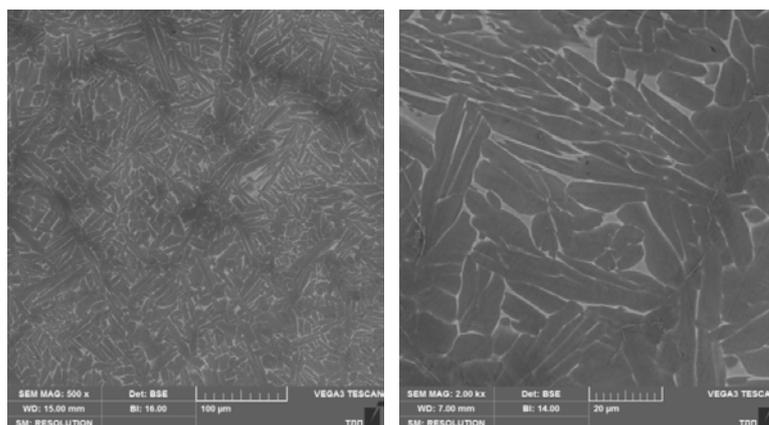


Рисунок 7 – Микроструктура базового сплава TNM-B1

В результате проведенных плавок было установлено, что применение в качестве основы сплавов губчатого титана марки ТГ110 не позволяет получать сплав-аналог TNM-B1 ни по химическому составу, ни по структуре. Причина – загрязненность губчатого титана примесями. Типичная микроструктура получаемого материала представлена на рисунке 8. EDS анализ показал химический состав сплава, отличный от базового сплава TNM-B1, неравномерное распределение элементов в образце и наличие углерода и азота во включениях.

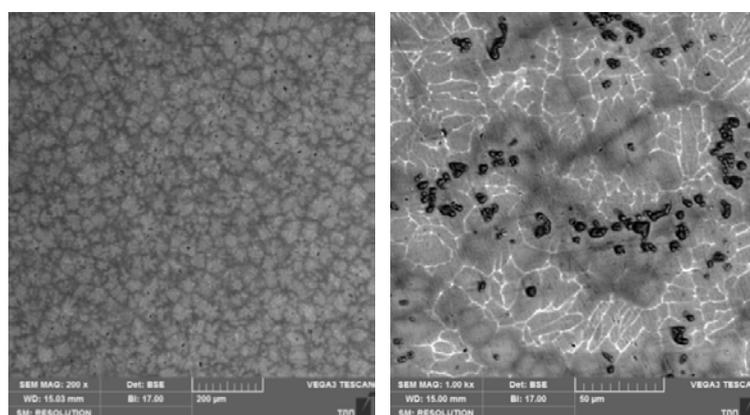
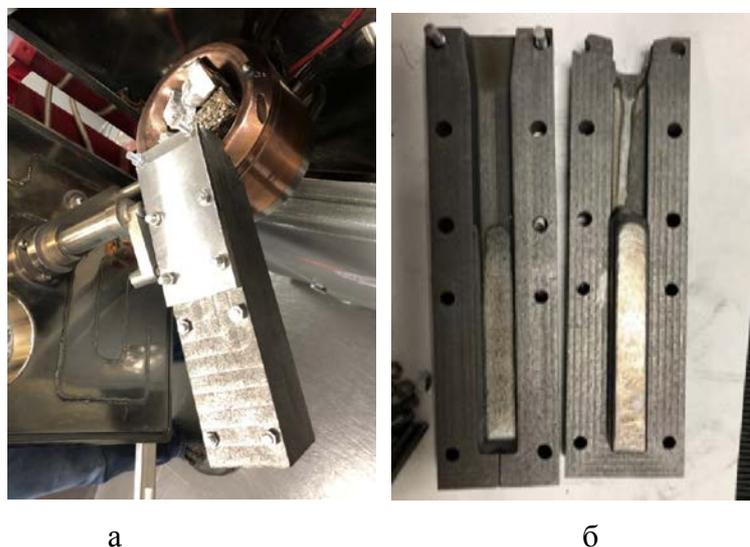


Рисунок 8 – Микроструктура гамма-сплава, плавка с использованием титановой губки ТГ110

В результате корректировки состава шихты и использования иодидного титана удалось получить гамма-сплав, по химическому составу и структуре аналогичный базовому сплаву TNM-B1. При этом была опробована технология изготовления образцов в графитовые формы (Рис. 9). Структура сплава-аналога представлена на рисунке 10. В таблице 2 представлены результаты ESD анализа.



