

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа новых производственных технологий

Направление подготовки Материаловедение и технологии материалов

Отделение школы (НОЦ) Отделение материаловедения

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Исследование интерметаллидов системы Ti-Al, полученных электронно-лучевой аддитивной технологией

УДК 546.3 – 19:669.295.5:004

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ01	Лю Юаньсюнь		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ИФПМ	Ковалевская Ж.Г.	Д.Т.Н., доцент		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОСГН	Гасанов Магеррам Али огль	д.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Антоневич Ольга Алексеевна	К.Б.Н		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
22.04.01 Материаловедение и технологии материалов	Буякова С.П.	Д-р техн. наук, профессор		

Томск – 2022 г.

Планируемые результаты обучения ООП

Код компетенции	Наименование компетенции
Универсальные компетенции	
УК(У)-1	Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий
УК(У)-2	Способен управлять проектом на всех этапах жизненного цикла
УК(У)-3	Способен организовывать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной цели
УК(У)-4	Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном языке, для академического и профессионального взаимодействия
УК(У)-5	Способен анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия
УК(У)-6	Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки
Общепрофессиональные компетенции	
ОПК(У)-1	Способен решать производственные и/или исследовательские задачи, на основе фундаментальных знаний в области материаловедения и технологии материалов
ОПК(У)-2	Способен разрабатывать научно-техническую, проектную и служебную документацию, оформлять научно-технические отчеты, обзоры, публикации, рецензии
ОПК(У)-3	Способен участвовать в управлении профессиональной деятельностью, используя знания в области системы менеджмента качества
ОПК(У)-4	Способен находить и перерабатывать информацию, требуемую для принятия решений в научных исследованиях и в практической технической деятельности
ОПК(У)-5	Способен оценивать результаты научно-технических разработок, научных исследований и обосновывать собственный выбор, систематизируя и обобщая достижения в

	области материаловедения и технологии материалов, смежных областях
Профессиональные компетенции	
ПК(У)-1	Способен обоснованно (осмысленно) использовать знания основных типов металлических, неметаллических и композиционных материалов различного назначения, в том числе наноматериалов для решения профессиональных задач.
ПК(У)-2	Способен осуществлять рациональный выбор материалов и оптимизировать их расходование на основе анализа заданных условий эксплуатации материалов, оценки их надежности, экономичности и экологических последствий применения
ПК(У)-3	Способен осуществлять анализ новых технологий производства материалов и разрабатывать рекомендации по составу и способам обработки конструкционных, инструментальных, композиционных и иных материалов с целью повышения их конкурентоспособности
ПК(У)-4	Способен планировать и осуществлять экспериментальные исследования, анализировать и обрабатывать их результаты, делать выводы, составлять и оформлять отчеты по проведенным исследованиям
ПК(У)-5	Способен выполнять перевод технической литературы на иностранном языке, связанной с профессиональной деятельностью в области материаловедения
ПК(У)-6	Способен определять соответствие готового изделия заявленным потребительским характеристикам; прогнозировать и описывать процесс достижения заданного уровня свойств в материале
ПК(У)-7	Способен организовать проведение анализа и анализировать структуру новых материалов, адаптировать методики исследования свойств материалов к потребностям производства и разрабатывать специальные методики
ПК(У)-8	Способен моделировать процессы обработок и прогнозировать результаты их осуществления при различных режимах, в использовании стандартных пакетов компьютерных программ и средств автоматизированного проектирования

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа новых производственных технологий
 Направление подготовки (специальность) Материаловедение и технологии материалов
 Отделение школы (НОЦ) Отделение материаловедения

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП

 О.Ю.Ваулина
 (Подпись) (Дата)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

магистерской диссертации

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
4БМ01	Лю Юаньсюеь

Тема работы:

Исследование интерметаллидов системы Ti-Al, полученных электронно-лучевой аддитивной технологией

Утверждена приказом директора ИШНПТ	Приказ № _____ от _____
-------------------------------------	-------------------------

Срок сдачи студентом выполненной работы:	10.06.2022
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Объектом исследования была проволока Al и Ti, а так же образцы интерметаллидов Al-Ti, полученных полученных электронно-лучевой аддитивной технологией</p>
<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования,</i></p>	<p>Изучение литературных источников с целью выяснение достижений мировой науки в области аддитивных технологий: получения изделий из интерметаллида Al-Ti электронно-лучевой аддитивной технологией. Актуальность работы и постановка задачи; метод получения и исследования обхекта исследования; анализ результатов выполненной работы; заключение.</p>

<p><i>конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	
<p>Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)</p>	<p>Презентация в Microsoft PowerPoint</p>
<p>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы (с указанием разделов)</p>	
<p>Раздел</p>	<p>Консультант</p>
<p><i>Финансовый менеджмент...</i></p>	<p>М. А. Гасанов, профессор, К №19, офис 303</p>
<p><i>Социальная ответственность</i></p>	<p>О.А. Антоневиц, Доцент, К № 8, офис 136</p>
<p>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</p>	
<p>Основная часть, Литературный обзор, оборудование и методы исследования, Результаты исследования, Финансовый менеджмент, Ресурсоэффективность и Ресурсосбережение, социальная ответственность – русский язык.</p>	
<p>На иностранном языке выполнены следующие разделы диссертации</p>	
<p>Литературный обзор</p>	

<p>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</p>	
--	--

Задание выдал руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ИФПМ	Ковалевская Ж.Г.	Д.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ01	Лю Юаньсюнь		

РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация содержит 120 с., 46 рисунков, 11 таблиц, 52 источники.

Ключевые слова: TiAl, электронно-лучевая технология, микроструктура, микротвердость.

Объектом исследования является проволоки алюминия и титана, и образцы интерметаллида титана и алюминия, полученные электронно-лучевым сплавлением.

Цель работы было исследование процесса формирования интерметаллидов титана и алюминия методом электронно-лучевым сплавлением, режимов механические свойства полученного материала и анализ структуры и механических свойств образцы.

В процессе исследования проводились найти подходящий режим работы, получить образцы, обработка полученного образца чтобы смотрены под микроскопом, и измерение микротвердости образца.

В результате исследований описано трое образцы TiAl, полученный EBM, выбор режим селективного электронно-лучевого сплавления образцов, исследование их структуры и механические свойства.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: аддитивное производство, на основе проволоки алюминия и титана, быстрое производство.

Степень внедрения: внедрение в производство не осуществлено

Область применения: Авиационная и автомобильная промышленность

Оглавление

РЕФЕРАТ	9
Введение	14
1. Литературный обзор	16
1.1. Интерметаллиды титан-алюминий	16
1.1.1. Сферы использования	17
1.1.2. Строение и свойства	20
1.1.3. Способы получения	28
1.2. Особенности строения интерметаллидов, полученных аддитивными технологиями	29
1.2.1. Селективная электронно-лучевая плавка	30
1.2.2. Строение получаемых изделий	33
1.2.3. Строение алюминидов титана после SEBM	39
2. Оборудование и методы исследования	44
2.1. Оборудование электронно-лучевого принтера	44
2.2. Методы исследования	48
2.2.1. Наблюдение за микроструктурой	49
2.2.2. Рентгеноструктурный анализ	50
2.2.3. Измерение микротвердости	50
3. Результаты исследований	52
3.1. Получение образцов и выбор режимов наращивания	52
3.1.1. Получение треков	52
3.1.2. Получение монослоев	54
3.1.3. Получение 3D образцов	56

3.2. Исследование строения полученных образцов и влияние на строение режимов ЕВМ.....	57
3.2.1. Микроструктура полученных образцов	58
3.2.2. Фазовый состав полученных образцов	65
3.3. Оценка механических свойств	68
ВЫВОДЫ	76
4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	80
4.1. Введение.....	80
4.2. Анализ конкурентных техничкских решений с позиции рескрсоэффктивности и ресурсосбережения.....	80
4.3. SWOT – анализ	82
4.4. Оценка готовности проекта к коммерциализации	85
4.5. Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования.....	86
4.6. Инициация проекта.....	86
4.7. Цели и результат проекта.....	86
4.8. Ограничения и допущуния проекта	89
4.9. Расчет затрат.....	90
4.9.1. Расчет затрат на мателталы	90
4.9.2. Расчет затрат на оборудование.....	91
4.9.3. Расчет заработной платы	92
4.9.3.1. Основная заработная плата	92
4.9.3.2. Дополнительная заработная плата исполнителей темы	94
4.9.4. Отчисления на социальные нужны	94

4.9.5. Накладные расход.....	95
4.9.6. Бюджетная стоимость НИР	95
4.9.7. Организационная структура проекта	96
4.9.8. План управления коммуникациями проекта	96
4.9.9. Реестр рисков проекта.....	97
4.10. Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.....	98
4.10.1. Интегральный показатель финансовой эффективности	98
4.10.2. Интегральный показатель ресурсоэффективности	99
4.10.3. Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки	99
5. Социальная ответственность	104
5.1. Введение.....	104
5.2. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности..	105
5.2.1. Эргономические требования к правильному расположению и компоновке рабочей зоны.....	105
5.3. Производственная безопасность	106
5.3.1. Анализ опасных и вредных производственных факторов.....	106
5.3.1.1. Отклонение показателей микроклимата	106
5.3.1.2. Привышения уровня шума	108
5.3.1.3. Недостатки или отсутствия естественного света.	
Недостаточная освещенность рабочей зоны.	109
5.3.1.4. Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека	111

5.4. Экологическая безопасность	112
5.5. Безопасность в чрезвычайных ситуациях	113
Вывод	115
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	116
Приложение II	129

Введение

Аддитивными технологиями называют технологии, изготовление изделий по данным цифровой модели, методом послойного внесения расходного материала. Аддитивные технологии на сегодняшний день быстроразвивающаяся отрасль промышленного производства [1]. Широкое использование аддитивные технологии получили в машиностроении, в аэрокосмической и медицинской областях. Именно эти сферы наиболее привлекательны для применения аддитивных технологий, так как используют небольшие по объемам производства, количество изделий с широкой номенклатурой. Все это позволяет использовать эти новые технологии с наибольшим выигрышем с точки зрения экономии денежных средств [2].

Особое внимание уделяется таким перспективным методам аддитивного изготовления трехмерных металлических изделий, как электронно-лучевая наплавка проволоки. В этом случае появляется возможность в процессе наращивания изделия из проволоки отдельных компонентов формировать сплавы сложного состава или интерметаллиды.

Целью данной работы было исследование процесса формирования интерметаллидов из проволоки алюминия на титановой подложке методом электронно-лучевой аддитивной технологии. А так же оценка строения и свойств получаемого материала.

В работе были поставлены следующие задачи:

1. Выбрать режимы электронно-лучевой аддитивной технологии, обеспечивающие формирование компактного материала.

2. Исследование строения и влияние режимов на строение образцов.
3. Оценить электронно-лучевой аддитивной технология на строение образцов, полученных электронно-лучевой аддитивной технологией.
4. Исследование физико-механических свойства полученных образцов, полученных электронно-лучевой аддитивной технологией.

1. Литературный обзор

1.1. Интерметаллиды титан-алюминий

Современная цивилизация стремительно развивается благодаря широкому использованию металлических сплавов. Металлические сплавы обладают превосходными свойствами и легко обрабатываются в различные детали, и при этом имеют достаточную прочность. Но в настоящее время рабочее оборудование используется во все более жестких условиях (высокая температура, агрессивные среды), а имеющиеся материалы уже не в состоянии удовлетворить потребности людей.

Интерметаллиды представляют собой уникальный класс материалов, которые сохраняют упорядоченную структуру вплоть до температуры плавления. Дальний порядок обеспечивает более сильную межатомную связь. Интерметаллиды существуют в определенных, довольно узких диапазонах составов и имеют простое стехиометрическое соотношение. При отклонении состава от стехиометрического соотношения структура может стать менее упорядоченной [1, 2].

Недавние исследования новых высокотемпературных конструкционных материалов повысили интерес к интерметаллидам, так как они демонстрируют хорошие высокотемпературные свойства из-за своего дальнего порядка. Упорядоченная структура снижает подвижность дислокаций и более эффективно предотвращает процессы диффузии при повышенных температурах [3].

Интерметаллиды обладают прекрасными свойствами: высокая прочность, которая не деградирует с возрастанием температуры; аномальная зависимость

предела текучести, наблюдаемая в некоторых интерметаллидах; низкая и очень низкая плотность интерметаллидов на основе Al, Ti, Si, что приводит к высокому отношению прочности к плотности; высокие модули упругости, причем с ростом температуры они уменьшаются медленнее, чем в разупорядоченных сплавах; высокая стойкость к окислению, которую имеют интерметаллиды с высоким содержанием Al; низкие коэффициенты диффузии и в результате более низкая скорость ползучести, рекристаллизации и коррозии [1-4].

Замечательный баланс свойств обнаружен у алюминидов титана. Это способствовало разработке сплавов на их основе, предназначенных для использования в качестве легких высокотемпературных материалов. Содержание алюминия в этих сплавах составляет широкий диапазон, предназначенный для улучшения их характеристик [5-7].

1.1.1. Сферы использования

Алюминиды титана обладают следующими превосходными свойствами: высокая температура плавления, низкая плотность, высокие модули упругости, возрастание предела текучести (для TiAl) с повышением температуры, стойкость к окислению и возгоранию, высокое соотношение прочность/плотность, жаропрочность — все это создает благоприятные условия для применения этих материалов для авиакосмических двигателей нового поколения [8-11]. Вот почему ученые сейчас очень любят использовать его в аэрокосмической области [12].

Перспективность использования материалов на основе алюминидов титана расширяется в связи с развитием работ по созданию нового поколения

гиперзвуковых воздушно-космических летательных аппаратов, причем рассматривается применение их как в элементах обшивки, так и в конструкциях реактивных двигателей. Фольгу из алюминидов титана Ti_3Al используют для изготовления активно-охлаждаемых сотовых панелей обшивки, многослойных полых легких валов в ракетной технике и т. д. Предполагается применение алюминидов титана в монолитном виде для элементов корпусов компрессоров, турбин, лопаток, камер сгорания, диффузоров и сопел двигателей. Применение деталей из интерметаллидов титана в газотурбинном двигателе взамен применяемых материалов снизит общую массу двигателя и увеличит его тяговооруженность, т.е. отношение тяги к весу [12].

Несколько перспективных деталей для применения отливок из алюминидов титана в авиационном двигателе схематически показаны на рисунке 1.1 [12].

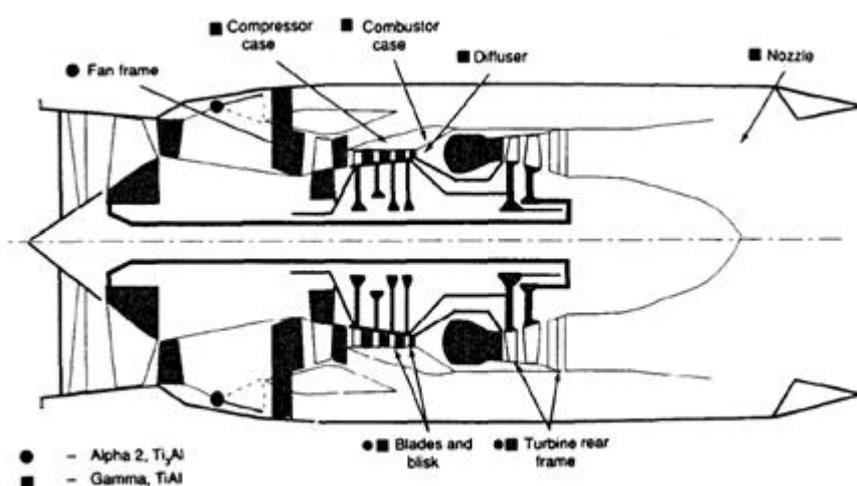


Рисунок.1.1 – Области применения монолитных деталей из алюминидов титана в авиационном двигателе [12]

Алюминиды титана могут широко применяться в транспортном машиностроении (двигателе- и автомобилестроение). В частности, для

производства клапанов и рабочих колес агрегатов турбонадува в дизельных и поршневых двигателях, что обеспечивает высокую надежности эксплуатационную стойкость конструкций. Также алюминид TiAl может применяться в газо- и нефтеперерабатывающих установках химической промышленности и в атомном машиностроении, где требуются специфические характеристики – коррозионная стойкость и стойкость к разбуханию под действием излучения [10].

Демонстрацию возможности применения этих сплавов в обычных топливных двигателях планируется провести для двигателей ИНРТЕТ (Integrated High Performance Turbine Engine Technology). Несколько деталей двигателя, прошедших испытания в GEAE (GE Aircraft Engines), были изготовлены из сплава α_2 -Ti₃Al. Две детали, изготовленные из сплава α_2 -Ti-24Al-11Nb, показаны на рисунке 1.2. [12].

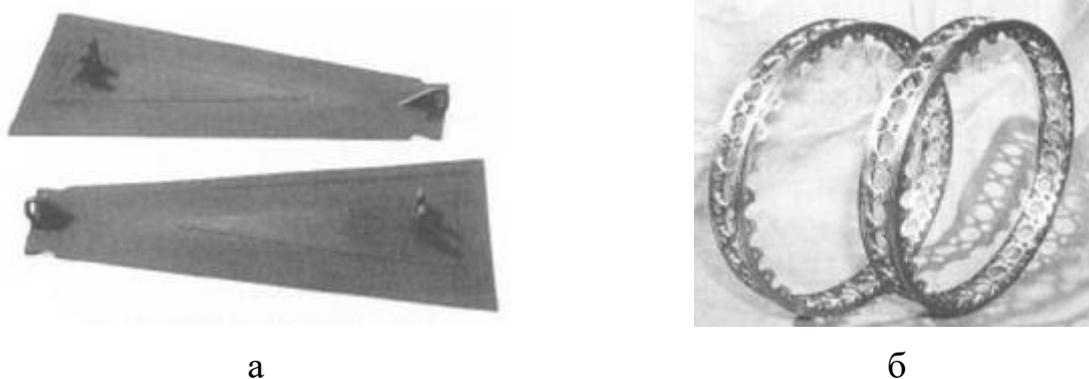


Рисунок 1.2 – Первичное выхлопное уплотнение из α_2 алюминида титана F404 (а), опорное кольцо турбины высокого давления, изготовленное из α_2 алюминида титана GE29 (б) [12]

1.1.2. Строение и свойства

Фазовая диаграмма Ti-Al содержит много различных интерметаллических соединений, таких как Ti_3Al , $TiAl$, $TiAl_2$ и $TiAl_3$ (рисунок 1.3) [13].

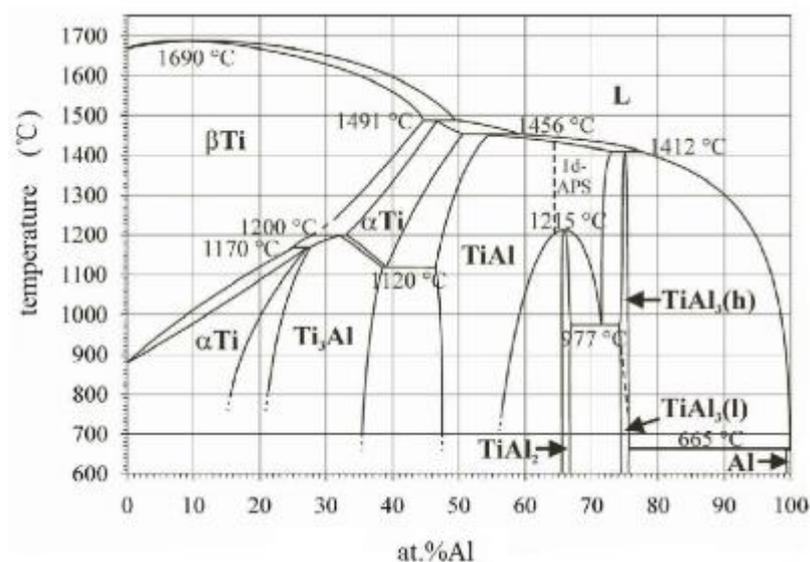


Рисунок 1.3 – Диаграмма состояния Ti-Al [13]

В первую очередь интерес вызвали два интерметаллида – α_2-Ti_3Al и $\gamma-TiAl$, из-за того, что они обладают потенциалом, запрашиваемых для удовлетворения конструктивных требований, предъявляемых к предполагаемым областям применения [11].

Интерметаллид α_2-Ti_3Al

Тип решетки у α_2-Ti_3Al гексагональный плотноупакованный (ГПУ) (рисунок 1.4) [7]. Фаза α_2-Ti_3Al имеет решетку, близкую к решетке α -фазы, и имеет отличие – упорядоченное расположение атомов титана и алюминия. Ионы алюминия в решетке имеют общие связи с ионами титана, которые находятся

относительно них в положениях ближайшего соседа. Данная решетка может быть представлена как совокупность четырех взаимопроникающих подрешеток, три из которых содержат атомы Ti, а одна - атомы Al. Плотность алюминида Ti₃Al равна 4,20 г/см³ [14].

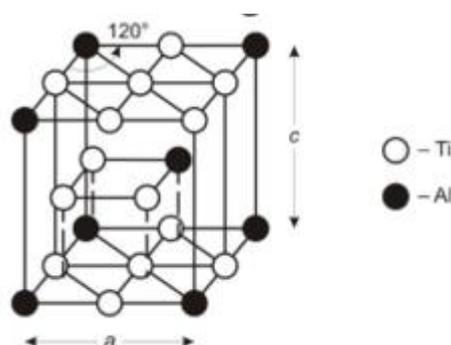


Рисунок 1.4 – Кристаллическая структура соединения Ti₃Al [7]

Область гомогенности алюминида титана Ti₃Al при комнатной температуре находится в пределах от 15 до 23 мас. % Al и сохраняет упорядоченную структуру до температуры 1090°C. Периоды решетки α₂-фазы: $a\alpha_2 = 2a$; $c\alpha_2 = ca$ ($a\alpha_2 = 0,577$ нм; $c\alpha_2 = 0,460$ нм; $c/a = 0,797$) [15].

Пластичность интерметаллида Ti₃Al низкая. Это связано с ограниченным количеством систем скольжения (меньше пяти). Деформация кристалла осуществляется преимущественно путем скольжения по плоскости {1010}. При нагреве за счет повышения подвижности дислокаций пластичность интерметаллида возрастает до 10-20 %. Для одной из систем скольжения монокристаллического Ti₃Al характерна аномальная температурная зависимость предела текучести. Проявляющаяся в том, что при нагреве материала его прочность непрерывно возрастает [10].

Ниже представлена микроструктура сплава Ti-25Al-7.5Nb с α₂-морфологией [11]. На рисунке 1.5 представлена структурная трансформация из

высокотемпературной β -фазы в виде: равноосной микроструктуры с большой объемной долей первичной α_2 -фазы (a), микроструктуры с малообъемной долей первичной α_2 -фазы в матрице, имеющую Видманштеттову структуру (b), грубая микроструктура, созданная путем преобразования из Видманштеттовой структуры (c), и тонкая микроструктура, преобразованная из Видманштеттовой структуры (d).

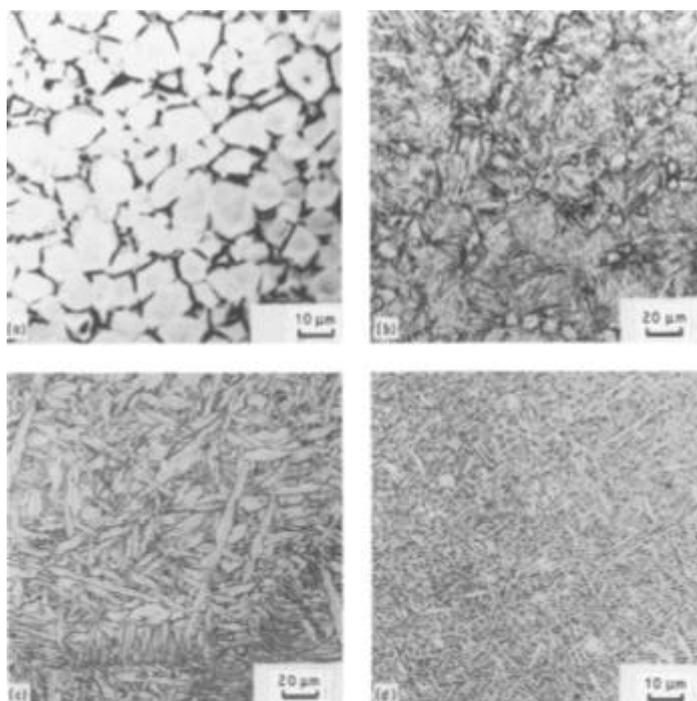


Рисунок 1.5 – Микроструктуры, созданные в сплаве Ti-25Al-7.5Nb путем трансформации из β -фазы: равноосная микроструктура с большой объемной долей первичной α_2 -фазы (a), малообъемная доля первичной α_2 -фазы в матрице, преобразованной в Видманштетт (b), грубая микроструктура, преобразованная в Видманштетт (c), и тонкая микроструктура, преобразованная в Видманштетт (d) [11]

Малый размер зерна α_2 -фазы увеличивает прочность за счет снижения длины скольжения и улучшает пластичность, за счет либо размера зерна, либо аллотропического изменения, или выделения частиц второй фазы [11].

Механические свойства интерметаллида Ti_3Al при комнатной температуре сильно зависят от количества примесей, характеристик микроструктуры, размера морфологии зерна. Поэтому механические свойства интерметаллида Ti_3Al изменяются в широких пределах: $\sigma_v = 220-600$ МПа, $\delta = 0-0,5$ %. Модули упругости в меньшей степени зависят от указанных выше факторов: $E \approx 140$; $G \approx 52,5$ ГПа. Механические свойства алюминида Ti_3Al могут быть улучшены легированием [16,17]. Наилучшие результаты дает легирование алюминида Ti_3Al ниобием, поэтому система Ti_3Al-Nb является основной при разработке сплавов на его основе [10].

Интерметаллид $\gamma-TiAl$

Алюминид $\gamma-TiAl$ имеет упорядоченную тетрагонально-искаженную гранецентрированную решетку, в которой слои, упакованные атомами титана, чередуются со слоями, занятыми атомами алюминия (рисунок 1.6). Периоды решетки γ -фазы: $a = 0,3984-0,3949$ нм; $c = 0,4065-0,4089$ нм; $c/a = 1,020-1,035$. Периоды решетки и соотношение c/a возрастают с увеличением содержания алюминия. Плотность алюминида $TiAl$ составляет $3,76$ г/см³ [14].

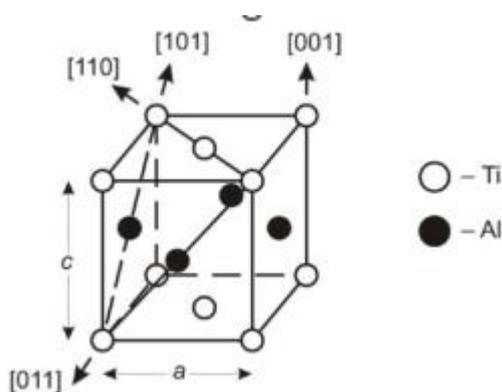


Рисунок 1.6 – Кристаллическая структура соединения $TiAl$ [7]

В γ -TiAl с концентрацией Al в пределах 46-52 ат. % микроструктура обычно состоит либо из однофазной микроструктуры чистой γ -фазы, либо из двухфазной системы, содержащей смесь между γ -фазой и α_2 -фазой [18]. Эти однофазные и двухфазные системы объединяются для создания различных характерных микроструктур, имеющих в материале. Различные микроструктуры, которые появляются в γ -TiAl, являются ламеллярными, околослабными, дуплексными, псевдодуплексными и равноосными (рисунок 1.7) и зависят от термической обработки, применяемой в каждом конкретном случае, и скорости охлаждения [7].

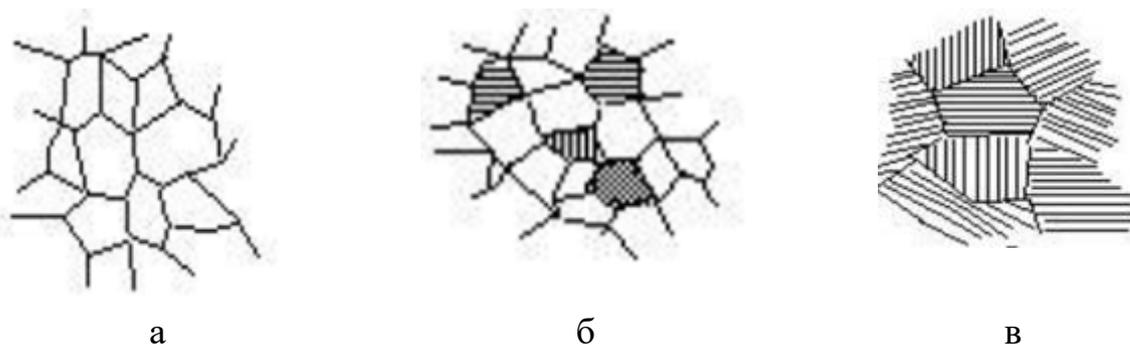


Рисунок 1.7 – Очевидные микроструктуры в γ -алюминиде титана: равноосные кристаллы (а), дуплексная (б) и ламеллярная структура (в) [7]

Равноосная микроструктура состоит из одной γ -фазы (рисунок 1.7а). Ее механические преимущества заключаются в том, что γ -TiAl имеет высокий модуль упругости и улучшенные высокотемпературные свойства при низкой плотности. Недостатками являются его плохие свойства при комнатной температуре, такие как вязкость разрушения и пластичность. Данная микроструктура очень хрупкая и поэтому не желательна для применения в конструкциях [14].

Ламеллярная микроструктура состоит из чередующихся γ и α_2 пластин, укладываемых в ламели и образующих пластинчатые зерна (рисунок 1.7в). Известно, что пластинчатая структура более пластична, чем равноосная, это обусловлено расстоянием, образовавшимся между ламельными пластинами. В местах соприкосновения ламелей образуются двойники и дислокации. Двойникование и дислокации повышают прочность при высоких температурах, вязкость разрушения и сопротивление ползучести. По имеющимся данным, пластинчатая микроструктура с очень мелкими зёрнами обладает высокими механическими свойствами. Размер зёрна должен быть в диапазоне 10-30 мкм, чтобы обеспечить достаточную пластичность [14].

Дуплексная структура представляет собой смесь равноосных γ -зёрен и ламеллярных колоний (рисунок 1.7 б). TiAl, содержащий как равноосную, так и ламеллярную микроструктуру, комбинирует механические свойства обеих микроструктур. Дуплексная микроструктура не может формироваться непосредственно из литого материала. Во-первых, в материале должно присутствовать правильное количество Al, поскольку дуплексная микроструктура содержит как γ , так и $\gamma+\alpha_2$ фазы. Эти две фазы на фазовой диаграмме сосуществуют в составе 45 - 51 ат. %. Во-вторых, материал должен быть подвергнут термической обработке.

Механические свойства, включая эксплуатационные, во многом определяются типом и параметрами структуры. Крупнозернистые полностью или почти полностью пластинчатые структуры обеспечивают сравнительно высокие вязкость разрушения и сопротивление ползучести, но малую пластичность и прочность, особенно при комнатной температуре.

Мелкозернистая равноосная почти однофазная γ -структура и дуплексная микроструктура с небольшим количеством пластинчатых колоний приводят к снижению вязкости разрушения и малому сопротивлению ползучести, но обеспечивают удовлетворительную пластичность и прочность на растяжение при комнатной температуре. Наилучшей будет мелкозернистая пластинчатая структура, которая обеспечивает наиболее высокий комплекс механических свойств. Эта структура будет иметь размер зерна 50-400 мкм, границы зерен зубчатого строения и соотношение α_2 - и γ -пластин на уровне 1:4 [14].

Предел прочности сплавов на основе TiAl составляет в диапазоне от 450 до 800 МПа. Данные значения меньше чем предела прочности сплавов на основе Ti₃Al. Сплавы на основе TiAl характеризуются высоким сопротивлением ползучести и окислению. Одновременно данные сплавы обладают хорошим относительным удлинением образцов при комнатной температуре. Монокристаллический алюминид титан TiAl имеет высокие характеристики при нагружении в диапазоне температур около 700°C. Пластическая деформация γ -фазы обусловлена перемещением одиночных дислокаций и сверхдислокаций. Хрупкое разрушение интерметаллида при низких температурах связано с малой подвижностью дислокаций. Прочность материала определяется подвижностью дислокация. При повышении температуры подвижность дислокаций возрастает. Как и для сплавов на основе Ti₃Al, предел текучести зависит от температуры [14].

В зависимости от чистоты и микроструктуры механические свойства интерметаллида TiAl меняются в довольно широком диапазоне и при комнатной температуре имеют значения: $\sigma_v = 350-580$ МПа, $\delta = 0,5-1,5$ %. Модули упругости алюминида TiAl при 20°C равны: $E = 175$ ГПа, $G = 67$ ГПа [10].

Сравнение сплавов алюминидов титана с обычными сплавами на основе титана и никеля сплавы показаны в таблице 1.1 [11].

Таблица 1.1

Сравнение титановых алюминидов с титановыми сплавами и суперсплавами [11]

Свойство	Ti сплавы	α_2 -Ti ₃ Al	γ -TiAl	Суперсплавы
Плотность, г/см ³	4.54	4.84	4.04	8.3
Модуль Юнга, ГПа	96-100	100-145	160-176	206
Предел текучести σ_T (yield strength), МПа	110	145	176	207
Предел прочности σ_B (tensile strength, UTS), МПа	480-1200	800-1140	450-800	-
Температура ползучести, °С	540	730	900	1090
Температура окисления, °С	590	705	815	1090
Пластичность при комнатной температуре, %	15	2-4	1-3	3-10
Пластичность при высокой температуре, %	15	5-12	5-12	10-20

В современном производстве обычно применяются два класса сплавов на основе алюминидов титана, которые имеют название α_2 -сплавами и γ -сплавами [19, 20]. Первый включает в себя смесь α_2 - и β -фаз, а второй - смесь γ - и α_2 -фаз. Основные характерные свойства, полученные в последнее время в сплавах, приведены в таблице 1.2 [12].

Таблица 1.2

Основные свойства сплавов на основе алюминидов титана [12]

α_2 -сплавы	γ -сплавы
При комнатной температуре $\sigma_B = 1100$ МПа, δ до 6 %	При комнатной температуре $\sigma_B = 620$ МПа, $\delta = 3$ %
При температуре 760°С $\sigma_B = 620$ МПа	При температуре 760°С $\sigma_B = 550$ МПа

	При температуре 870°C $\sigma_B = 380$ МПа
Хорошая устойчивость к окислению	Отличная устойчивость к окислению
	Более огнеупорный, чем обычные титановые сплавы

1.1.3. Способы получения

Алюминиды титана являются коммерческими материалами. Для их получения исследуются и применяются различные способы производства. Традиционные методы производства используются с затруднением. Это обусловлено низкой пластичностью интерметаллидов.

Традиционно получения сплава включает индукционную плавку, вакуумную дуговую переплавку и плазменную плавку. Далее применяются традиционные методы производства заготовок, такие как литье, ковка или порошковая металлургия, но все они сопровождаются трудностями, требующими преодоления [10,21].

Реальные технологические маршруты промышленного производства включают литье слитков, штамповку и ковку, производство листов горячей прокаткой, переработку порошковой металлургии, а также центробежное литье или литье по выплавляемым моделям [10,22,23]

Оценка состояния и полезность различных методов обработки алюминидов титана показана в таблице 1.3.[12].

Таблица 1.3

Возможности обработки алюминидов титана

Тип материала	Металлургия слитков	Ковка	Прокатка листа	Литье
Ti сплавы	да	да	да	да

α_2 -сплавы	да	да	да, но сложно	ограниченно
γ -сплавы	да, но сложно	да, но сложно	да, но сложно	да

Одним из видов производства интерметаллидов, который в последнее время привлекает к себе внимание, являются аддитивные технологии [24-27].

1.2. Особенности строения интерметаллидов, полученных аддитивными технологиями

Если ранее для изготовления деталей из интерметаллидов использовали стандартные технологии, то в последние годы передовые производства по всему миру занимаются разработкой методов построения деталей с помощью аддитивных технологий [24-27].

Аддитивное производство – это создание тела объектов за счет наращивания необходимого материала, а не снятия лишнего. Термин «аддитивное производство» описывает технологию по формированию объектов за счет укладки последовательных слоев материала. Детали, изготовленные аддитивным методом, могут применяться на первом этапе производства для изготовления опытных образцов – быстрое прототипирование и на втором этапе производства готовых изделий – быстрое производство [28-33].

Один из самых распространенных методов аддитивного производства – это спекание порошковых материалов в выбранной зоне. Слои модели спекаются в тонком слое порошкообразного материала, после чего рабочая платформа опускается и наносится новый слой порошка. Процесс повторяется до получения готового изделия. Несплавленный порошок остается в рабочей камере и служит для поддержки нависающих частей получаемой детали не требуя создания

специальных опор. Другой вариант аддитивного производства – использование присадочной проволоки в качестве образующего материала [29].

Существует три основных источника энергии для сплавления порошка или проволоки: лазер, электронный луч и дуговая плазма. Все методы аналогичны [29-31].

Электронно-лучевая плавка или electron beam melting (EBM) широко используется как аддитивный метод получения металлических изделий из титановых сплавов [34-37]. Поскольку титан химически активный металл, электронно-лучевые технологии представляются очень перспективными для разработки технологии прототипирования деталей из сплавов титана. Детали, полученные EBM, отличаются высокой плотностью и, соответственно, высокими прочностными характеристиками [29, 38].

1.2.1. Селективная электронно-лучевая плавка

Селективная электронно-лучевой плавка (SEBM) основана на современной концепции материаловедения, которая начинается с 3D модели детали для автоматизированного проектирования (CAD). CAD-модель нарезается программным обеспечением слоями в соответствии с определенной толщиной, так что трехмерные данные формы объединяют серию двухмерных данных суперпозиции, а затем в соответствии с информацией о форме каждого слоя через систему формовки с ЧПУ. Затем, в соответствии с информацией о форме каждого слоя, формирующий материал (например, порошок, полоса, пластина и т.д.) расплавляется и укладывается слой за слоем, управляя

электронным пучком, чтобы в конечном итоге получить спроектированный произвольной сложной формы, структуры и определенных функций детали [35].

Порошковая SEBM-технология создает монолитные детали путем селективного плавления порошка послойно. Электронно-лучевая установка содержит три части: электронно-лучевая пушка; источник питания; строительный резервуар (рисунок 1.8) [41].

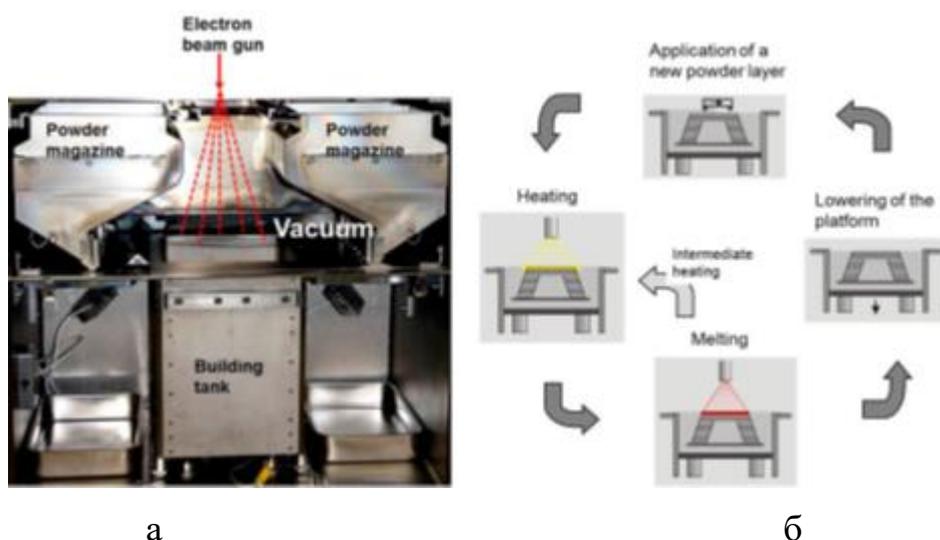


Рисунок 1.8 – Электронно-лучевая установка: технологическая камера (а);
схема процесса работы (б) [41]

Последовательность процесса SEBM можно описать следующим образом (рисунок 1.8.б): на специальную платформу насыпают или распыляют металлический порошок и разравнивают его при помощи ножа или валика; по координатам, полученным с компьютерной модели, поверхность материала бомбардируется электронами из электронно-лучевой пушки.

Вакуум, созданный в камере, имеет давление меньше 1×10^{-4} Бар и способствует процессу нагрева металла, ведь любая газовая или воздушная среда создает для электронов слишком высокое сопротивление. Температура в камере

во время печати составляет $640-700^{\circ}\text{C}$. Такая среда позволяет расплавленному порошку не охлаждаться быстро и обеспечивает однородность структуры продукта [41].

Большой интерес сегодня вызывает SEBM изделий с использованием электронно-лучевого источника плавления, где вместо порошка используется присадочная проволока [29]. Схема такого процесса представлена на рисунке 1.9. Для создания изделий из сложнолегированных титановых сплавов можно применять порошковую проволоку [10].