а – установка графитовой формы в печь; б – залитый образец

Рисунок 9 – Использование графитовой формы для литья гамма-сплавов

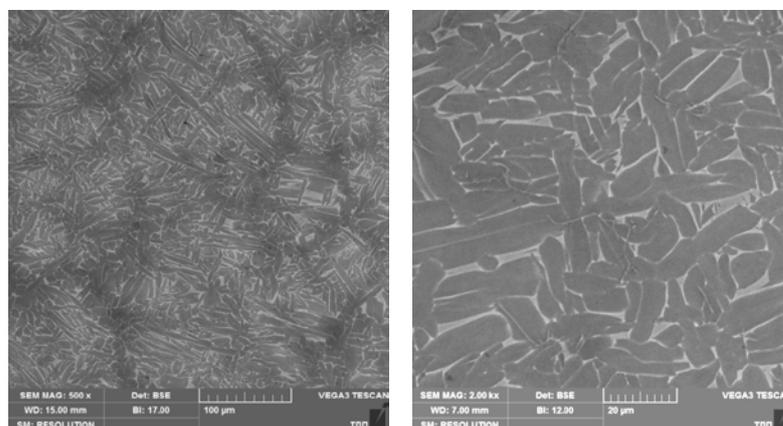


Рисунок 10 – Микроструктура гамма-сплава аналога TNM-B1.

Таблица 2 – Результаты EDS анализа образца гамма-сплава, плавка № 13

Название спектра	Содержание элементов, % масс.				Содержание элементов, % ат.			
	Al	Ti	Nb	Mo	Al	Ti	Nb	Mo
Суммарный спектр карты	28,84	58,9	9,76	2,5	43,99	50,61	4,32	1,07

Проведено сопоставление микроструктуры и механических свойств сплава-аналога и базового сплава TNM-B1 после ГИП и термообработки. Микроструктура сплава-аналога B1 после ГИП и термообработки соответствует базовому сплаву TNM-B1 (Рис. 11, 12).

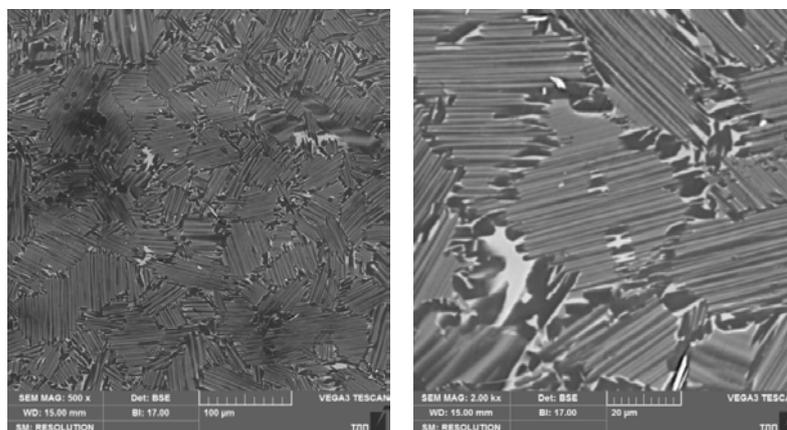


Рисунок 11 – Микроструктура образца сплава-аналога TNM-B1 после ГИП

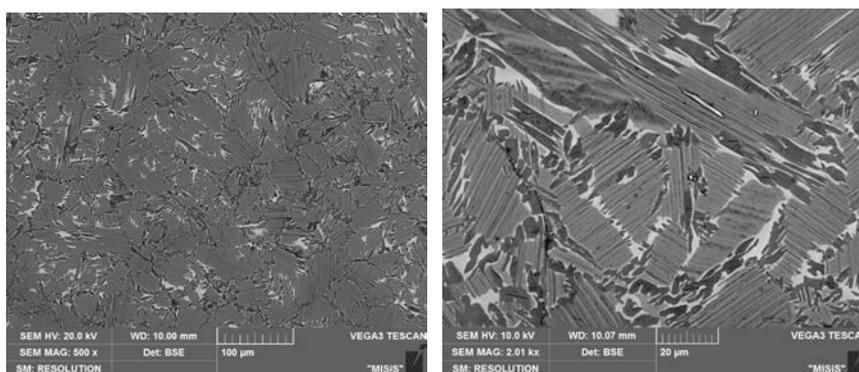


Рисунок 12 – Микроструктура сплава-аналога TNM-B1 после ГИП и термообработки

Результаты исследования механических свойств представлены в таблице 3 и на рисунках 13, 14.