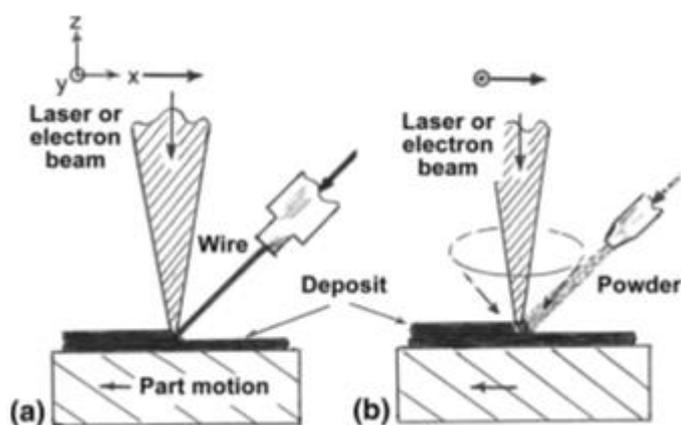


Рисунок 1.9 – Сравнение схем технологического процесса изготовления металла аддитивными методами: а) лазерная или электронно-лучевая обработка с использованием подачи проволоки (а); процессы лазерного или электронно-лучевого спекания/расплава с использованием подачи порошка (б) [29]

В соответствии с характеристиками данной технологии EBМ имеет ряд преимуществ. Очень короткое время технологического процесса. Поскольку технология построена по САD-модели, не требуется никакой оснастки, что сокращает время и затраты на проектирование и обработку, а также значительно сокращает производственный цикл изделия. Равномерное распределение

энергии электронного пучка, которое позволяет точно контролировать параметры пучка и формируемую структуру и свойства материалов [29]. Использование электронных пучков в качестве источника энергии обеспечивает высокую энергоэффективность, широкий спектр материалов (порошок, проволока), отсутствие загрязнений в вакуумной среде и низкие производственные затраты. Сырье, не расплавленное, может быть использовано повторно, что снижает затраты. Благодаря использованию сырьевого порошка и способу изготовления "дискретный + штабелирующий", могут быть изготовлены сложные детали. Точные по размеру детали, изготовленные EBM, решают проблему сложной обработки титановых сплавов и позволяют производить непосредственно быстрое изготовление человеческих имплантатов или критически важных деталей для аэрокосмической отрасли [29, 40].

1.2.2. Стрoение получаемых изделий

SEBM использует электронный пучок в качестве источника энергии, преобразуя кинетическую энергию электронов в тепловую энергию, поэтому коэффициент использования энергии высок. Не вся тепловая энергия используется для расплавления материала, также происходит обмен теплом между материалом и окружающей его средой, что позволяет поддерживать необходимую температуру рабочей камеры [14].

Как было указано выше, материал, используемый для создания изделий электронным пучком, может быть разнообразным. Широко применяемые сегодня материалы – это порошки и проволоки [39-45].

SEBM порошкoм

Первым этапом формирования изделия является нагрев порошка. На этапе нагрева нанесенный порошок нагревается путем многократного сканирования слоя электронным лучом с высокой скоростью (рисунок 1.10 а). В результате этого этапа происходит спекание порошка. После предварительного нагрева на втором этапе электронный луч сканирует слой порошка с меньшей скоростью и расплавляет частицы порошка там, где должен образоваться твердый материал (рисунок 1.10 б). При этом, необходимо определить множество параметров процесса: мощность луча P , скорость луча v , расстояние между линиями d , смещение фокуса луча, количество контуров и т. д. [41].

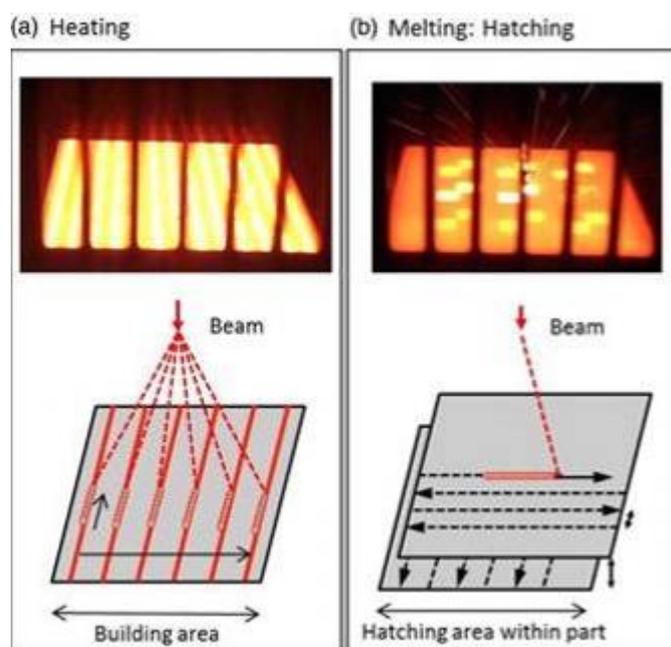


Рисунок 1.10 – Нагрев и плавление во время SEBM. Вверху: фотография во время процесса. Внизу: схема движения луча при нагреве (а) и плавлении (б)

[41]

Чтобы получить монолитный материал, ванна расплава должна иметь критической глубины, больше толщины слоя. Необходимо расплавить слой, примерно в 3–4 раза превышающий толщину слоя порошка, чтобы предотвратить

образование дефектов, например, нерасплавленные частицы порошка или низкая когезия между слоями. Микроструктура и механические свойства консолидированных материалов сильно зависят от параметров обработки (T , P , v , длина сканирования и т. д.). Один и тот же материал, обработанный с разными наборами параметров и стратегиями сканирования, может быть либо изотропным, либо иметь высокую текстуру, мелкозернистый или крупнозернистый и гомогенный или неоднородный химический состав [41].

Неоднородности состава возникают в результате избирательного испарения элементов с низким давлением пара. Поскольку нагрев происходит до очень высоких температур и процесс протекает в условиях вакуума, необходимо учитывать испарение. Некоторые элементы, включая алюминий, имеют очень высокое давление пара. В результате эти элементы могут сильно истощиться на поверхности ванны расплава, если максимальная температура высока. Результирующие неоднородности частично компенсируются конвекцией расплава, но приводят к распределению элементов, как показано на рисунке 1.11а. Общее содержание алюминия сильно снижается, а распределение алюминия, то есть состав сплава, меняется по слоям. Локальное изменение содержания алюминия приводит к изменению температур фазовых переходов и фазового состава. Для чувствительных материалов, например алюминидов титана, это локальное изменение состава оказывает сильное влияние на микроструктуру (рисунок 1.11 б).

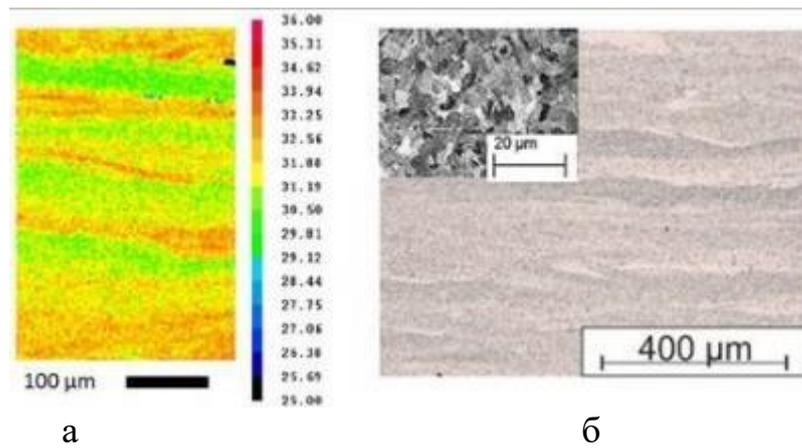


Рисунок 1.11 – Схема распределение Al (а) и слоистая микроструктура (б) в сплаве Ti-48Al-2Cr-2Nb, построенном SEMB [41]

Последовательный процесс создания тонких слоев за счет локального тепловложения приводит к характерным микроструктурам из-за быстрого и направленного затвердевания (рисунок 1.12). Затвердевание в основном направлено в направлении строительства и преимущественно эпитаксиально. Наблюдается рост зерен через сотни слоев (а, б). В результате образцы SEMB очень часто демонстрируют сильную текстуру в сочетании с анизотропными свойствами [46]. Зерна с благоприятной ориентацией перерастают зерна с неблагоприятной ориентацией. Обычно зерна ориентированы в направлении $\langle 001 \rangle$ для сплавов, которые затвердевают, начиная с гранцентрированной кубической (ГЦК) или ОЦК фазы. Ширина столбчатых зерен зависит от условий обработки и увеличивается с увеличением размера ванны расплава.

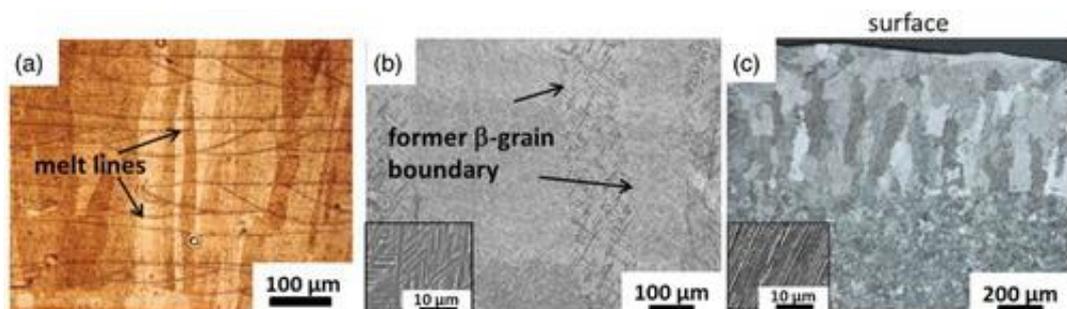


Рисунок 1.12 – Микроструктура различных материалов, обработанных SEBM: чистая медь (а), сплав Ti -6Al -4V(b), сплав Ti – 48Al – 2Nb – 2Cr на поверхности изделия (с) [41]

Существуют разные механизмы, провоцирующие образование новых зерен. Формирование новых зерен обычно начинается на границе компонента, где частично расплавленные частицы порошка действуют как новые зародыши. Также определенные стратегии плавления могут вызвать образование нового зерна. Классический столбчато-равноосный переход с появлением новых зерен может быть искусственно вызван очень большим подводом энергии, но обычно этого не наблюдается при использовании стандартных параметров наращивания [41].

Помимо затвердевания и охлаждения, SEBM характерна термическая обработка на месте. Она оказывает сильное влияние на получаемую микроструктуру. Обычно SEBM работает при высоких температурах (для TiAl – 1100°C). Эти высокие температуры оказывают сильное влияние на микроструктуру и остаточные свойства материала. Кроме того, эксплуатационные характеристики зависят от положения из-за различных условий термообработки в строительной камере.

SEBM проволокой

Процесс изготовления присадочного материала на основе проволоки с электронным пучком в качестве источника тепла очень похож на процесс сварки с нахлестом одного сварочного валика (дорожки) на другой (рисунок 1.15а). Таким образом формируется один слой изделия. Наложение слоев друг на друга создает всю деталь (рисунок 1.13 б).

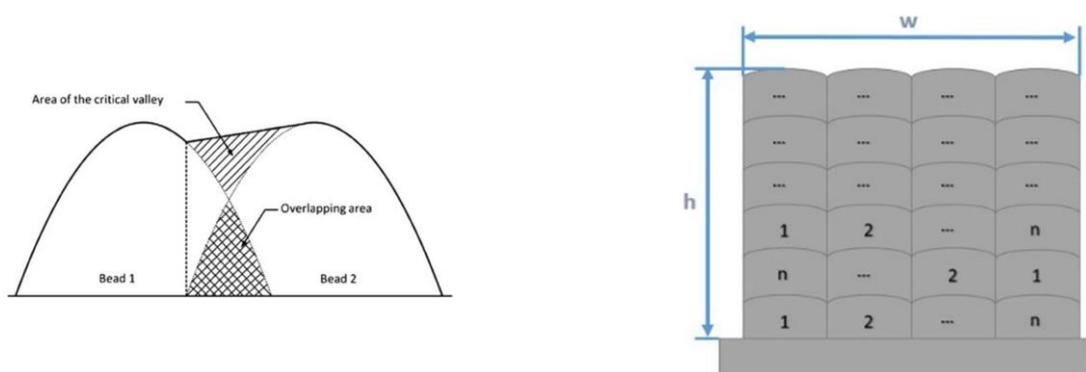


Рисунок 1.13 – Схематическое изображение нахлеста сварочных валиков (а) и многослойного объекта (б) при SEBM проволокой [39].

Ключевым фактором для получения стабильного процесса SEBM является положение подачи проволоки. Скорость наплавки можно увеличить, увеличивая значения основных параметров процесса – тока луча и скорости подачи проволоки. Соответственно на размер валика можно влиять, изменяя скорость наплавки.

В работе [39] были успешно получены образцы при разных режимах. Так на рисунке 1.14 показана структура образцов с семью дорожками и девятью слоями (а) и тремя дорожками и семью слоями наращивания материала (рисунок 1.14). Видно, что при меньшем объеме сварочного валика при более высоких скоростях охлаждения формируется микроструктура с более мелким зерном.

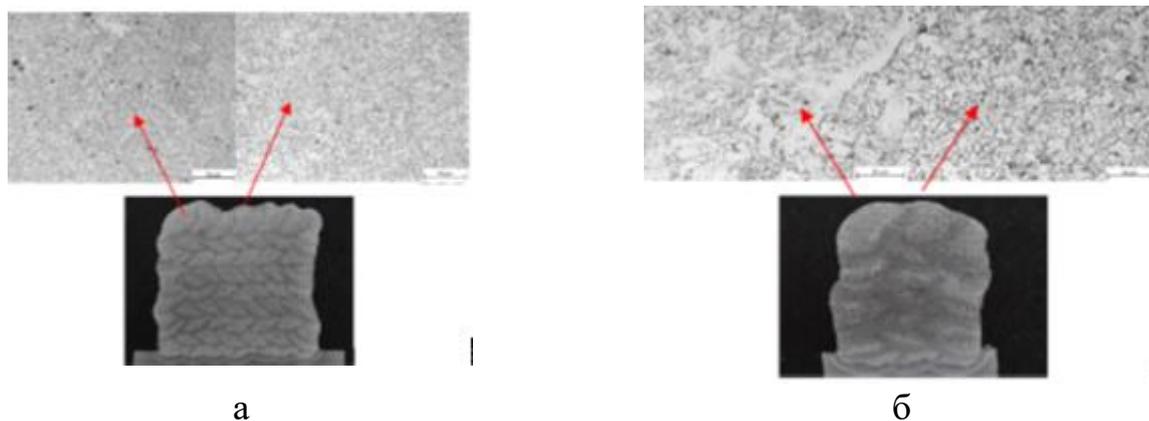


Рисунок 1.14 – Структура сплава на основе железа G4Si1 после EBM с семью дорожками и девятью слоями (а) и с тремя дорожками и семью слоями (б) [39].

1.2.3. Стрoение алюминидов титана после SEBM

В работе [14] показано что этот метод работает и получил также мелкокристаллическую структуру (Рисунок 1.15.)

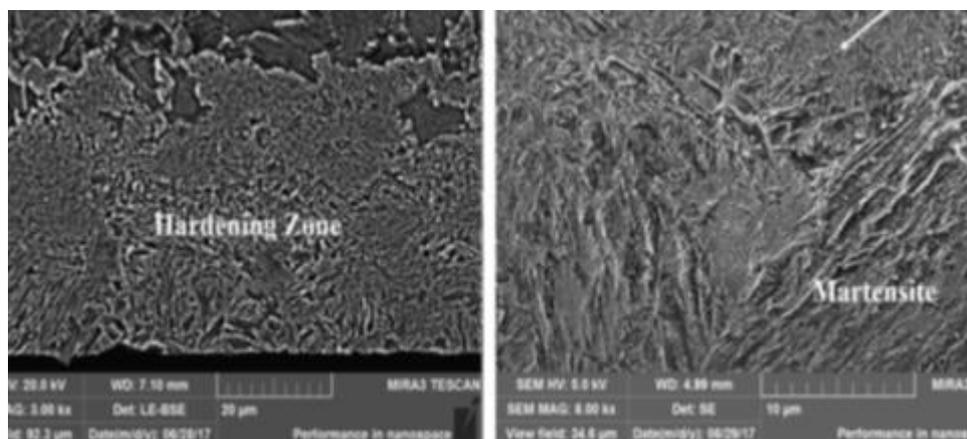


Рисунок 1.15 – Изображение образцов в поперечном сечении, полученных EBM [14]

Из изображения в двух отдельных областях видно, что основной металл и зона упрочнения. Зона основного металла состоит из крупных зерен, в то время как зона закалки состоит из мелкого зерна из-за очень высокой скорости

охлаждения. Основным компонентом зоны закалки является мартенсит, поэтому материал очень твердый.

В работе [14] показана возможность комбинирования других методов с электронно-лучевой наплавкой. Когда комбинируем SEBM и азотирование, твердость полученной материалы увеличилась в 3 раза, потому что атомы азота были введены в сталь, что привело к образованию фазы Fe_3N , а фаза Fe_3N имеет высокую твердость (рис 1.16.). Обработка EBМ приводит к формированию гораздо более тонкой микроструктуры. В этом случае границы зерен играют роль барьера для движения дислокации [14].

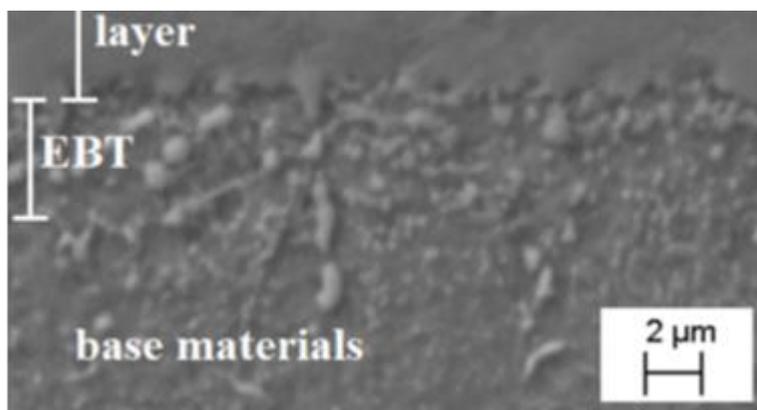


Рисунок 1.16 – Изображения методом РЭМ с поперечным сечением инструментальной стали W320 после электронно-лучевой обработки, плазменного азотирования и осаждения двухслойного покрытия TiN/CrN[14]

При одновременном легировании и SEBM энергия электронов поглощается и переносится в решетку и обрабатываемая зона быстро достигает температуры плавления материала, формируя ванну расплав. Легкоплавные элементы встраиваются и распределяются внутри расплавленного материала и после затвердевания поверхностный сплав со значительно улучшенными

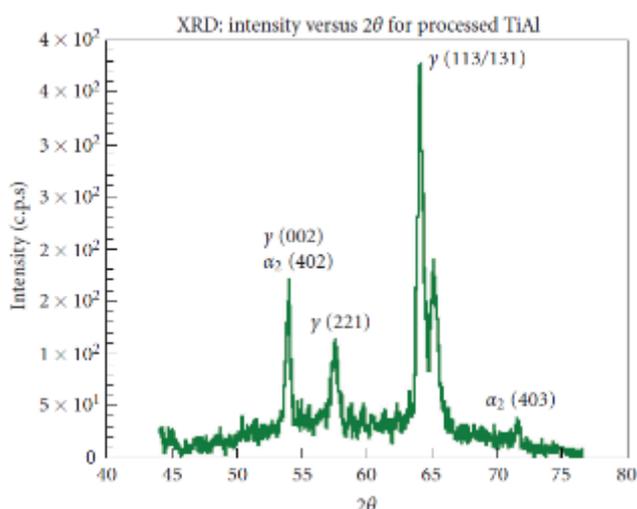
функциональными свойствами над основанием материал сформирован. В том расплавленный материал является основным материалом.

В работе [27] исследовались преславы и смешанные порошки для получения алюминированного титана методом электронно-лучевого плавления. В результате был получен экспериментальный образец размером 7,6 см*2,5 см*1,2 см (рисунок 1.17).

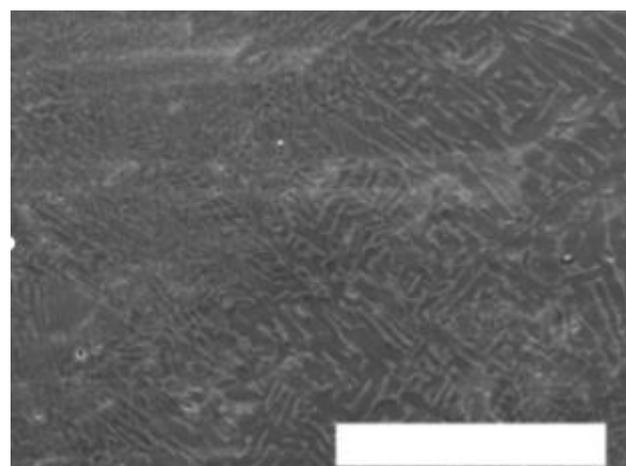


Рисунок 1.17 – Образец TiAl, полученный SEBM [27].

В результате анализа рентгеновских изображений образца и наблюдаемой микроскопией структуры был определен двухфазовый состав – α_2 - и γ - TiAl и легко идентифицируемое мелкослоистое строение $\alpha_2 + \gamma$ TiAl (рисунок 1.18).



а



б

Рисунок 1.18 – Структурный анализ образца: XRD (а); изображение, полученное сканирующей электронной микроскопией (б) [27]

Свойства алюминидов титана, полученных методом ЕВМ, сильно зависят от их микроструктуры, которая может быть спроектирована с помощью соответствующих дополнительных технологических операций и термической обработки. Различные типы микроструктур (дуплексная, почти полностью пластинчатая и полностью ламельная) могут быть получены при различных условиях термообработки (рисунок 1.19) [41].

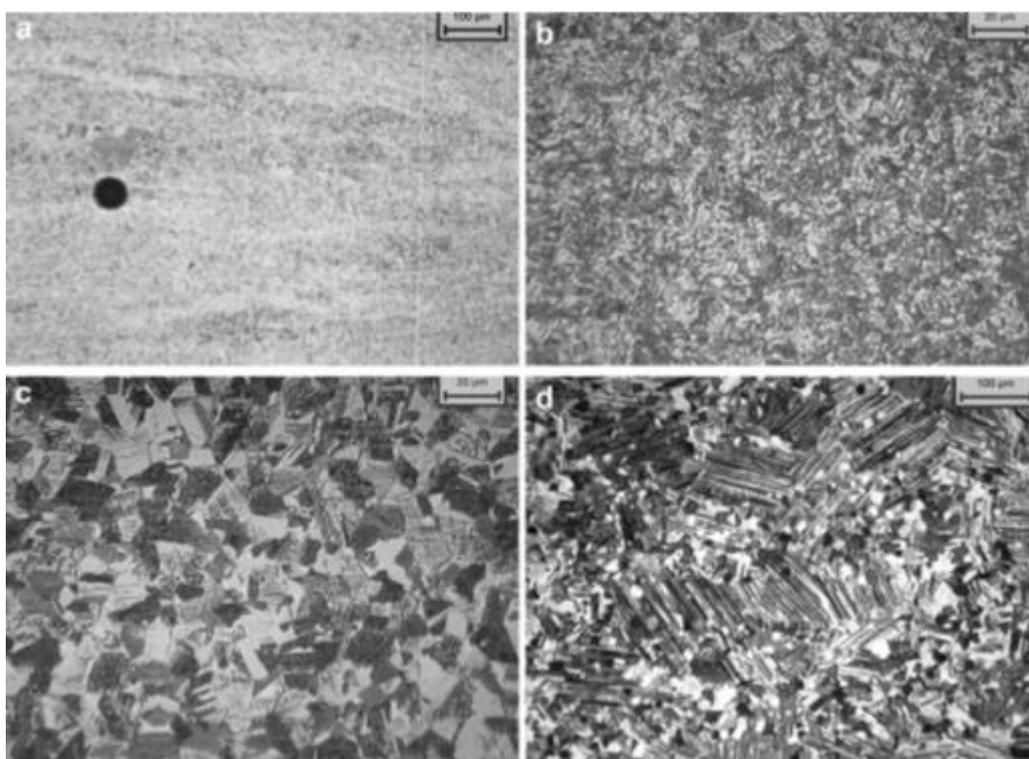


Рисунок 1.19 – Типичная мелкая сферическая пора в образце ЕВМ-TiAl (a); микроструктура после ЕВМ (b); микроструктура после горячего изостатического прессования (c); микроструктура после термической обработки (d) [41].

Во время производства образцов установка всегда находится под вакуумом, поэтому расход алюминия ниже, а газовая пористость меньше

(рисунок 1.19 а). Как видно на изображении микроструктуры (рисунок 1.19b), размер зерна очень мал, так как мал размер сварочной ванны, а скорость охлаждения велика, поэтому материал имеет очень хорошие свойства. На рисунке 1.19 с показана микроструктура после горячего изостатического прессования. Наблюдается полная рекристаллизация с почти равноосной микроструктурой и более крупным зерном. Получаемый размер зерна меньше 20 мкм. Во время последующей термической обработки происходит очень незначительный рост зерна (рисунок 1.19 d), Количество пластинчатой фазы около 40% и характерным средним размером зерна около 100 мкм. Пластинчатые включения окружены мелкими равносторонними зернами (около 15 мкм) [41].

2. Оборудование и методы исследования

2.1. Оборудование электронно-лучевого принтера

В этом эксперименте используется технология аддитивного производства EBM. Для получения интерметаллидов методом EBM использовалась установка 3D-печати, разработанная в Центре аддитивного производства Томского технологического университета, России [53].

Устройство включает вакуумную камеру с камерой плазменного излучения и модульный манипулятор, который может подавать металлическую проволоку и осаждать методом электронно-лучевой плавки (EBM). Внешний вид и структурная схема устройства показаны на рисунке 2.1 – 2.2.



Рисунок 2.1 – Внешний вид машины EBM

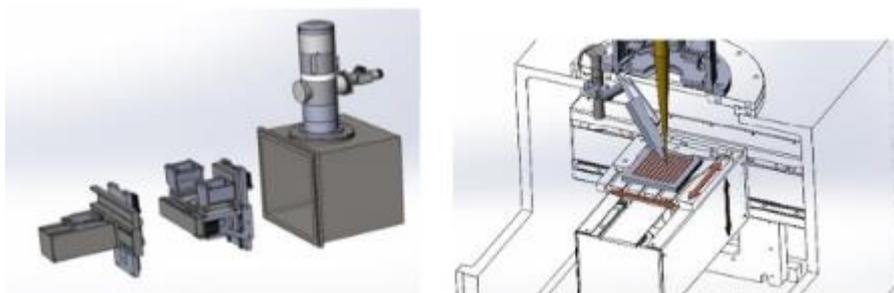


Рисунок 2.2 – Появление модульных манипуляторов машина EBM (Слева) и Схема печатающего устройства машины EBM (Справа)

Оборудование в Центре аддитивного производства ТПУ использует программное обеспечение, разработанное самим ТПУ, которое позволяет в режиме реального времени управлять всеми настройками печати и может быстро заменить устройство подачи проволоки [52].

Принтер производства японской компании имеет максимальную скорость сканирования 800 м/с и минимальный диаметр электронного луча 150 мкм. Высота одного слоя материала, напечатанного устройством, имеет толщину до 300 мкм.

Мощность плавления определяется как ускоряющим напряжением, силой тока и размером пучка. При легировании материалов, если мощность слишком низкая, эффективная металлургическая связь между сплавами не образуется, материал не будет расплавлен полностью. Слишком высокая мощность плавления вызовет большое количество улетучивания легирующих элементов с низкой температурой плавления, таких как алюминий и хром, что приведет к отклонению состава сплава от ожидаемого состава и даже к изменению фазового состава.

Процесс ЕВМ делится на два основных этапа: операция подачи инструмента и операция плавления электронным лучом. Перед плавкой камеру и электронную пушку необходимо откачать до высокого вакуума соответственно, конкретная последовательность действий следующая.

- 1) Включите диффузионный насос и после достаточного предварительного нагрева на дисплее появится сообщение о завершении предварительного нагрева. Включите диффузионный насос, пока давление в плавильной камере не достигнет $5 \cdot 10^{-2}$ Па или меньше, тогда будет достигнуто

требование плавления.

2) Войдите в интерфейс работы с электронной пушкой, включите поочередно кнопки развертки смещения, фокусировки и накала, запустите высокое напряжение электронной пушки, установите его на 30 кВ и удерживайте в течение 1 мин для определения стабильности высокого напряжения прибора. После стабилизации высокого напряжения поверните ручку тока пучка, чтобы медленно увеличить ток пучка для предварительного нагрева катода для возбуждения горячих электронов.

3) После прогрева катода уменьшите ток пучка до 0 мА, включите высокое напряжение и увеличьте его до 30 кВ и откройте окно наблюдения после периода стабилизации. В этот момент размер пучка медленно увеличивается, а скорость пучка регулируется в соответствии с заданным процессом плавки и фактическими условиями плавки до достижения заданного значения пучка.

4) В конце процесса плавления ток пучка и высокое напряжение медленно и неуклонно снижаются до 0. Нажмите выключатель остановки плавления и закройте панель управления электронной пушкой. Закройте клапаны пушки и камеры для поддержания высокого уровня вакуума в электронной пушке.

5) Поддерживайте высокий вакуум в плавильной камере и дайте материалу остыть вместе с печью в течение 3-4 часов, прежде чем вводить в печь газ аргон для ускорения процесса охлаждения. После достаточного охлаждения откройте клапан управления вакуумом в камере печи и удалите материал, открыв дверь после того, как уровень вакуума в вакуумной камере постепенно приблизится к атмосферному давлению. После очистки стенок тигля и камеры печи начинается последующая плавка.

Образцы изготавливали из алюминиевой проволоки на титановой подложке.

Таблица 2.1

Состав экспериментальных материалов

Марка	Si	Fe	Cu	Mn	Zn	Ti	Ga	V	Другие каждая
Al 99	0.003	0.003	0.004	0.001	0.003	0.001	0.002	0.001	0.001
Ti-90	0,01	0,05	-	-	-	-	-	-	0,05

Для экспериментов использовалась процедура с одним треком, а затем с несколькими дорожками и трехмерными образцами. В качестве величины тока были выбраны значения 6,5 мА, 8,0 мА и 9,5 мА. Принципиальная схема процесса печати показана на рисунке 2.3.



Рисунок 2.3 – Схема процесса печати трека.

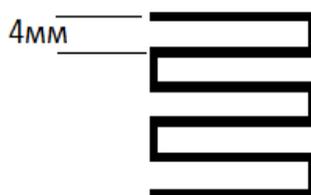


Рисунок 2.4 – Схема процесса печати многотрека

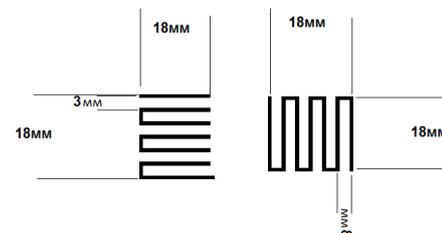


Рисунок 2.5 – Схема процесса печати 3Д объекта.

Все треки выполнялись в одном направлении, при этом проволока направлялась в сторону готовой части шва. Скорость сварки поддерживалась постоянной на уровне 5 мм/с, а угол между направлением плавления и подачей

проволоки составлял 45° для всех швов смотри в рисунке 2.4.

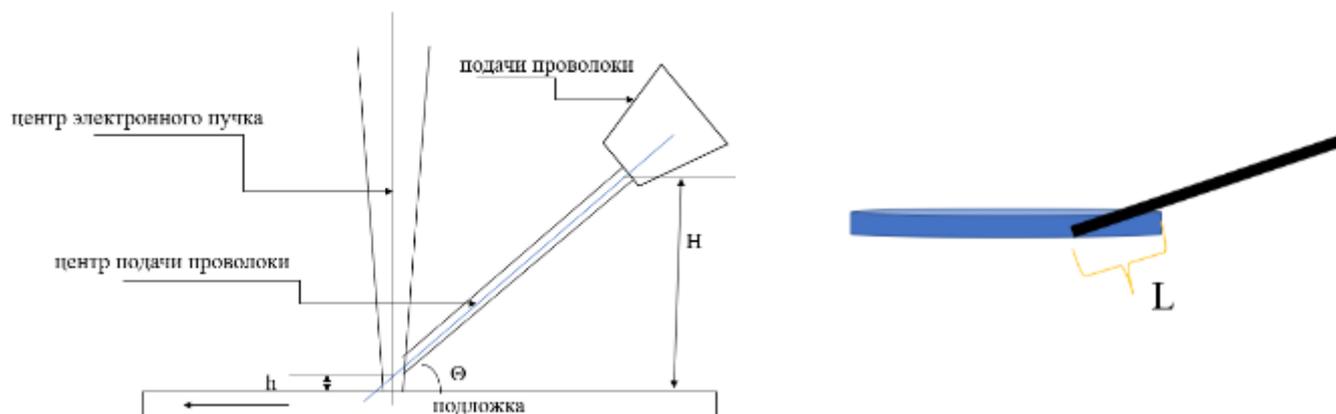


Рисунок 2.6 – Регулировка узла подачи проволоки по отношению к заготовке

Точное позиционирование подачи проволоки в плоскости x-z (см. рисунок 2.6.) имеет решающее значение для получения вертикальной структуры. В данной работе выбраны три позиции проволоки относительно электронного пучка с изменяемым расстоянием от края пучка. При этом меняется параметр h и параметр L .

$$L = h / \sin \Theta$$

где h – высота наклона проволоки на крае электронного пучка

L – длина проволоки в электронном пучке

Длина проволоки в электронном пучке L выбиралась равной 1,5мм, 2,0мм и 3,0 мм.

Сварка монослоев была наиболее важной задачей в данном исследовании.

2.2. Методы исследования

Исследования морфологии, структуры, фазового и элементного состава

образцов полученного материала проводились методами оптической микроскопии (ОМ), рентгеноструктурного анализа (РСА) и оценки нанотвердости в Отделении материаловедения ИШНПТ ТПУ и в ЦКП «Нанотех» ИФПМ СО РАН (г. Томск).

2.2.1. Наблюдение за микроструктурой

Размер образца для наблюдения микроструктуры представляет собой прямоугольник размером 20 мм x 20 мм x 1 мм с высотой образца 1 мм. Образец подготавливается путем резки до заданного размера и заключен в цилиндр с использованием эпоксидной смолы для последующего шлифования. Наждачная бумага с зернистостью 60 используется для удаления оксидной пленки и следов от среза проволоки с поверхности в одном направлении. Затем образец поворачивается на 90° и шлифуется на бумаге зернистостью 2000, останавливая процесс, когда исчезнут следы от зернистости 60. Полировка поверхности проводилась на алмазных паста. При подготовке экспериментальных образцов для печати использовался послойный подход, так что желаемое титан-алюминиевое интерметаллическое соединение концентрировалось на границе между металлическим алюминием и титановой подложкой. Поэтому возникла необходимость рассчитать площадь интерметаллического соединения для образцов, полученных при различных параметрах.

Программа ImageJ предоставляет простой способ быстрого и точного вычисления площадей. ImageJ это общедоступная, основанная на Java программа для анализа и обработки изображений, разработанная в National Institutes of Health. В ImageJ можно вычислять площади, статистические показатели

пиксельных значений различных выделенных областей интереса на изображениях, которые выделены вручную или при помощи пороговых функций.

Строение образцов изучали на микроскопе CarlZeiss AxioObserver. Оценивалось расположение структурных составляющих, наличие объёмных дефектов, форма и размер зерен [34,37].

2.2.2. Рентгеноструктурный анализ

РСА – это один из дифракционных методов исследования структуры вещества по распределению в пространстве и интенсивностям рассеянного на анализируемом объекте рентгеновского излучения. Эксперименты проводились с использованием экспериментальных образцов при различных уровнях тока, а поверхностный оксидный слой и чистый алюминий полировались, чтобы обнажить границу интерметаллического соединения.

Рентгеновские съемки осуществлялись на рентгеновском дифрактометре ДРОН-7 (Буревестник, Россия) в $\text{CoK}\alpha$ -излучении ($\lambda = 0,1789$ нм). Напряжение, подаваемое на рентгеновскую трубку, составило 35 кВ, сила тока – 22 мА. Съемка осуществлялась в симметричной геометрии по схеме Брегга-Брентано (2θ - θ) в угловом диапазоне 2θ 10-165° с шагом сканирования 0,05°. Время экспозиции в каждой точке составляло 5 с. Съемка осуществлялась с вращением образца. Обработка рентгеновской дифрактограммы осуществлялась методом полнопрофильного анализа (метод Ритвельда). Производились расчеты объемного соотношения фаз [53,54].

2.2.3. Измерение микротвердости

Индентирование осуществляли с помощью прибора Nano Indenter G 200 (рисунок 2.7.). В качестве индентора использовали пирамиду Берковича, нагрузка составляла 500 мН (50 г). Конструкция прибора позволяет выводить диаграмму внедрения индентора на монитор в режиме реального времени. Первичные данные – нагрузка и глубина внедрения пирамиды. По диаграмме внедрения прибор автоматически рассчитывал модуль упругости E_{IT} и микротвердость H_{IT} в соответствии со стандартом ISO 14577 [52].



Рисунок 2.7 – Установка Nano Indenter G 200.

Вдавливание индентора в материал вызывает локальную упругую и пластическую деформацию и приводит к образованию соответствующего отпечатка на определенной глубине h_c . После снятия нагрузки упругая деформация восстанавливается, что позволяет определить упругие свойства материала. Экспериментальная первичная кривая «нагрузка – внедрение» (диаграмма внедрения), непрерывно получаемая в процессе индентирования, показана на рисунке 2.8. По диаграмме определяются следующие величины: пиковая нагрузка и глубина внедрения индентора P_{max} и h_{max} , остаточная глубина после разгрузки h_f , и наклон начальной части кривой разгрузки $S = dP/dh$,

который характеризует упругую жесткость контакта [52]. При использовании в качестве индентора трехгранной пирамиды Берковича твердость исследуемой поверхности H определяется по следующей формуле:

$$H = \frac{P}{A} = 0,00387 \frac{P}{h_{\max}^2}$$

где P – нагрузка, прилагаемая к испытываемой поверхности, A – площадь отпечатка под нагрузкой, h_{\max} – глубина внедрения индентора, мм.

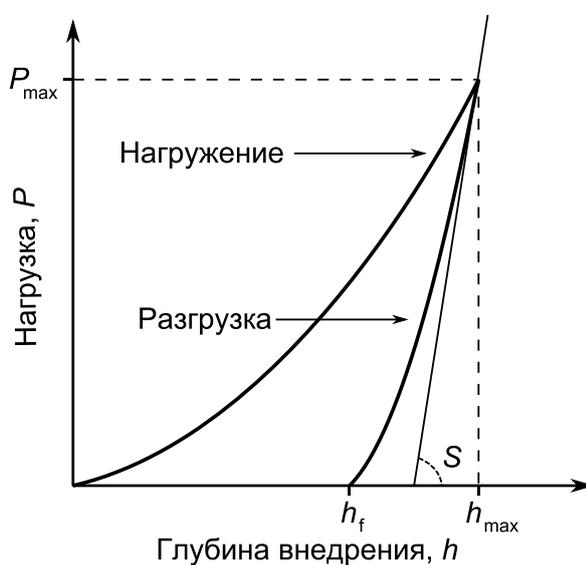


Рисунок 2.8 – Кривая «нагрузка – внедрение»,
получаемая в процессе индентирования

3. Результаты исследований

3.1. Получение образцов и выбор режимов наращивания

3.1.1. Получение треков

Как известно, что основным фактором, влияющим на плавление

металлов, является потребляемая энергия, и для данного эксперимента величина тока определяет величину потребляемой энергии. Для того чтобы быстрее найти подходящий интервал величины тока, сначала был использован экспериментальный метод изготовления образца одной дорожки (рисунок 3.1).

На первом этапе исследования были получены треки от наплавленного алюминия на подложке из титана. Основной задачей было получить ровный трек, сплавленный с подложкой.



Рисунок 3.1 – Внешний вид одиночных треков при силе тока:

а) 5,5 мА; б) 6,5 мА; в) 8,0 мА; г) 9,5 мА.

Результаты показали, что регулировка текущего размера играет важную роль в экспериментальном процессе. На рисунке 3.1 показаны дорожки, выполненные с теми же настройками параметров, но значение экспериментального тока изменилось. На рисунке 3.1 а значение тока ниже оптимального интервала тока, и проволока не получает достаточно энергии, чтобы расплавить ее. В результате трек имеет прерывистые траектории на подложке. Значение 6,5 мА использовано на рисунке 3.1 б. Видно, что проволока может быть полностью расплавлена, но в

результате трек не является плоской, и есть неравномерные подъемы и спады. Рисунок 3.1 в и 3.1 г показали хорошие результаты. Следовательно, можно определить, что основной экспериментальный интервал тока составляет от 6,5 мА до 9,5 мА.

3.1.2. Получение монослоев

В первой серии эксперимента были определены основные интервалы силы тока для формирования из отдельных треков образцов в виде монослоев. Выполнены соответствующие экспериментальные образцы (рисунок 3.2).