Таблица 3 – Механические свойства сплава-аналога TNM-B1 (состояние «литье+ГИП+ТО»)

№ п/п	№ плавки	№ образца	Предел прочности, МПа
1	13	13-1	591
2	13	13-2	616
3	13	13-3	648
4	17	17-1	591
5	17	17-2	559

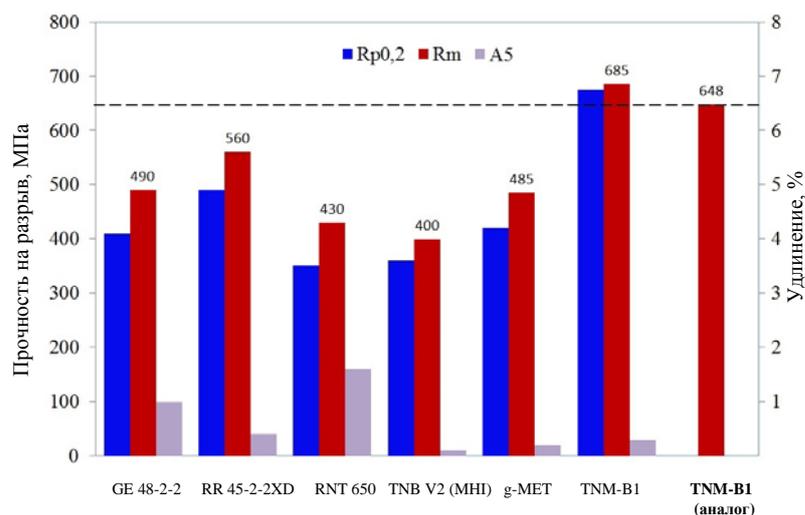
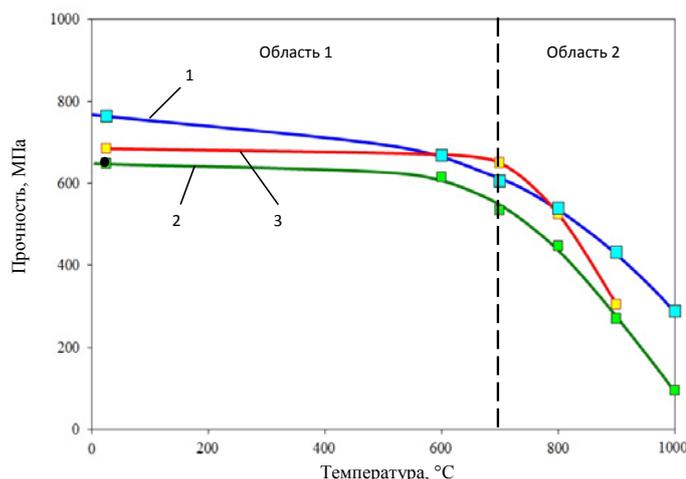


Рисунок 13 – Свойства гамма-сплавов

Максимальный уровень предела прочности сплава-аналога TNM-B (648МПа), полученного с использованием лигатур Al-Mo и Al-Nb, что при комнатной температуре на 5 % ниже базового сплава (685 МПа). Излом хрупкий, имеются участки, свидетельствующие о наличии дефектов в виде трещин. Среднее значение твердости образцов сплава-аналога TNM-B1 после ГИП составляет 434,73 HV10, что на 5 % ниже справочных данных для базового сплава TNM-B1. Исследования структуры и фрактограмм объясняют полученный заниженный уровень характеристик сплава-аналога TNM-B1, который обусловлен наличием в структуре микротрещин, возникших в результате термообработки.



- 1 - условный предел текучести ($\sigma_{0,2}$) при сжатии для сплава-аналога TNM-B1;
- 2 - предел пропорциональности для сплава-аналога TNM-B1;
- 3 - предел прочности при растяжении базового сплава TNM-B1 (по данным GFE [125]);
- - максимальное экспериментальное значение предела прочности на разрыв сплава – аналога TNM-B1 при комнатной температуре.