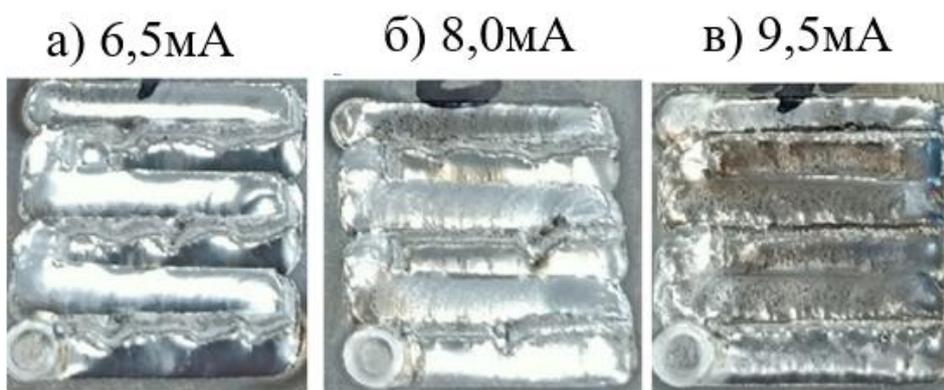


Рисунок 3.2 – Внешний вид шести треков и одночных слоев при разных силах тока

Как видно из рисунка 3.2 в результате исследования поверхностного состояния монослоев, тепловое взаимодействие между соседними треками во время изготовления будет более сложным, чем в случае одиночного трека. Дорожки, следующие непосредственно за завершением предыдущей дорожки в процессе печати, не используют в качестве подложки исключительно титановую подложку, а пересекаются между собой.

На рисунке 3.2 а образец имеет дефекты на границе сплавления треков, пока дефекты присутствуют между областями пересечения каждой дорожки. На рисунке 3.2б и 3.2в дефекты на границе не заметны. Основная причина этого заключается в том, что в процессе печати потребляемая энергия постепенно увеличивается, и пока алюминиевая проволока плавится, часть энергии остается для нагрева последующей металлической подложки, чтобы последующие дорожки имели лучшие тепловые условия.

На рисунке 3.2 также присутствуют некоторые следы волочения твердой проволоки, что в основном связано с тем, что регулировка узла подачи проволоки в процессе печати не идеально соответствовала условиям для плавления проволоки. Поэтому было необходимо для получения лучшего образца посмотреть влияние позиции проволоки относительно луча, то есть, изменялась точка входа проволоки в ванну расплава, созданной разверткой луча. Получены образцы при силе тока 8,0 мА, изменялась позиция проволоки относительно луча h с 1,5 мм до 3,0 мм. Схема регистрации точки входа проволоки в ванну расплава в рисунке 2.4 и результат печати на рисунке 3.3.

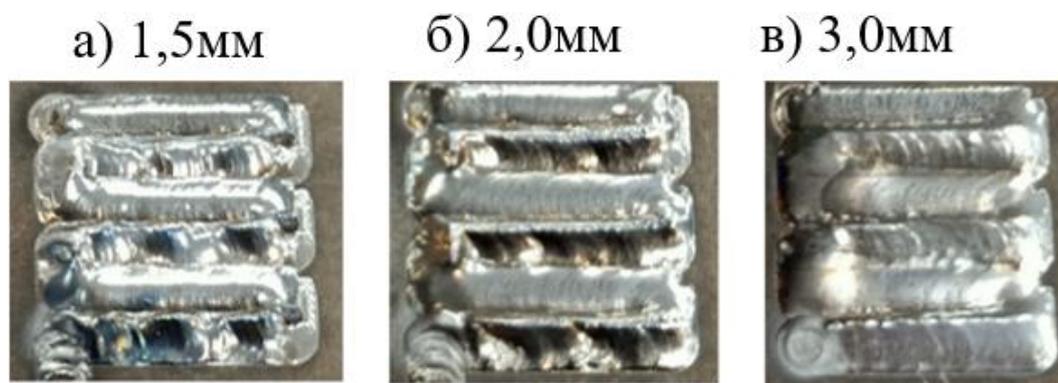


Рисунок 3.3 – Внешний вид образца при силе тока 8,0мА разных длинах проволоки в электронном пучке

Разные экспериментальные результаты были получены при использовании различных расстояний при одинаковой силе тока. На рисунок 3.3 б и 3.3 в хорошо видно, что поверхность дорожки более плоская и в то же время имеется большая выпуклость в месте пересечения дорожек, что указывает на то, что тепловые условия здесь более подходящие и можно получить больше интерметаллических соединений.

3.1.3. Получение 3D образцов

На рисунке 3.4 показаны трехмерные образцы, полученные при силе тока 6,5мА, 8,0 мА и 9,5мА, соответственно при длине $L=2,0$ мм.

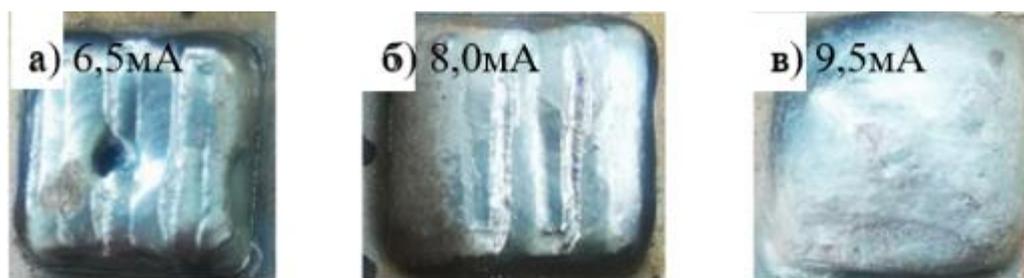


Рисунок 3.4 – Внешний вид 3Д объекта при силе тока.

При всех режимах происходит переplав и перегрев предыдущих монослоев. При силе тока 9,5 мА образец кристаллизуется в виде одной жидкой ванны. Получается, что для наращивания алюминиевой проволоки выбранные нами режимы не подходят, а для послойного нанесения чередующихся проволок титана и алюминия подойдут.

Заклучение по разделу 3.1.

Проволока, используемая в экспериментах, является алюминиевой,

поэтому на процесс падения капель металла при плавлении проволоки влияет множество факторов, таких как размер расплавленных капель; скорость выплевывания проволоки; скорость печати и т.д. Для эксперимента изменяемыми параметрами были выбраны сила тока и точка входа проволоки в ванну расплава.

Из полученных результатов можно сделать вывод, что расплавленная проволока диаметром 1,5 мм образует большую каплю на кончике проволочного фиксатора, и когда гравитационная сила между каплей и проволокой недостаточна, чтобы противостоять силе тяжести капли, она стекает на подложку, образуя прерывистую каплю.

В нашем случае это режим силы тока 6,5 мА. Во всех других исследуемых режимах нанесения материала соблюдалось условие формирования оптимальной капли расплава.

Изменение длины проволоки в электронном пучке меняло количество наплавляемого материала и меняло соотношение количества алюминия и титана в зоне расплава. Для анализа строения полученных образцов и доли сформировавшегося интерметаллида был проведен анализ структуры треков и монослоев.

3.2. Исследование строения полученных образцов и влияние на строение режимов ЕВМ

TiAl является основным материалом, изучаемым в настоящее время и состоит в основном из смеси γ и α фаз при комнатной температуре в диапазоне концентрации алюминия 46-52%. [7].

3.2.1. Микроструктура полученных образцов

Строение треков

Из-за разного вклада энергии, приводящего к разной тепловой среде на границе, эффективность теплообмена металлической жидкости на стыке двух фаз различна, в результате чего плавится только чистый алюминий и не происходит реакции с титаном, получено оптическое изображение при большом увеличении микроскопа, как показано на рисунке 3.5 а.

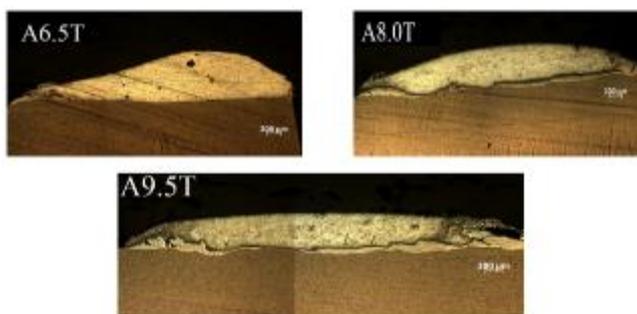


Рисунок 3.5 – Оптическое изображение поперечного сечения трека при силе тока:

а) 6,5 мА; б) 8,0 мА; в) 9,5 мА.

При увеличении силы тока и вклада энергии происходит подплавление титана и перемешивания титана с алюминием. Жидкая ванна кристаллизуется и в ней на границе алюминия и титана образуется промежуточный слой (рисунок 3.5 б, в), имеющий собственные свойства и контраст структуры. Значит, в промежуточном слое формируется материал с новым фазовым составом. Из литературных источников и дальнейших исследований было определено, что это слой, состоящий из интерметаллидов. С увеличением силы увеличивается толщина промежуточного слоя.

С увеличением силы тока высота трека уменьшается, а ширина возрастает,

что говорит о увеличении текучести расплавленного алюминия, а значит его большего перегрева в процессе плавки (рисунок 3.5).

Строение монослоев

В рисунке 3.6 представлены фотографии и показано оптическое изображение поперечного сечения монослоев на малом увеличении, полученные на данных режимах: сила тока 6,5 мА, 8 мА, 9,5 мА и L выбрали 2,0 мм.

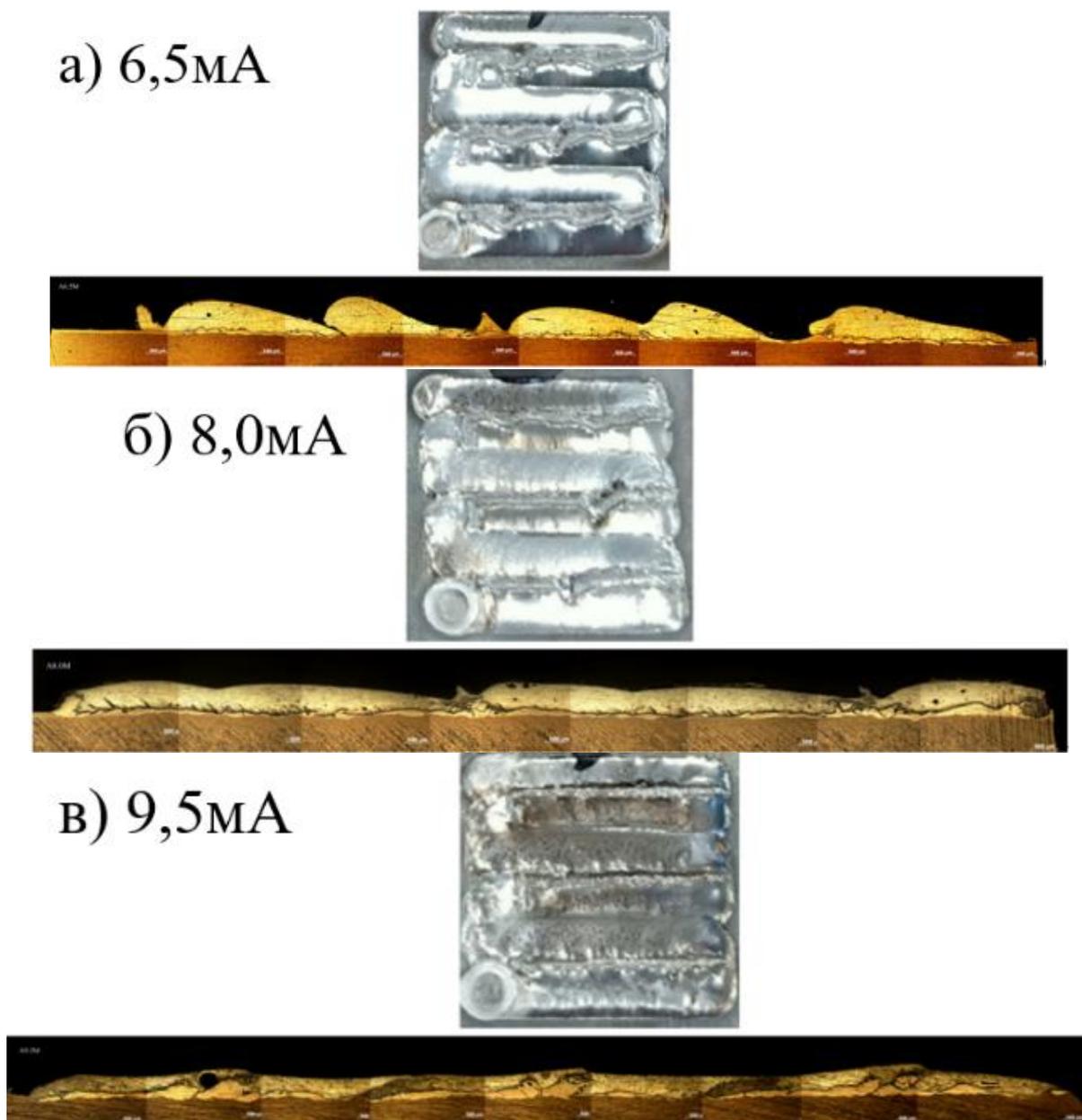


Рисунок 3.6 – Оптическое изображение образцов

На образце 3.6 а при минимальной в исследуемом интервале силе тока, монослой формируется из четко разделенных треков в виде выступов высотой 920 мкм, на границе которых могут образовываться трещины, следы от движения нерасплавленной проволоки или пустоты. При этом, слой интерметаллида получается достаточно равномерным с толщиной до 205 мкм с волнистостью на отдельных треках.

Измерения максимальной и минимальной высоты каждого образца и слоя интерметаллида на границе алюминия и титана, представлены в таблице 3.1 и таблице 3.2.

Таблица 3.1

Высота образца и интерметаллида при разных силах тока

Сила тока, мА	Высота образца, мкм		Высота интерметаллида, мкм	
	максимальная	минимальная	максимальная	минимальная
6,5	максимальная	920	максимальная	205
	минимальная	60	минимальная	0
8,0	максимальная	670	максимальная	480
	минимальная	305	минимальная	10
9,5	максимальная	705	максимальная	490
	минимальная	460	минимальная	0

Видно, что с увеличением силы тока площадь интерметаллида увеличивается (рисунок 3.7).



а) 6,5 мА

б) 8,0 мА

в) 9,5 мА

Рисунок 3.7 – Оптическое изображение поперечного сечения образцов

С помощью программы imagej считались поперечная общая площадь монослоя и площадь интерметаллида. Оптимальные экспериментальные параметры могут быть определены путем сравнения размера области интерметаллического соединения в образце и процентного соотношения к общей площади. Значения показаны на рисунок 3.8.

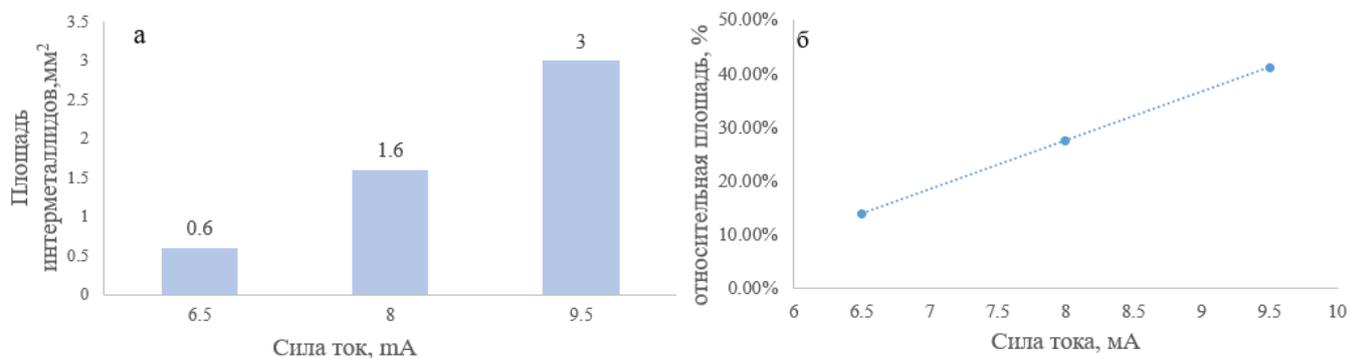


Рисунок 3.8 Площади интерметаллида при разной силе тока (а) и зависимость относительной площади от силы тока (б).

Как видно из графика, расчетная площадь интерметаллического слоя увеличивается с увеличением силы тока с 0,6 до 3 мм² при этом относительная составляет 3,0 мм² при силе тока 9,5 мА, наибольшая площадь при 9,5 мА по

сравнению с площадью при других токах. Также, рассчитав отношение площади интерметаллического соединения к общей площади, можно увидеть, что процент площади интерметаллического слоя постепенно увеличивается с ростом тока. Относительная площадь меняется с 15% до 42%. Получается, что при силе тока 9,5 мА интерметаллид занимает почти половина объема всего монослоя, что подходит для решения в будущем задачи создания сплошного образца из интерметаллида, сформированного послойным наложением монослоев алюминия и титана.

В рисунке 3.9 показано оптическое изображение образца при силе тока 8,0 мА и изменяемой длине проволоки в ванне расплава L.

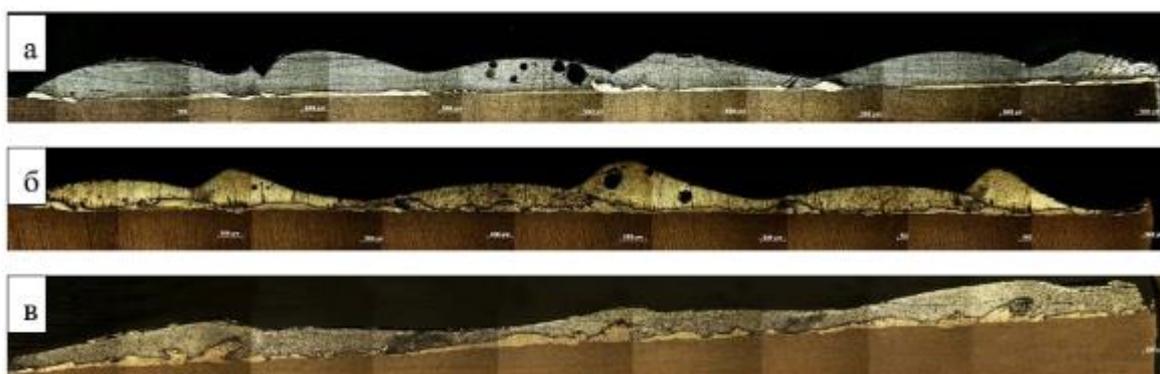


Рисунок 3.9 – Оптическое изображение образца при силе тока 8,0 мА и длине проволоки в ванне расплава: а) 1,5 мм; б) 2,0 мм; в) 3,0 мм.

Общий характер зависимости морфологии поверхности образцов повторяет зависимость, связанную с увеличением силы тока (рисунок. 3.6). С увеличением длины проволоки в зоне плавления снижается высота монослоя и поверхность монослоя выравнивается (рисунок. 3.9, таблица 3.2).

Таблица 3.2

Высота образца и интерметаллида при разной длине проволоки в ванне расплава

Длина проволоки в ванне расплава, мм	Высота образца, мкм		Высота интерметаллида, мкм	
	максимальная	минимальная	максимальная	минимальная
1,5	максимальная	821	максимальная	173
	минимальная	216	минимальная	0
2,0	максимальная	1000	максимальная	247
	минимальная	137	минимальная	26
3,0	максимальная	734	максимальная	414
	минимальная	368	минимальная	24

Изменение длины проволоки в ванне расплава оказывает большее влияние на морфологию интерметаллида (рисунок. 3.10, таблица 3.2).



Рисунок 3.10 – Оптическое изображение образца при силе тока 8,0 мА и длине проволоки в ванне расплава: а) 1,5 мм; б) 2,0 мм; в) 3,0 мм

Как видно на рисунке 3.11 площадь интерметаллида увеличивается от 0,75 мм² при L = 1,5 мм до 2,3 мм² при L = 3 мм. При оценке относительной площади интерметаллида отмечено, что при увеличении длины проволоки в ванне расплава с 1,5 мм до 2,0 мм, относительная площадь увеличивается с 15% до 25%,

а при увеличении длины проволоки в ванне расплава с 2,0 мм до 3,0 мм относительная площадь увеличивается с 25% до 31% (рисунок. 3.11). Наклон графика наибольший на расстоянии от 2,0 мм до 3 мм. Поэтому нет необходимости увеличивать длину проволоки в ванне расплава до 3,0 мм.