Рисунок 14 – Температурные зависимости механических свойств для сплава TNM-B1

Учитывая практически нулевое удлинение при испытаниях образцов на растяжение вплоть до температуры 700 °С (Область 1), допустимо оценивать предел прочности материала по его пределу пропорциональности.

Несмотря на общее снижение упруго-силовых параметров материала, вплоть до температуры 600-700 °С, материал остаётся довольно жёстким и прочным. Модуль Юнга при нагреве до 600 °С снизился всего на 21 %, а предел текучести примерно на 13 %, а предел пропорционально остался практически на прежнем уровне.

Полученные данные подтверждают перспективность разработанной технологии получения гамма-сплавов Ti-Al с использованием лигатур Al-Mo и Al-Nb. При этом требуется оптимизация режимов последующей термообработки для получения бездефектной структуры и гарантированного высокого уровня механических свойств.

2.5 Оценка эффективности разработанной технологии изготовления отливок лопаток газотурбинных двигателей из гамма сплавов Ti-Al

Проведена сравнительная оценка эффективности изготовления отливок лопаток компрессора высокого давления (КВД) авиадвигателя традиционной технологией индукционного переплава слитков готового базового сплава TNM-B1 (производство компании GFE, Германия) с заливкой в центробежно-вращающиеся формы и технологии, основанной на совмещении процесса приготовления сплава-аналога TNM-B1 с использованием лигатур Al-Nb и Al-Mo с процессом изготовления отливок по безмодельной технологии методом гравитационного литья в многоцветные графитовые формы.

Производственные плавки проводили на ПАО «ОДК-УМПО», использовалась плавильно-заливочная установка с медным водоохлаждаемым тиглем Consarc. Заливка графитовой формы осуществлялась в дуговой печи Arc200 в лабораторных условиях НИТУ «МИСиС».

Для проведения экспериментов в производственных условиях была разработана конструкция литниково-питающей системы (ЛПС) для центробежного литья лопаток КВД и цилиндрических образцов. Для подтверждения эффективности разработанной ЛПС проведено компьютерное моделирование процессов заполнения литейной формы расплавом и затвердевания отливки в системе ProCast (Рис. 15а). С использованием разработанной конструкции ЛПС на ПАО «ОДК-УМПО» были изготовлены отливки лопаток КВД и образцы для исследования структуры и свойств (Рис. 15б).



а

б

а – результаты моделирования; б – готовые отливки с ЛПС

Рисунок 15 – Разработка ЛПС и изготовление отливок из базового сплава TNM-B1

Значения предела прочности при комнатной температуре для базового сплава TNM-B1, полученного центробежным литьем в керамические формы с последующим ГИП и ТО, находятся в интервале 681 – 715 МПа при среднем значении 699 МПа. При этом минимальное значение получилось меньше заявленного производителем сплава – компанией GFE (700 МПа). Минимальный уровень свойств для отливок из базового сплава TNM-B1, полученных литьем в керамические формы (682 МПа), несколько выше, однако сопоставим с уровнем свойств сплава-аналога при литье в графитовые формы (648 МПа).

Проведено опробование литейной технологии, основанной на совмещении процессов выплавки сплава-аналога TNM-B1 с использованием лигатур Al-Mo и Al-Nb с изготовлением отливки лопатки КВД в многоазовую графитовую форму, изготовленную по безмодельной цифровой технологии. Данный процесс представляется весьма перспективным для его использования в промышленности и, предположительно, может быть реализован в индукционной плавильно-заливочной установке непосредственно в литейном цехе машиностроительного предприятия. При этом в качестве шихтового материала нет необходимости покупать готовый сплав, полученный по традиционной технологии многократного дугового переплава. Учитывая, что в настоящее время поставка гамма-сплавов TNM-B1 возможна только из-за рубежа, что влечет существенное снижение эффективности их применения в России за счет имеющихся ограничений в совокупности с высокой стоимостью, предлагаемая технология видится особенно перспективной для российских предприятий авиационного двигателестроения, и в частности ПАО «ОДК-УМПО».