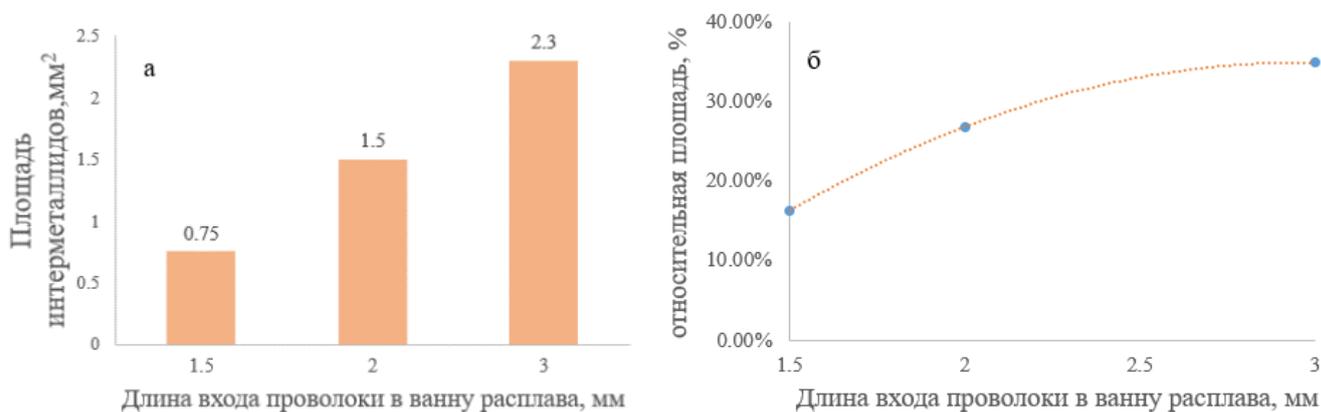


Рисунок 3.11 – Площади интерметаллида при изменении длины проволоки в ванне расплава (а) и зависимость относительной площади от длины проволоки в ванне расплава (б).

Путем изучения рабочего данного режима ($L = 2$ мм) было установлено, что использование этого параметра достаточно для получения интерметаллических соединений, а микроструктуру образца можно четко наблюдать под оптическим микроскопом (рисунок 3.12).

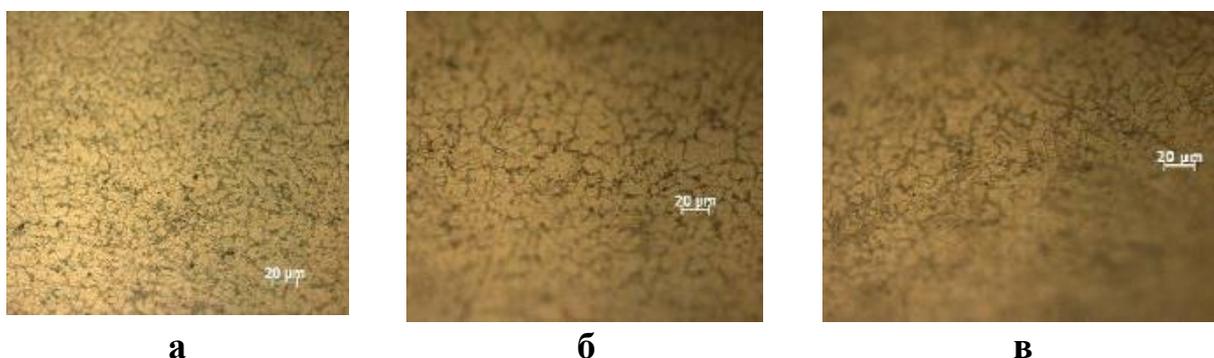


Рисунок 3.12 – Изображения микроструктуры образца при токе а) 6.5мА, б) 8.0 мА, в) 9.5мА.

тока, РСА проведен на трех образцах. Результаты показаны на рисунке 3.14 и расчет соотношения фаз представлен в таблице 3.3.

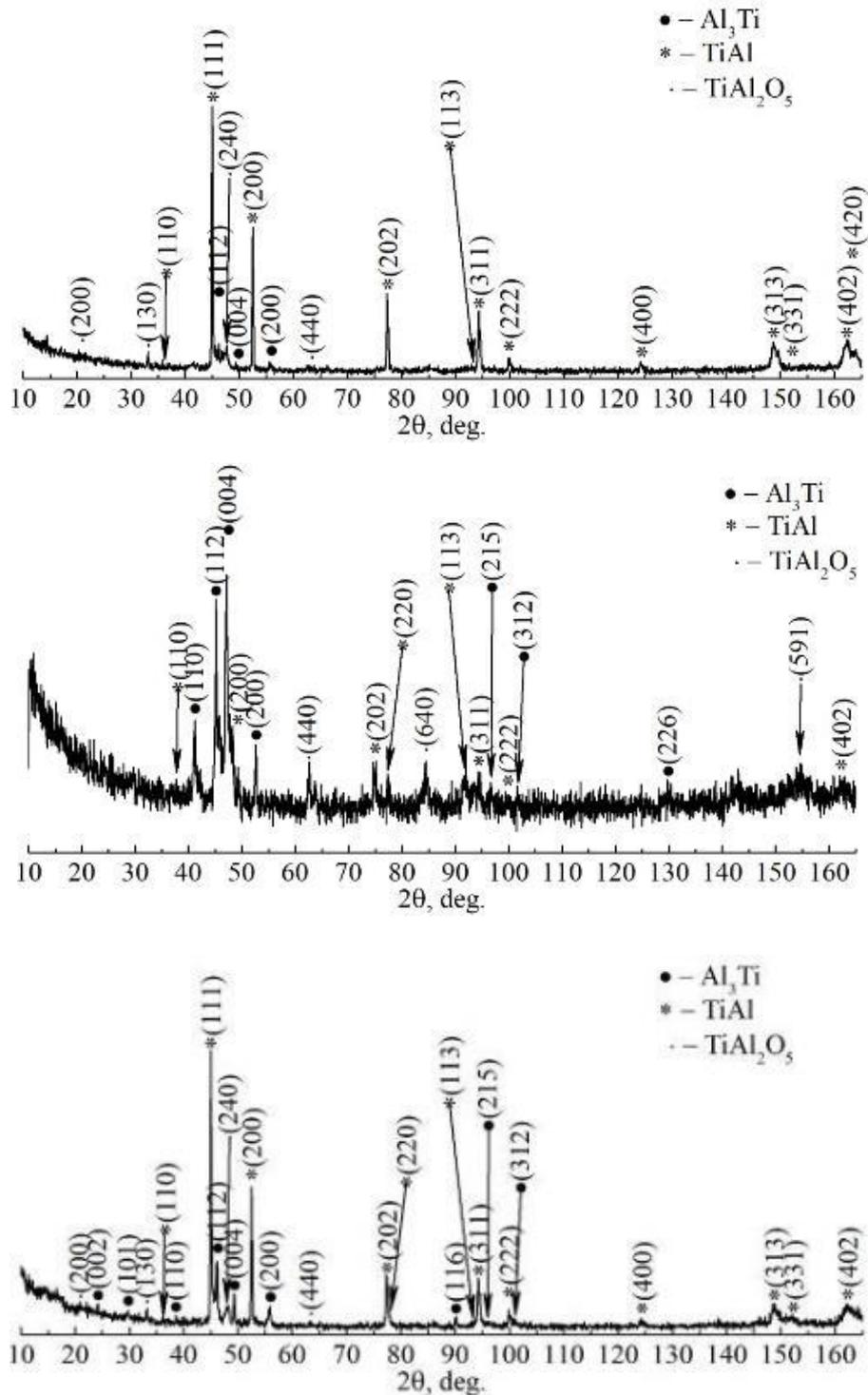


Рисунок 3.14 – Рентгеновская дифрактограмма образца Ti-Al с выполненной идентификацией фаз

Доля фаз в слое интерметаллидов

Сила тока, мА	Доля TiAl, %	Доля Al ₃ Ti, %	Доля TiAl ₂ O ₅ , %
6,5	88	2	10
8	32	46	22
9,5	74	20	6

На рисунке 3.14 приведены рентгеновские дифрактограммы с выполненной идентификацией фаз образцов, приготовленных из слоя интерметаллидов. Как можно видеть, фазовый состав соответствует фазам TiAl, Al₃Ti, и TiAl₂O₅. Селективное электронно-лучевое сплавление привело к фазовому превращению алюминия и титана. Промежуточный слой представляет собой многофазный сплав Al₃Ti, TiAl и TiAl₂O₅.

Кристаллические решетки фаз Al₃Ti и TiAl относятся к тетрагональной сингонии, в то время как решетка TiAl₂O₅ относится к ромбической сингонии.

С увеличением силы тока объёмная доля Al₃Ti увеличивается, а объёмная доля TiAl уменьшается.

Можно предположить причину, почему фазовый состав промежуточногшо слоя меняется именно таким образом (табл. 3.3). Сначала энергии потока электронного луча не хватает, что бы в процессе ЕВМ оплавить и перемешать большой объем материала проволоки из алюминия с подложкой из титана, поэтому в промежуточном слое преобладает фаза TiAl с большим соотношением титана к алюминию (рисунок 3.14). При увеличении вклада

энергии, количество алюминия, взаимодействующего с титаном, увеличивается и увеличивается объёмный процент интерметаллида в составе которого доля алюминия большей – Al_3Ti . При дальнейшем увеличении вводимой энергии – в большей степени начинает подплавляться подложки и объёмный процент интерметаллида в составе, которого доля алюминия большей начинает уменьшаться. Соотношение компонентов в жидкой фазе перемещается в сторону увеличения доли титана.

3.3. Оценка механических свойств

Оценка физико-механических свойств образцов, полученных ЕВМ, производилась с помощью измерения микротвердости. Испытывались образцы, полученные при силе тока 6,5 мА, 8,0 мА и 9,5 мА и длине проволоки в ванне расплава 1,5 мм и 2,0 мм.

В экспериментах измерялась не только микротвердость образцов, но и модуль упругости, и для того, чтобы лучше продемонстрировать физико-механические свойства интерметаллического соединения, свойства будут сравниваться со свойствами чистых компонентов – алюминия и титана.

На первом этапе измерения проводились на образце, полученном на режиме: сила тока 9,5 мА и $L = 2$ мм.

На рисунке 3.15 представлено оптическое изображение поперечного сечения и отпечатков микротвердости образца. Как видно из рисунков, расстояние проникновения индентора отличается при приложении нагрузки к разным участкам образца.

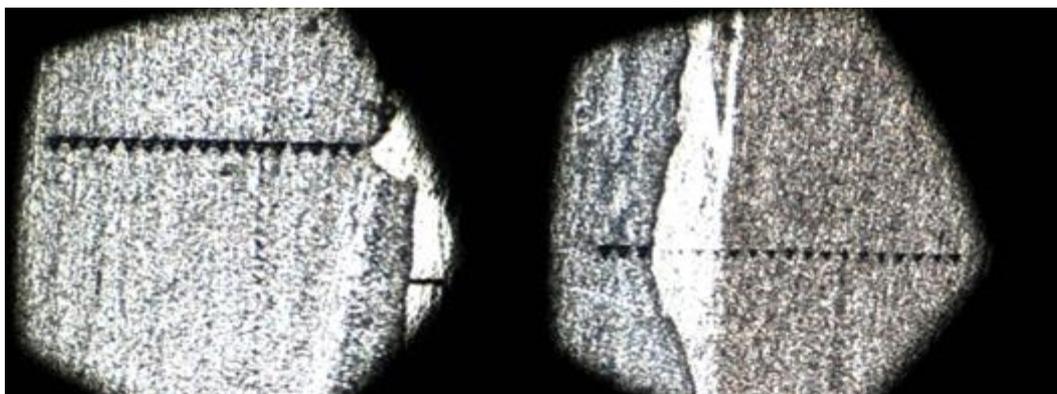


Рисунок 3.15 – Оптическое изображение отпечатков микротвердости образца, полученного на режиме: сила ток 9 мА и L = 1,5 мм

Значения микротвердости и модуля упругости по поперечному сечению образца показаны в таблице 3.4

Таблица 3.4

Значения микротвердости и модуля упругости по поперечному сечению образца

№	HV _{0,1} , МПа	E, ГПа	Фазы	Среднее значение HV _{0,1} , МПа	Среднее значение E, МПа
1	867	88	Алюминий	919	92
2	806	83			
3	898	86			
4	909	85			
5	980	91			
6	934	8			
7	937	87			
8	959	87			
9	861	83			
10	862	85			
11	856	85			
12	823	81			
13	886	87			
14	916	89			
15	1024	96			

16	920	97			
17	880	92			
18	858	89			
19	912	87			
20	1282	119			
21	5549	166	Интерметаллид	4606	160
27	4454	163			
28	3817	152			
29	2167	126	Титан	2154	135
30	1768	123			
31	2066	130			
32	1983	129			
33	2077	130			
34	2194	134			
35	2764	150			
36	2127	135			
37	2418	145			
38	2284	143			
39	2241	139			
40	2203	146			
41	1710	122			

В образце (рисунок 3.15) присутствуют 3 основные зоны: зона чистого алюминия (слева), зона интерметаллических соединений (посередине) и зона чистого титана (справа). По отпечаткам можно первоначально определить твердость отдельных веществ. Интерметаллические соединения являются самыми твердыми – отпечатки в этой зоне самые маленькие и разделяют отпечатки микротвердости алюминия и титана.

Значения микротвердости интерметаллида со средним значением 4606 МПа. И также измерение микротвердости алюминия и титана со средними значениям 919 МПа и 2154 МПа, соответственно.

Расстояние 50 нм между каждой точкой измерения может привести к более низкому значению интерметаллида из-за того, что точка измерения

расположена точно на стыке двух зон, то есть в зоне перехода алюминия в интерметаллид или интерметаллида в алюминий.

Резкое увеличение, а затем уменьшение значений интерметаллического соединения хорошо видно на графиках (рисунок 3.16 б, в), что свидетельствует о появлении при использовании метода ЕВМ промежуточного слоя из новых фаз на границе алюминия и титана с физико-механическими свойствами, намного превосходящими свойства исходного материала, т.е. фаз $TiAl$ и Al_3Ti , что показал рентгеновский анализ.

На втором этапе эксперимента микротвердость измерялась только в слое интерметаллидов в образцах, полученных при разной силе тока и длине проволоки в ванне расплава 1.5 мм (таблица 3.5) и силе тока 9,5 мА и разной длине проволоки в ванне расплава (таблица 3.6).

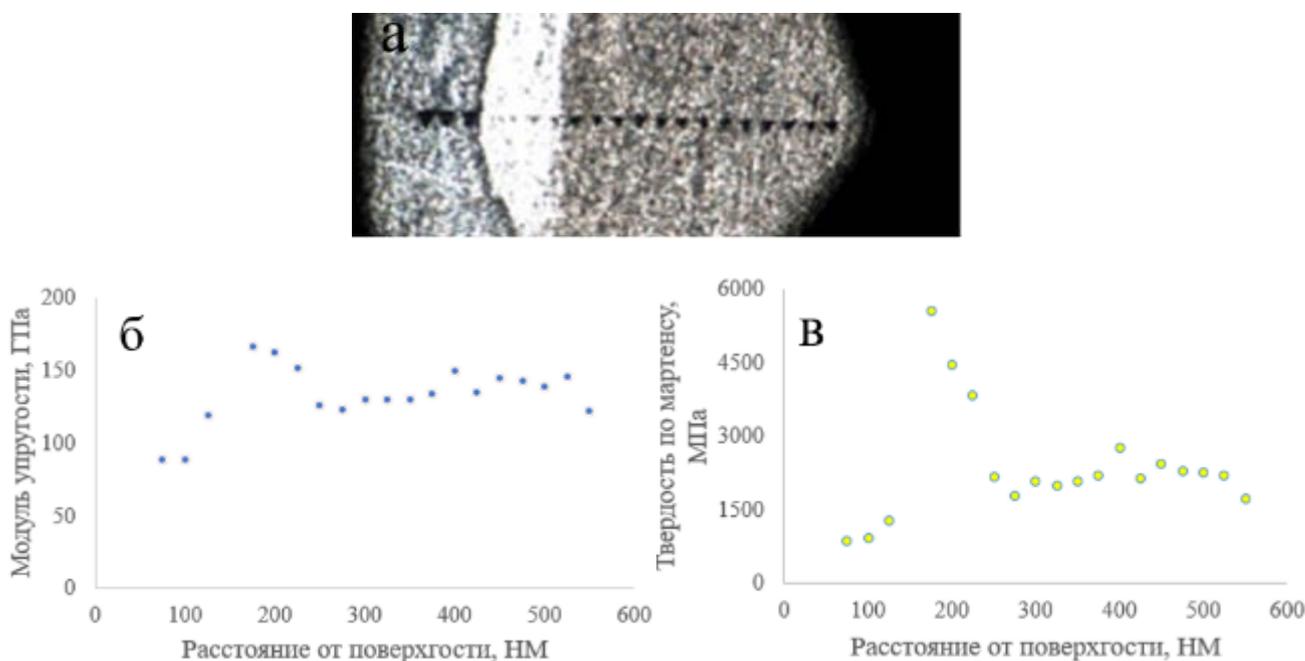


Рисунок 3.16 – Оптическое изображение исследуемого образца с отпечатками нанотвердомера (а), график изменения значений модуля упругости (б) и значений нанотвердости (в)

В таблице 3.5 показаны значения микротвердости и модуля упругости интерметаллов при разной силе тока.

Таблица 3.5

Значения микротвердости и модуля упругости в слое интерметаллидов при разной силе тока ЕВМ

6.5 мА			8.0 мА			9.5 мА		
№	HV, МПа	E, ГПа	№	HV, МПа	E, ГПа	№	HV, МПа	E, ГПа
1	3675	188	1	2788	82	1	5351	167
2	3113	136	2	4070	105	2	5971	176
3	5578	190	3	4140	104	3	5042	159
4	3099	164	4	4318	108	4	2400	108
5	2178	146	5	4540	107	5	2938	135
6	3157	172	6	4956	110	6	3293	143
7	5313	187	7	3923	100	7	5805	172
8	3986	169	8	4375	102	8	6831	182
9	3527	153	9	3812	93	9	6618	177
10	2843	154	10	4375	103	10	6986	187
Среднее значение	3647	166		4187	102		5124	160

Из таблицы видно, что интерметаллические соединения имеют различную микротвердость при разных токах, и чем выше ток, тем выше твердость, что можно объяснить тем, что в образцах с более высокой концентрацией соединений интерметаллические соединения менее склонны к диффузии в алюминиевые и титановые группы, таким образом, сохраняя

высокую чистоту интерметаллических соединений, что приводит к увеличению твердости.

В рисунке 3.17 показан график зависимости микротвердости интерметаллида от силы тока.

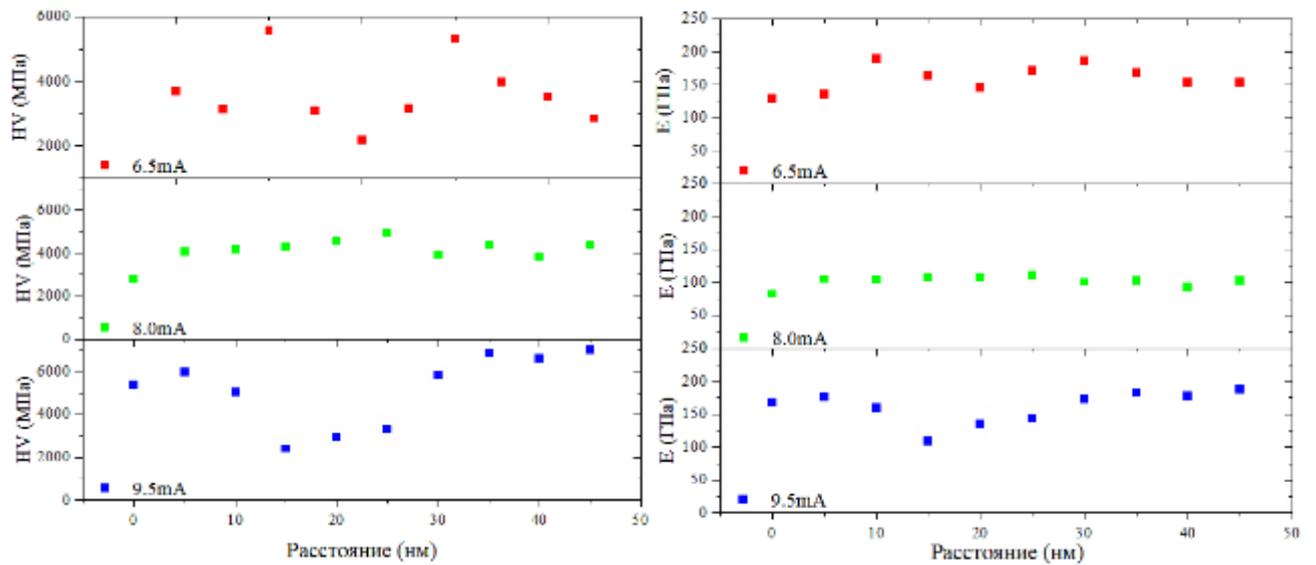


Рисунок 3.17 – Зависимость микротвердости и модули упругость в слое интерметаллидов от силы тока.