Проведено компьютерное моделирование процесса заливки графитовой формы расплавом российского аналога сплаву TNM-B1 и затвердевания отливки (Рис. 16а). Выплавка сплава-аналога TNM-B1 с заливкой его в графитовую форму осуществлялось в дуговой печи Arc200 (рисунок 16б, в). В результате были получены лопатки КВД (Рис. 17).

Химический состав и структура сплава лопатки КВД после литья, ГИП и ТО соответствует сплаву TNM-B1. Имеет место повторяемость результатов плавки. Полость литейной формы полностью заполнилась расплавом, геометрия полученной отливки «Лопатка компрессора» соответствует электронной модели. Величина литейной усадки сплава-аналога TNM-B1 составила 1%. Рентген-контроль лопаток также подтвердил соответствие лопаток КВД из сплава-аналога и базового сплава TNM-B1.

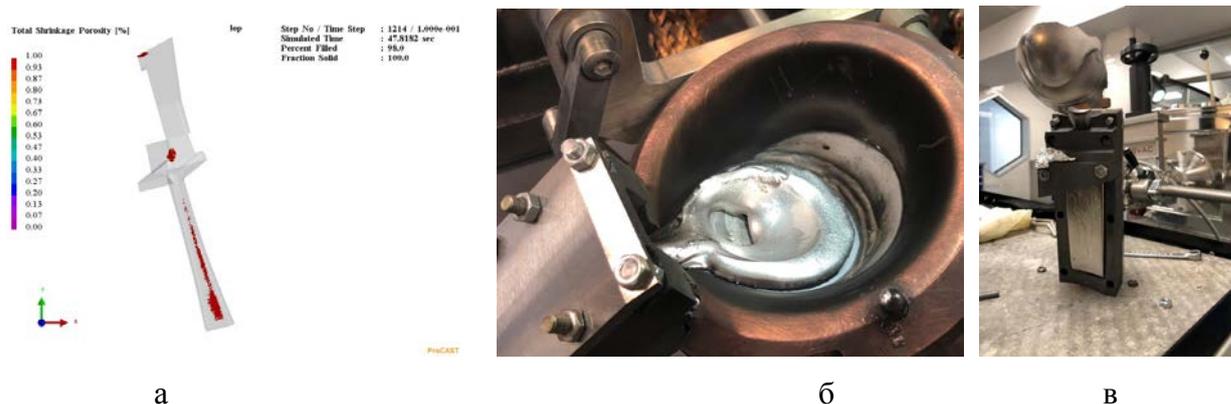
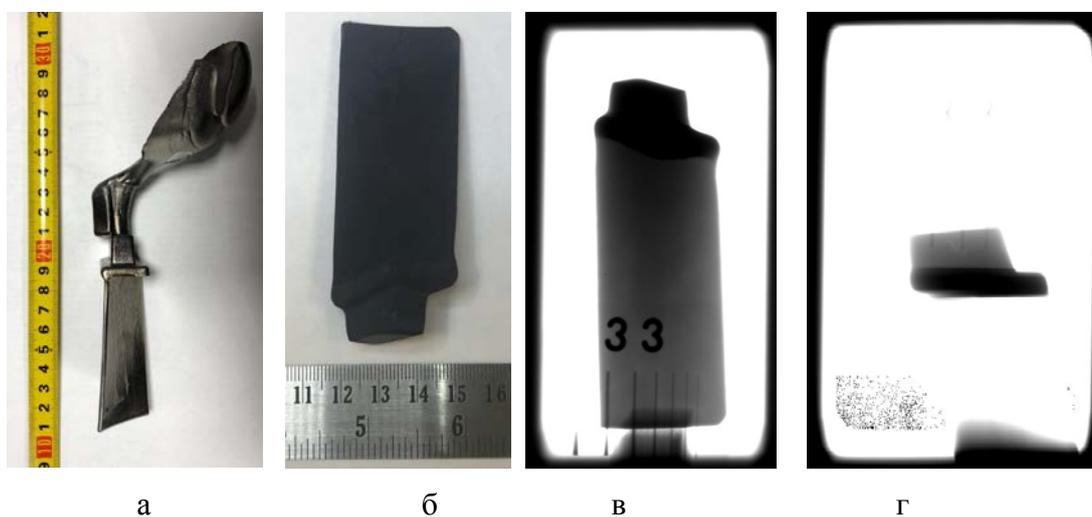