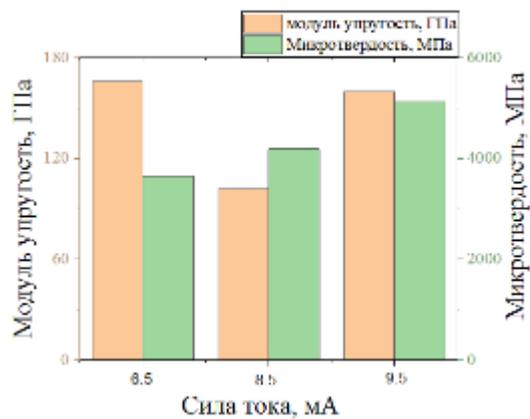


Рисунок 3.18 – График среднего значения модули упругость и микротвердости в слое интерметаллидов от силы тока.

Проведено измерение микротвердости и модули упругости в слое итерметаллидов при силе тока 9,5 мА и разной длине проволоки в ванне расплава – 1,5 мм и 2.0 мм (таблица 3.6).

Таблица 3.6.

Значение микротвердости и модуля упругости в слое интерметаллидов при разной длине проволоки в электронном пучке

Длина проволоки, мм	HV _{0,1} , МПа		E, ГПа	
1.5	5351	среднее значение 5124	167	среднее значение 160
	5971		176	
	5042		159	
	2400		108	
	2938		135	
	3293		143	
	5805		172	
	6831		181	
	6618		177	
	6986		187	
2.0	7284	среднее значение 8179	293	среднее значение 286
	7694		282	
	8589		276	
	8239		295	
	9089		285	

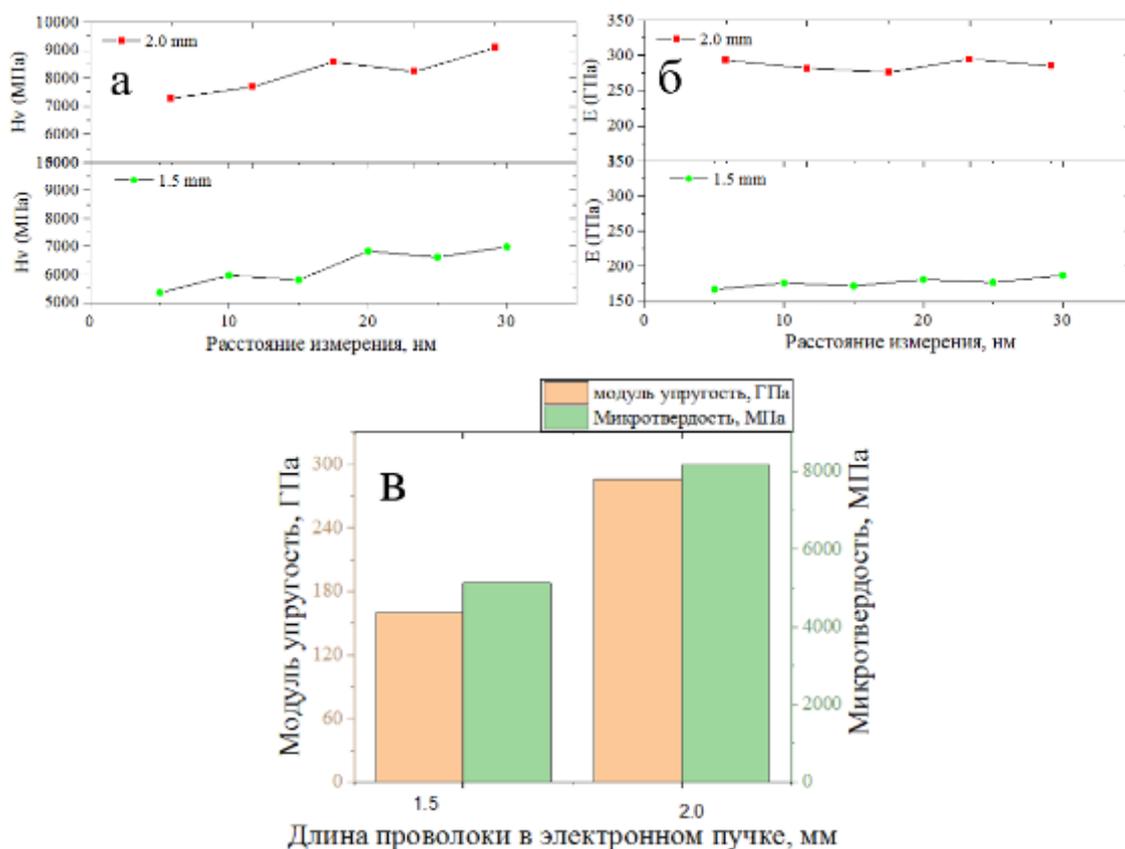


Рисунок 3.19. – Зависимость микротвердости (а) и модули упругость (б) и гистограмма, полученных средних значений (в) в слое интерметаллида зависимости от длины проволоки в электронном пучке.

Сравним, полученные значения микротвердости, с данными в работах других исследователей (таблица 3.7).

Таблица 3.7

Значения микротвердости интерметаллида TiAl

Способ получения	Микротвердость, МПа	Состав образца	Источник
ЕВМ	3530	Ti-47Al-2Cr-2Nb	[55]
Слиток	2941	Ti-48Al	[56]
Литье с вакуумным отсосом	5098	Ti47Al	[57]
СЛС	4901	Ti17 + TiAl	[58]
Направленная кристаллизация	3039	Ti-49Al	[59]

EBM	3922	TiC/Nb-TiAl	[60]
Слиток	2745	γ -TiAl	[61]
Горячая экструзия	3578	γ -TiAl	[61]
Слиток	2843	TiAl	[62]
EBM	3333	Ti-47Al-2Cr-2Nb	[63]
Порошковая металлургия	6176	Al ₃ Ti/Al ₂ O ₃ /Al	[64]
Горячее изостатическое прессование	5539	Ti-6Al-4 V	[65]
Сварка взрывом	5500	TiAl	[66]
Вакуумное спекание	5900	Al ₃ Ti	[67]
Вакуумное спекание	5600	Al ₃ Ti	[68]

Значение микротвердости фазы Al₃Ti выше, чем у фазы TiAl в случае их получения в равновесных условиях, как показано в работах. Однако при изменении условий получения структуры интерметаллидов, например, в условиях высоких скоростей охлаждения или дополнительного внешнего воздействия без изменения фазового состава микротвердость может меняться.

Исходя из полученных свойств и морфологии и объема зоны формирования интерметаллидов в монослоях, полученных EBM, можно заключить, что для обеспечения формирования компактного материала и для дальнейшего наращивания 3D изделий следует выбрать следующие режимы: сила тока 8 мА или 9,5 мА, длина проволоки в электронном пучке 1,5 или 2 мм.

ВЫВОДЫ

1. В данном исследовании были получены титан-алюминиевые интерметаллические соединения на основе технологии электронно-лучевой плавки алюминиевой проволоки на подложку из титана.

2. С увеличением силы тока и длины проволоки в электронном пучке улучшается морфология поверхности и возрастает относительная площадь интерметаллида в составе образца. С увеличением силы тока средний размер зерна увеличивается, но не значительно.

3. Проведен рентгенофазовый анализ образцов, показано, что в образцах образовались интерметаллиды $TiAl$ и Al_3Ti , имеющие высокие значения микротвердости от 4600 МПа. Появление $TiAl_2O_5$ в результатах может быть связано с проблемой вакуумной среды или с образованием оксидов в контакте с воздухом, когда проводилось шлифование поверхности.

4. Выбраны режимы для обеспечения формирования компактного материала и для дальнейшего наращивания 3D изделий: сила тока 8 мА или 9,5 мА, длина проволоки в электронном пучке 1.5 или 2 мм. Это обусловлено тем, что при этих режимах формируются образцы с лучшей морфологией поверхности и относительной площадью интерметаллида в составе образца.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
4БМ01	ЛЮ Юаньсюнь

Школа	ИШНПТ	Отделение	Материаловедение
Уровень образования	Магистратура	Направление/ специальность	22.04.01 Материаловедение и технологии материалов

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	- стоимость выполняемых работ, материальных ресурсов, согласно применяемой техники и технологии, в соответствии с рыночными ценами по городу Томску; - ресурсы СО РАН ИФПМ (лаборатория)
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	- районный коэффициент- 1,3; - прочие расходы – 10%.
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	- общая система налогообложения; - страховые взносы во внебюджетные фонды 30%

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	Проведение предпроектного анализа. Определение целевого рынка и проведение его сегментирования. Выполнение SWOT-анализа проекта
2. <i>Определение возможных альтернатив проведения научных исследований</i>	Определение целей и ожиданий, требований проекта. Определение заинтересованных сторон и их ожиданий.
3. <i>Планирование процесса управления НИИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	Составление календарного плана проекта. Определение бюджета НИИ
4. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	Интегральный финансовый показатель; Интегральный показатель ресурсоэффективности; Интегральный показатель эффективности;

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. <i>Оценка конкурентоспособности технических решений</i>	
2. <i>Матрица SWOT</i>	
3. <i>График проведения и бюджет НИИ</i>	
4. <i>Расчёт денежного потока</i>	
5. <i>Потенциальные риски</i>	
6. <i>Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИИ</i>	

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
---	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОСГН	Гасанов М.А.	д.э.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ01	Лю Юаньсюнь		

4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

4.1. Введение

В этом разделе магистерской диссертации рассмотрены вопросы, касающиеся финансового менеджмента, ресурсоэффективности и ресурсосбережения исследовательской работы. Целью этого раздела является определение перспективности и успешности научно-исследовательского проекта на тему: Исследование интерметаллидов системы Ti-Al, полученных электронно-лучевой аддитивной технологией. Для достижения вышеупомянутой цели необходимо выполнить следующие задачи:

- Разработать общую экономическую идею проекта, сформировать концепции проекта;
- Организовать работы по научно-исследовательскому проекту;
- Определить возможные альтернативные проведения научных исследований;
- Оценить коммерческий потенциал и перспективность проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения;
- Определить ресурсную (ресурсосберегающую), финансовую, бюджетную, социальную и экономическую эффективность исследования.

4.2. Анализ конкурентных техничских решений с позиции рескуроэффktivности и ресурсосбережения

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить направления для ее будущего повышения. Хотя металлические сплавы обладают превосходными свойствами и легко обрабатываются в различные детали, и при этом имеют достаточную прочность, но в настоящее время рабочее оборудование используется во все более жестких условиях (высокая температура, агрессивные среды). В связи с этим перспективной задачей развития энергоэффективности использования металлических сплавов является получение новых высокотемпературных конструкционных материалов для жестких условиях. На сегодняшний день в глобальной экономике особое внимание уделяется изучению вопроса свойства использования интерметаллидов. А именно интерметаллид системы Al-Ti, Он обладает хорошей термостойкостью и низкой плотностью и широко используется в области авиации и автомобилестроения. Один из перспективных методов компактирования является электронно-лучевая печать в англоязычных научных изданиях этот метод называется Electron-beam melting (EBM). Такой метод с высокой плотностью энергии в 3D-печати, электронно-лучевая печать может печатать некоторые тугоплавкие металлы, такие как титан, что позволяет производить интерметаллические соединения титан-алюминий. Во время процесса печати на производительность образца влияют величина тока и расстояние между ваннами с проволочным каналом.

Данный анализ выполним с помощью оценочной карты, которая приведена в таблице 4.1.

Таблица 4.1. Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерия оценки	Все критерия	Баллы		Конкурентоспособности	
		Б _ф	Б _{к1}	К _ф	К _{к1}
1	2	3	4	5	6
Технические критерии оценки ресурсоэффективности					
Повышение производительности труда пользователя	0,20	4	3	0,8	0,6
Простота технологии	0,10	3	2	0,3	0,2
Энергоэкономичность	0,2	5	3	0,8	0,6
Надежность	0,05	4	4	0,2	0,2
Уровень шума	0,05	3	3	0,15	0,15
Экологичность материала	0,10	4	3	0,4	0,4
Область применения покрытия	0,10	3	2	0,3	0,3
Экономические критерии оценки эффективности					
Конкурентоспособность продукта	0,1	4	2	0,4	0,2
Цена	0,05	3	3	0,4	0,45
Финансирование научной разработки	0,05	4	2	0,2	0,1
Итого	1	37	27	3,95	3,0

Расчет конкурентоспособности, на примере актуальности исследования, определяется по формуле:

$$K = \sum V_i + B_i$$

Где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

V_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – балл показателя.

$$K = \sum V_i + B_i = (0,2 \times 4) + (0,1 \times 3) + (0,2 \times 5) + (0,05 \times 4) + (0,05 \times 3) + (0,1 \times 4) + (0,1 \times 3) + (0,1 \times 4) + (0,05 \times 3) + (0,05 \times 4) = 3,9$$

Проведенный анализ конкурентных технических решений показал, что исследование является наиболее актуальным и перспективным, имеет конкурентоспособность.

4.3. SWOT – анализ

Аббревиатуры SWOT анализа расшифровываются как: Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы).

SWOT - анализ – это один из самых эффективных инструментов в стратегическом менеджменте. Он применяется для исследования внешней и внутренней среды проекта. Это анализ сильных и слабых сторон организации, а также возможностей и угроз со стороны внешней окружающей среды. Сильные и слабые стороны являются факторами внутренней среды объекта анализа (то есть тем, на что сам объект способен повлиять); возможности и угрозы являются факторами внешней среды (то есть тем, что может повлиять на объект извне и при этом не контролируется объектом). SWOT-анализ является предварительным исследовательским этапом при составлении стратегических планов, разработке стратегических целей и задач компании.

В таблице 4.2 (матрица SWOT) более подробно изложены сильные и слабые стороны исследовательского проекта, а также возможности и угрозы.

Таблица 4.2 – Матрица SWOT

	Сильные стороны Научно исследовательского проекта:	Слабые стороны научно исследовательского проекта:
	<p>С1. Возможность производства деталей сложной формы за короткое время;</p> <p>С2. Высокая работоспособность изделия;</p> <p>С3. Система сочетающая в себе преимущества массового производства;</p> <p>С4. Изделия не требуют</p>	<p>Сл1. Отсутствие прототипа научной разработки;</p> <p>Сл2. Сложная технология подбора режимов сплавления;</p> <p>Сл3. Относительно высокая стоимость расходных материалов;</p> <p>Сл4. Вероятность сбоя программы САД моделей;</p>

	дополнительных этапов обработки;	
<p>Возможности: В1. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ (т.е. использование научного оборудования); В2. Возможность внедрения технологии в производство; В3. Возможность участия в грантах, для повышения производительности изделия; В4. Появление дополнительного спроса на новый продукт;</p>	<p>С1 В2. Внедрения технологии в производство за счет кратковременной производительности; С2В2. Возможность работы в цикле многосерийного производства; С4 В3. участие в грантах приводят к улучшению высокой работоспособности изделия</p>	<p>В1 Сл2.позволит на ранних стадиях исследования отработку и подбор режимов для сплавления металлических материалов;</p>
<p>Угрозы: У1. Вероятность появления более высокооплачиваемой предложений на рынке, так как в данном направлении ведется большое количество исследований. У2. Отсутствие оборудования для массового производства; У3.Несвоевременное Финансовое обеспечение научного исследования со стороны государства приводит к несвоевременно выполнению заказов изделия;</p>	<p>У1 С1. Возможность изменить состав для повышения конкурентоспособности новыми предложениями на рынке. У3 С4. Появление резервных средств за счет экономии материала</p>	<p>У3 Сл4. длительный простой производства. У2 Сл1. Нежелание крупных предприятий сотрудничать в условиях отсутствия прототипа и оборудования массового производства</p>

Но несмотря на все преимущества проекта, есть и слабые стороны. В рамках процессов инициации определяются изначальные цели и содержание и фиксируются изначальные финансовые ресурсы. Определяются внутренние и внешние заинтересованные стороны проекта, которые будут взаимодействовать, и влиять на общий результат научного проекта.

4.4. Оценка готовности проекта к коммерциализации

На какой бы стадии жизненного цикла не находилась научная разработка полезно оценить степень ее готовности к коммерциализации и выяснить уровень собственных знаний для ее проведения (или завершения). Для этого необходимо заполнить специальную форму, содержащую показатели о степени проработанности проекта с позиции коммерциализации и компетенциям разработчика научного проекта. Перечень вопросов приведен в таблице 4.3.

Таблица 4.3 Бланк оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации

№ п/п	Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
1	Определен имеющийся научно-технический задел	4	4
2	Определены перспективные направления коммерциализации научно-технического задела	3	5
3	Определены отрасли и технологии (товары, услуги) для предложения на рынке	3	4
4	Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок	4	4
5	Определены авторы и осуществлена охрана их прав	4	4
6	Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	4	3
7	Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	3	4
8	Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	4	4
9	Определены пути продвижения научной разработки на рынок	3	4
10	Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	5	4
11	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	3	3
12	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	2	3
13	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	3	5

14	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	3	4
15	Проработан механизм реализации научного проекта	5	5
	ИТОГО БАЛЛОВ	53	57

Итоговые значения проработанности научного проекта и знания у разработчика лежат в диапазоне от 40 до 50, что говорит о средней перспективности проекта. Многие аспекты вывода продукта на рынок не были учтены, а также проявляется недостаток знаний.

4.5. Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования

Перспективы этого научного исследования должны быть на уровне средних, а разработчики обладать достаточным опытом, чтобы иметь возможность коммерциализировать его. Поэтому необходимо создать собственную патентно-лицензионную торговлю.

4.6. Инициация проекта

В рамках процессов инициации определяются изначальные цели и содержание и фиксируются изначальные финансовые ресурсы. Определяются внутренние и внешние заинтересованные стороны проекта, которые будут взаимодействовать, и влиять на общий результат научного проекта.

4.7. Цели и результат проекта

В данном разделе необходимо привести информацию о заинтересованных

сторонах проекта, иерархии целей проекта и критериях достижения целей в таблице 4.4

Таблица 4.4 Для получения результатов заинтересованы следующие стороны

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
Университет	Наличие НИОКР
Магистрант	Защита магистерской диссертации с присвоением степени магистра.
Потребители	Повышения качества изделия с одновременным снижением ресурсозатрат
государство	Возможность импортозамещения

В таблице 4.5 представлена информация о иерархии целей проекта и критериях достижения целей.

Таблица 4.5 цели и результат проекта

Цели проекта	<ol style="list-style-type: none"> 1. Создание макета установки ЕВМ печати т отработка его работоспособности на примере печати интерметаллид TiAl. 2. Отработка режимов ЕВМ печати и получение однослойных и многослойных образцов. 3. Исследовать миероструктуру и фазовый состав образца. 3. Исследовать структуру и свойства полученных образцов.
Ожидаемые результаты проекта	Получение монолитных образцов Ti-Al без макродефектов таких, образца будут отвечать всем технологическим свойствам, необходимые для двигателя, также прочность изделия позволяют заменить дорогие на более недорогой, но не уступающие по качеству.
Критерии приемки результата проекта	Законченная научно-исследовательская работа, автор которая имеют список публикаций и участие на международных конференциях.

Требования к результату проекта	Требование:
	Результат проекта должен иметь актуальное теоретическое и практическое значение
	Выполнения проекта в срок

В данном пункте составляется полный перечень проводимых работ, определяются их исполнители и рациональная продолжительность. Хронологически упорядоченные вышеуказанные данные сведены в таблицу 4.6.

Таблица 4.6. Контрольные события проекта

Контрольное событие	Дата	результат	Состав участников(ФИО ответственных исполнителей)
Обсуждение плана проекта	01,01,22	Утверждение участников исследования	Ковалевская Ж.Г. Лю Юаньсюнь
Сбор необходимой информации	01,02,22	Лист литературного обзора	Лю Юаньсюнь
Подготовка литературного обзора	18,02,22	Отчет по изученной литературе	Лю Юаньсюнь
Подготовка материалов	30,02,22	Чистый алюминий и титан	Лю Юаньсюнь
Получение образцов	14,03,20	Образец	Лю Юаньсюнь
Исследование полученного образцов	20,04,22	Исследуемые образцы, иллюстрации	Ковалевская Ж.Г. Лю Юаньсюнь
Оформление результатов исследования	08,05,22	Диссертация	Лю Юаньсюнь
Защита ВКР	15,06,22	диплом	Лю Юаньсюнь

Диаграмма Ганта – это тип столбчатых диаграмм (гистограмм), который используется для иллюстрации календарного плана проекта, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

График строится в виде табл. 4.7. с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени выполнения научного проекта. При этом работы на графике следует выделить различной штриховкой в зависимости от исполнителей, ответственных за ту или иную работу.