Рисунок 16 – Результаты компьютерного моделирования процесса литья лопатки КВД из аналога сплава TNM-B1
Выплавка сплава-аналога TNM-B1 с заливкой его в графитовую форму



а – отливка с ЛПС; б – после ГИП; в – хвостовик; г - перо

Рисунок 17 – Отливка лопатки КВД авиадвигателя из сплава-аналога TNM-B1 (а,б) и результаты рентген-контроля лопаток КВД (в,г)

Таким образом, использование технологии, предусматривающей совмещение процесса приготовления гамма-сплава типа TNM-B1 с использованием лигатур Al-Mo и Al-Nb и процесса заливки литейных форм, является эффективным.

3. ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Проведен количественный анализ фазового состава для тройных, четверных и пятерных систем в области гамма-сплавов на основе алюминидов титана систем: Ti-Al-X, Ti-Al-X-Y, Ti-Al-Nb-X-Y. Рассчитаны изотермические и политермические сечения тройных, четверных и пятерных систем, по результатам которых можно оценить влияние легирующих элементов на фазовый состав рассматриваемого сплава. Показано, что в тройных системах при 1200 °C на изотермических разрезах появляется трехфазная область; в четверных системах протекает четырехфазная эвтектоидная реакция. Для пятерных систем оценено совместное влияние двух элементов на фазовый состав базового гамма-сплава Ti-45 мол.%Al-5 мол.%Nb.

2. Установлены особенности фазовых трансформаций при равновесной и неравновесной кристаллизации, составы фаз при различных температурах и температуры фазовых переходов в системах Ti-Al-X, Ti-Al-X-Y, Ti-Al-Nb-X-Y. Приведены расчетные значения температур ликвидуса, солидуса и других температур фазовых превращений. Показано, что они сильно различаются в зависимости от состава сплава. Определены составы перспективных гамма-сплавов на основе титана, которые могут быть рекомендованы для дальнейших исследований и применения в качестве российских сплавов-аналогов сплава TNM-B1: Ti-43Al-4Nb-1Mo, Ti-40Al-4Nb-1Mo, Ti-43Al-4Nb-1Mo-1Cr, Ti-43Al-4Nb-1Mo-1Cr-1Zr.

3. Установлено, что для приготовления интерметаллидных расплавов на базе системы Ti-Al вакуумная индукционная плавильно-заливочная установка Consarc с холодным тиглем с электрической мощностью 300-305 кВт не обеспечивает получение заданного химического состава при использовании в составе шихты тугоплавких легирующих металлов в чистом виде. Успешно может использоваться данная установка для изготовления фасонных отливок, когда в качестве шихты применяются слитки готового по химическому составу сплава.

4. Рекомендованы на основании анализа диаграмм состояния Al-Mo и Al-Nb составы лигатуры для получения гамма-сплавов: с содержанием молибдена - 22 % ат (50 % масс), остальное алюминий, температура плавления порядка 1560°C; с содержанием алюминия - 75% ат (46% масс), остальное ниобий, с температурой плавления 1680 °C. Исследования физических свойств лигатур (плотность, теплопроводность, теплоемкость,

электропроводность) позволяют оценить их эффективное использование при приготовлении гамма-сплавов.

5. Установлено, что применение в качестве основы сплавов губчатого титана марки ТГ110 не позволяет получать сплав-аналог TNM-B1 ни по химическому составу, ни по структуре. Причина – загрязненность губчатого титана примесями. В связи с этим в дальнейшей работе для приготовления гамма-сплавов Ti-Al с целью предотвращения загрязнения расплава включениями использовали иодидный титан. В результате впервые был получен гамма-сплав близкий с базовым сплавом TNM B1 по химическому составу и структуре.

6. Установлено, что максимальный уровень предела прочности сплава-аналога TNM-B (648МПа), полученного с использованием лигатур Al-Mo и Al-Nb, при комнатной температуре на 5 % ниже базового сплава (685 МПа). Излом хрупкий, имеются участки, свидетельствующие о наличии дефектов в виде трещин. Среднее значение микротвердости образцов сплава-аналога TNM-B1 после ГИП лишь на 5% ниже справочных данных для базового сплава TNM-B1, которые приводит компания GFE, что говорит о соответствии полученных значений для экспериментального и базового сплавов. При этом достигнутый уровень предела прочности при комнатной температуре превышает свойства всех других известных импортных Ti-Al гамма-сплавов.

7. Показана перспективность разработанной технологии получения гамма-сплавов Ti-Al с использованием лигатур Al-Mo и Al-Nb. Однако требуется дополнительная работа по оптимизации режимов последующей термообработки для получения бездефектной структуры и гарантированного высокого уровня механических свойств.

8. Показана возможность изготовления в производственных условиях ПАО «ОДК-УМПО» на индукционной плавильно-заливочной установке Consarc качественных отливок «Лопатка КВД» литьём в оболочковые керамические формы в поле центробежных сил как из базового сплава TNM-B1, так и его российского аналога,

9. Показана возможность применения многоразовых литейных форм из графита при изготовлении отливок «Лопатка КВД» из российских интерметаллидных титановых сплавов. Предлагаемая технология производства фасонных отливок основана на использовании только российских материалов как для приготовления расплава, так и для изготовления формы, что делает ее полностью импортнезависимой и экономически эффективной.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. Дашкевич Н.И., Белов Н.А., Бельтюкова С.О. Расчетный анализ фазовых диаграмм тройных систем Al–Ti–X в области гамма-сплавов на основе алюминидов титана // Цветные металлы. – 2015. – № 10. – С. 34-42;
2. Белов Н.А., Дашкевич Н.И., Бельтюкова С.О. Расчетно-экспериментальное изучение фазового состава гамма-сплавов системы Ti–Al–Nb–Mo в области температур термообработки // Металлы. – 2015. – № 4. – С.78-86;
3. Акопян Т.К., Дашкевич Н.И., Короткова Н.О., Долбачев А.П. Расчетно-экспериментальные исследования структуры и фазового состава в процессе кристаллизации и при термообработке γ -сплава типа TNM, дополнительно легированного хромом // Цветные металлы. – 2017. – № 5. – С.67-73;
4. Фадеев А.В., Дашкевич Н.И., Белов В.Д. Литые лопатки из интерметаллида титана в конструкциях современных газотурбинных двигателей // Литейщик России. – 2017. – № 12. – С. 6-9;
5. Дашкевич Н.И., Белов В.Д., Павлинич С.П., Фадеев А.В., Аликин П.В. Изготовление отливок из TiAl-сплавов с применением вакуумных плавно-заливочных установок с водоохлаждаемым тиглем // Metallurgy машиностроения. – 2018. – № 2. – С. 9 – 10;
6. Белов Н.А., Белов В.Д., Дашкевич Н.И. Фазовый состав многокомпонентных гамма-сплавов на основе алюминидов титана: учебное пособие/под редакцией Каблова Е.Н. - М: ВИАМ, – 2018. – 348 с.: ил.;
7. Дашкевич Н.И., Белов В.Д., Фадеев А.В. Применение вакуумных плавно-заливочных установок с водоохлаждаемым тиглем для изготовления отливок из интерметаллидных титановых сплавов // Сборник материалов 25-я юбилейная Международная научно-техническая конференция «Литейное производство и металлургия 2017. – Беларусь» // Минск. – 2017. – С. 120-122;
8. Акопян Т.К., Белов Н.А., Дашкевич Н.И. Влияние термической и баротермической обработки на структуру интерметаллидных сплавов типа TNM // Сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции «Фундаментальные и прикладные исследования в области создания литейных жаропрочных никелевых и интерметаллидных сплавов и высокоэффективных технологий изготовления деталей ГТД» (при поддержке РФФИ). – 2017;
9. Дашкевич Н.И., Белов В.Д., Павлинич С.П., Фадеев А.В., Аликин П.В. Изготовление отливок из интерметаллидных титановых сплавов с применением вакуумных плавно-заливочных установок с водоохлаждаемым тиглем // Сборник

материалов X Международной практической конференции «Прогрессивные литейные технологии» // Москва. – 2017. – С. 160-162;

10. Дашкевич Н.И., Белов В.Д., Павлинич С.П., Фадеев А.В., Аликин П.В. Литые лопатки из нтерметаллида титана в конструкциях современных газотурбинных двигателей // Сборник материалов X Международной практической конференции «Прогрессивные литейные технологии» // Москва. – 2017. – С. 163-167.