Таблица 4.7 Календарный план-график проведения НИОКР

Код работы (из ИСР)	Вид работ	Исполнители	Т _к , ч.	Продолжительность выполнения работ																		
				Янв.			Февр.			Март			Апр.			Май.			Июнь			
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1			
1	Обсуждение плана проекта	Р, С	5	■	■	■																
2	Сбор необходимой информации	Р	10	■	■	■	■	■	■													
3	Подготовка литературного обзора	С	10				■	■	■													
4	Подготовка материалов	Р	10				■	■	■													
5	Получение образцов	С	40							■	■	■										
6	Исследование полученного образцов	С	20										■	■	■	■	■	■				
7	Оформление результатов исследования	С	20																■			
8	Защита ВКР	С	20																■			

■ – Руководитель (Р)

■ – Студент (С)

4.8. Ограничения и допущения проекта

Ограничения проекта – это все факторы, которые могут послужить ограничением степени свободы участников команды проекта, а также «границы проекта» -

параметры проекта или его продукта, которые не будут реализованных в рамках данного проекта. Эту информацию представить в табличной форме (табл. 4.8).

Таблица 4.8 Ограничения проекта

Фактор	Ограничения
Бюджет проекта	700000 рублей
Источник финансирования	НИТПУ
Сроки проекта	01.01.2021 – 31.05.2022
Фактическая дата утверждения плана управления проектом	12.12.20121
Плановая дата завершения проекта	31.05.2022

4.9. Расчет затрат

В состав затрат на создание проекта включается величина всех расходов, необходимых для реализации комплекса работ, составляющих содержание данной разработки. Расчет сметной стоимости ее выполнения производится по следующим статьям затрат:

- Материалы и покупные издания
- Заработная плата
- Расходы на электроэнергию
- Прочие услуги (сторонних организаций)
- Амортизационные расход

4.9.1. Расчет затрат на мателталы

К данной статье расходов относится стоимость материалов и оборудование. В стоимость материальных затрат включают транспортно-заготовительные расходы (3 – 5 % от цены). Расходы, связанные с приобретением сырья,

материалов и комплектующих изделий, а также транспортно-заготовительные расходы для проведения исследования представлены в таблице 4.9.

Таблица 4.9 расчет затрат на материалы

Наименование материалов	Марка	Кол-во	Цена за ед., Руб	Сумма, руб
Проволока алюминий	АД1	1 кг	462	462
Проволока титан	2В	1 кг	8600	8600
Титановая пластинка		3 шт	300	900
Наждачная бумага	P60, P120, P240	10 шт	25	250
Электроэнергия				1450,37
Всего за материалы				11662,37

4.9.2. Расчет затрат на оборудование

Во время использования машины, машина неизбежно будет иметь старое явление, поэтому мы должны рассчитать старые потери оборудования. Затраты на амортизацию оборудования рассчитываются по формуле:

$$Z_{об} = (Ц \times F_{\phi}) / (F_{Н} \times F_{СС})$$

где Ц – цена оборудования, руб.;

$F_{Н}$ – номинальный фонд времени (рабочее время в году), ч;

$F_{Н} = 250 \text{ дней} = 6000 \text{ ч.}$

$F_{СС}$ – срок службы оборудования, год; F_{ϕ} – фактическое время занятости оборудования, ч.

Вычисления амортизация оборудования предсталена в таблице 4.10.

Таблица 4.10 Расчет смортизационных расходов

№	Наименование оборудования	Ц, руб	Фсс, год	Фф.ч	З _{об} , руб
1	ЕВМ установка	75000	25	5	2,5
2	Вытяжной шкаф	26230	5	20	17,48
3	Полировальный станок «Saphir 520»	95000	10	10	15
4	Микроскоп «Axiovert 200mat»	34795	10	1	0,6
5	Компьютер	35000	5	10	12,6
Итого:					48,18

4.9.3. Расчет заработной платы

4.9.3.1. Основная заработная плата

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, рабочих макетных мастерских и опытных производств, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы оплаты труда. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы (размер определяется Положением об оплате труда). Расчет основной заработной платы сводится в табл. 4.11.

Для инженера 0,5 ставки по тарифу зарплата составляет $Q_{инж}=1702,14$ руб/мес, для руководителя (0,5 ставки) $Q_{рук}=2178,9$ руб/мес.

Основная заработная плата руководителя (профессора) рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \times T_{раб}$$

где $Z_{осн}$ — основная заработная плата одного работника;

$T_{раб}$ — продолжительность работ, выполняемых научно-

техническим работником, раб. дн.;

$Z_{дн}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{дн} = (Z_m \cdot M) / F_d$$

где Z_m – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года: при отпуске в 24 раб. дня $M = 11,2$ месяца, 5-дневная неделя;

F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-

Технического персонала, раб. Дн. Действительный годовой фонд времени одного рабочего составляет 1790 ч при 307 рабочих днях в году и 40 часовой рабочей неделе.

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_m = Z_{мс} (1 + K_{пр} + K_d) \times K_r$$

где $Z_{мс}$ – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$K_{пр}$ – премиальный коэффициент, равный 0,3 (т.е. 30% от $Z_{тс}$);

K_d – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2 - 0,5

(в ТПУ – надбавка по статье «причисление к объектам культурного наследия» 30-50% от $Z_{тс}$ в НИИ и на промышленных предприятиях – за расширение сфер обслуживания, за профессиональное мастерство, за вредные условия: 15-20% от $Z_{тс}$; K_r – районный коэффициент, равный 1,3.

Таблица 4.11 Расчет заработной платы

Исполнители	Z_b , руб	$K_{пр}$	K_d	K_r	Z_m	$Z_{дн}$	$T_{раб}$	$Z_{осн}$
НР	2178,9	0,3	0,2	1,3	33664	635,169	47	278521
ИНЖ	1702,14	0,3	0,2	1,3	26298	496,188	23	114120
Итого								392641

4.9.3.2. Дополнительная заработная плата исполнителей темы

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций (при исполнении государственных и общественных обязанностей, при совмещении работы с обучением, при предоставлении ежегодного оплачиваемого отпуска и т.д.). Определение величины дополнительной заработной платы $Z_{\text{доп}}$ ведется по формуле:

$$Z_{\text{доп}} = Z_{\text{осн}} \cdot k_{\text{доп}},$$

где $k_{\text{доп}} = 0,12$ – коэффициент дополнительной заработной платы;

Результат вычислений приведены в таблице 4.12.

Таблица 4.12 – Заработная плата исполнителей НТИ

Исполнитель	$Z_{\text{доп}}$
Руководитель	33442
Инженер	13694
Итого:	49550

4.9.4. Отчисления на социальные нужды

Статья включает в себя отчисления во внебюджетные фонды.

$$Z_{\text{внеб}} = (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}) \cdot k_{\text{внеб}}$$

где $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений во внебюджетные фонды. Общая ставка взносов составляет в 2022 году – 30%

$$Z_{\text{внеб}} = 442191 \times 0,3 = 132657 \text{ руб}$$

4.9.5. Накладные расход

В эту статью включаются затраты на управление и хозяйственное обслуживание, которые отнесены непосредственно на конкретную тему.

Накладные расходы составляют 80-100 % от суммы основной и дополнительной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнении темы. Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле:

$$C_{\text{накл}} = k_{\text{накл}} \times (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}) / 5$$

где $k_{\text{накл}}$ – коэффициент накладных расходов

$$C_{\text{накл}} = 442191 \times 0,3/5 = 26531 \text{ руб}$$

4.9.6. Бюджетная стоимость НИР

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции.

Таблица 4.13 Бюджет затрат НИР

№	Наименование статьи	Затраты, руб	
1	Сырье, материалы, комплектующие изделия и покупные полуфабрикаты	11662,37	11662,37
2	Специальное оборудование для научных (экспериментальных)	48180	48180
3	Основная заработная плата	278520	114120
4	Дополнительная заработная плата	33442	13694
5	Отчисления во внебюджетные фонды	132657	132657
6	Накладные расходы	26531	26531
Итого:		530992	346844

Таким образом общая себестоимость НИР равняется 877836 руб.

4.9.7. Организационная структура проекта

Для выбора наиболее подходящей организационной структуры можно использовать таблица 4.14.

Таблица 4.14 Выбор организационной структуры научного проекта

Критерии выбора	Функциональная	Матричная	Проектная
Степень неопределенности условий реализации проекта	Низкая	Высокая	Высокая
Технология проекта	Стандартная	Сложная	Новая
Сложность проекта	Низкая	Средняя	Высокая
Взаимозависимость между отдельными частями проекта	Низкая	Средняя	Высокая
Критичность фактора времени (обязательства по срокам завершения работ)	Низкая	Средняя	Высокая
Взаимосвязь и взаимозависимость проекта от организаций более высокого уровня	Высокая	Средняя	Низкая

В данном случае выбор лежит к проектной структуре проекта из-за особенностей разработки. Составляющая проекта является модульные системы, работающие в постоянном взаимодействии с другими модулями. Также основной причиной выбора проектной структуры является то, что технология проекта является новой, и имеются ограниченные сроки реализации.

4.9.8. План управления коммуникациями проекта

План управления коммуникациями отражает требования к коммуникациям со

стороны участников проекта. Таблица 4.15.

Таблица 4.15 Пример плана управления коммуникациями

№ п/п	Какая информация передается	Кто передает информацию	Кому передается информация	Когда передает информацию
1.	Статус проекта	Руководитель проекта	Представителю заказчика	Ежеквартально (первая декада квартала)
2.	Обмен информацией о текущем состоянии проекта	Исполнитель проекта	Участникам проекта	Еженедельно (пятница)
3.	Документы и информация по проекту	Ответственное лицо по направлению	Руководителю проекта	Не позже сроков графиков и к. точек
4.	О выполнении контрольной точки	Исполнитель проекта	Руководителю проекта	Не позже дня контрольного события по плану управления

4.9.9. Реестр рисков проекта

Идентифицированные риски проекта включают в себя возможные неопределенные события, которые могут возникнуть в проекте и вызвать последствия, которые повлекут за собой нежелательные эффекты. Таблица 4.16.

Таблица 4.16 реестр рисков

№	Риск	Потенциальное воздействие	Вероятность наступления (1-5)	Влияние риска (1-5)	Уровень риска*	Способы смягчения риска	Условия наступления
1	Производственные		3	5	средний	Долгосрочные контракты с производителями	Невыполнение планов по производству продукции
2	Конкурентные силы		4	5	высокий	Внедрение системы членства для снижения	У других компаний цены ниже

						отпускной цены	
--	--	--	--	--	--	-------------------	--

4.10. Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Для определения эффективности исследования рассчитан интегральный показатель эффективности научного исследования путем определения интегральных показателей финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

4.10.1. Интегральный показатель финансовой эффективности

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получен в процессе оценки бюджета затрат трех вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принят за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

Интегральный показатель разработки рассчитывается как:

$$I_{\Phi}^p = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\max}}$$

где Φ_{pi} – стоимость i-го варианта исполнения;

Φ_{\max} – максимальная стоимость исполнения.

$\Phi_{\text{текущ.проект}} = 346844$ руб., $\Phi_{\text{исп.2}} = 530992$ руб., $\Phi_{\max} = 700000$ руб.

$$I_{\Phi}^{\text{тек.пр.}} = \frac{\Phi_{\text{тек.пр.}}}{\Phi_{\max}} = \frac{346844}{700000} = 0,50;$$

$$I_{\Phi}^{\text{исп.2.}} = \frac{\Phi_{\text{исп.2.}}}{\Phi_{\max}} = \frac{530992}{700000} = 0,76;$$

В результате расчета консолидированных финансовых показателей по двум вариантам разработки проектируемый вариант считается более приемлемым с

точки зрения финансовой эффективности.

4.10.2. Интегральный показатель ресурсоэффективности

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов выполнения определен путем сравнительной оценки их характеристик, распределенных с учетом весового коэффициента каждого параметра (таблица 4.17).

Таблица 4.17 – Сравнительная оценка характеристик всех вариантов

Объекты исследования Критерии	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Исп. 2
1. Безопасность при использовании установки	0,25	5	5
2. Стабильность работы	0,15	4	4
3. Удобство в эксплуатации	0,3	5	3
4. Механические свойства	0,2	5	4
5. Материалоёмкость	0,1	5	4
ИТОГО	1	4,85	3,95

Расчет интегрального показателя для разрабатываемого проекта:

$$I_{p1} = 0,25 \cdot 5 + 0,15 \cdot 4 + 0,3 \cdot 5 + 0,3 \cdot 5 + 0,2 \cdot 5 + 0,1 \cdot 5 = 4,85;$$

$$I_{p1} = 0,25 \cdot 5 + 0,15 \cdot 4 + 0,3 \cdot 4 + 0,3 \cdot 3 + 0,2 \cdot 4 + 0,1 \cdot 4 = 3,95.$$

4.10.3. Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки

Вычисляется на основании показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{\text{исп.}i} = \frac{I_{\text{р-исп.}i}}{I_{\text{финр}}};$$

$$I_{\text{исп.1}} = \frac{4,85}{0,50} = 9,7; I_{\text{исп.2}} = \frac{3,95}{0,76} = 5,2.$$

Интегральный показатель эффективности определяет расчетную сравнительную эффективность проекта:

$$\mathcal{E}_{\text{ср1}} = \frac{I_i}{I_1};$$

$$\mathcal{E}_{\text{ср1}} = \frac{9,7}{9,7} = 1; \mathcal{E}_{\text{ср1}} = \frac{5,2}{9,7} = 0,53.$$

Далее интегральные показатели эффективности каждого варианта НИР сравнивались с интегральными показателями эффективности других вариантов с целью определения сравнительной эффективности проекта, таблица 4.17.

Таблица 4.17 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Текущий проект	Исп. 2
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,5	0,76
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,85	3,95
3	Интегральный показатель эффективности	9,7	5,2
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1	0,53

4.11. Вывод по разделу

Результатом анализа конкурентных технических решений является выбор одного из вариантов реализации НИР как наиболее подходящего и оптимального по сравнению с другими.

В ходе проделанной работы определены затраты на научно исследовательскую работу. Рационально спланирована занятость каждого из участников и сроки проведения отдельных работ для организации процесса реализации исследовательской работы

В этом разделе анализ различных расчетов затрат, финансовых факторов и т.д. приводит к выводу, что данный проект перспективна.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа 4БМ01		ФИО Лю Юаньсюнь	
Школа	ИШНПТ	Отделение (НОЦ)	ОМ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	22.04.01 Материаловедение и технологии материалов

Тема ВКР:

Исследование интерметаллидов системы Ti-Al, полученных электронно-лучевой аддитивной технологией	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
<p>Введение</p> <p>– Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика) и области его применения.</p> <p>– Описание рабочей зоны (рабочего места) при разработке проектного решения/при эксплуатации</p>	<p>Объект исследования интерметаллид системы Ti-Al полученных электронно-лучевой аддитивной технологией.</p> <p>Область применения авиация и автомобилестроение.</p> <p>Исследования проводились в лаборатории помещений ИФПМ СО РАН.</p> <p>Оборудования называется Электронно-лучевые принтеры, количесвао было один. Оборудование в рабочей зоне состоит из электронно-лучевого принтера, вакуумного генератора и ноутбука. шлифовально-полировальный станок «Saphir 520».</p> <p>Произведен образце Al-Ti с помощью оборудования в виде слой за слоем.</p>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<p>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности при разработке проектного решения</p> <p>– специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</p> <p>– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</p>	<p>– "Трудовой кодекс Российской Федерации" от 30.12.2001 N 197-ФЗ;</p> <p>- ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.</p> <p>- ГОСТ 12.2.033-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ стоя. Общие эргономические требования.</p>
<p>2. Производственная безопасность при разработке проектного решения</p> <p>– Анализ выявленных вредных и опасных производственных факторов</p> <p>– Расчет уровня опасного или вредного производственного фактора</p>	<p><i>Вредные факторы:</i></p> <p>– Отклонение показателей микроклимата</p> <p>– Привышения уровня шума</p> <p>– Недостатки или отсутствия естественного света. Недостаточная освещенность рабочей зоны.</p> <p>Опасные факторы:</p> <p>– производственные факторы, связанные с электрическим током, вызываемым разницей электрических потенциалов, под действие которого попадает работающий;</p>
<p>3. Экологическая безопасность при разработке проектного решения</p>	<p>Влияние на гидросферу посредством слива кислот,щелочей, солей отходов вредных веществ в общую систему канализации.</p> <p>Воздействие на селитебную зону в шум</p>
<p>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях при разработке проектного решения</p>	<p>Возможные чрезвычайные ситуации при выполнении проекта являются:; пожар.</p> <p>Наиболее типичная ЧС – пожар</p>
Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Антоневич Ольга Алексеевна	Кандидат биологических наук		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ01	Лю Юаньсюнь		

5. Социальная ответственность

5.1. Введение

В настоящем разделе магистерской диссертации проведен анализ рабочей среды, оценка рисков и факторов безопасности при выполнении научно-исследовательских работ по заданной теме.

На сегодняшний день в глобальной экономике особое внимание уделяется изучению вопросов свойства использования металлических сплавов. Хотя металлические сплавы обладают превосходными свойствами и легко обрабатываются в различные детали, и при этом имеют достаточную прочность. Но в настоящее время рабочее оборудование используется во все более жестких условиях (высокая температура, агрессивные среды). В связи с этим перспективной задачей развития энергоэффективности использования металлических сплавов является получение новых высокотемпературных конструкционных материалов для жестких условиях.

В данной работы было исследование процесса формирования интерметаллидов из проволоки алюминия и титана методом электронно-лучевой аддитивной технология. А так же оценка строения и свойств получаемого материала.

Рабочим местом является аддитивный центр в ТПУ и площадью комнаты 25м². Оборудование в рабочей зоне состоит из электронно-лучевого принтера, вакуумного генератора и ноутбука. В лаборатории изготавливаются интерметаллические соединения титана и алюминия, используя в качестве основы модели САД. Металлографический анализ и анализ состава экспериментальных образцов проводится в лаборатории ИФЭПМ СО РАН.

5.2. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Работа выполнялась в офисных и лабораторных помещениях лаборатории локальной металлургии в аддитивных технологиях ИФПМ СО РАН, г.Томск. Выполнение некоторых работ сопряжено с вредными и опасными факторами, в связи с чем работодатель по ст.221 ТК РФ [69] обязан предоставить средства индивидуальной защиты. Данное исследование выполняется научными работниками, поэтому на них распространяется действие гл.52 ТК РФ [69].

При поступлении на работу с каждым с сотрудником проводится инструктаж по технике безопасности, что незамедлительно фиксируется в соответствующем журнале.

Основные принципы организации работы по охране труда, структуру и функции органов управления охраной труда, обязанности и ответственность федерального государственного бюджетного учреждения науки института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН) устанавливается положением об организации работы по охране труда в ИФПМ СО РАН. Организация работ по охране труда в ИФПМ СО РАН возлагается на работников отдела охраны труда и техники безопасности, пожарной безопасности, гражданской обороны и чрезвычайных ситуации (ОТ и ТБ, ПБ, ГО и ЧС).

5.2.1. Эргономические требования к правильному расположению и компоновке рабочей зоны.

Эргономическая оценка рабочих мест, в производственных условиях, проводится комплексно согласно методическим рекомендациям Минздрава: «Основные принципы и методы эргономической оценки рабочих мест для

выполнения работ сидя и стоя. Методические рекомендации". Рабочее место соответствует требованиям ГОСТ 12.2.049.78 [70,71].

1. конструкцией рабочего места обеспечено выполнение трудовых операций в пределах зоны досягаемости моторного поля [72].

2. конструкцией производственного оборудования и рабочего места обеспечено оптимальное положение работающего [73].

5.3. Производственная безопасность

Для идентификации потенциальных факторов был использован ГОСТ 12.0.003-2015 «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация» [74]. Перечень опасных и вредных факторов, характерных для проектируемой производственной среды необходимо представить в виде таблицы 5.1.

Таблица 5.1 – Возможность опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003.2015)	Нормативные документы
1. Отклонение показателей микроклимата	СанПиН 1.2.3685-21 "Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания"
2. Привышение уровня шума	ГОСТ 12.1.003-2014 Система стандартов безопасности труда. Шум. Общие требования безопасности
3. Недостаток или Отсутствие естественного света	СП52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение
4. Недостаточная освещенность рабочей зоны	Актуализированная редакция СНиП 23-05-95*
5. Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека	ГОСТ 12.1.045-84 ССБТ. Электростатические поля. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля.

5.3.1. Анализ опасных и вредных производственных факторов

5.3.1.1. Отклонение показателей микроклимата

Микроклимат определяется действующими на организм человека показателями температуры, влажности и скорости движения воздуха. Длительное воздействие неблагоприятных условий на человека ухудшает его самочувствие, снижает производительность труда и приводит к заболеваниям. Оптимальными для микроклимата жилых и общественных помещений в тёплое время года считаются: температура воздуха 22-25°C, относительная влажность 40-60 %, скорость движения воздуха не более 0,25 м/с; в холодное время года эти показатели составляют соответственно 20-22° С, 30-45 % и 0,1-0,15 м/с. Для данной работы всегда в комнате работал и температура в комнате должна в интервале 22 – 25 °С [75].

Нормы для параметров микроклимата установлены санитарными правилами и нормами СанПин 1.2.3685-21 Нормированные значения температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха в рабочей зоне производственных помещений приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 Допустимые параметры микроклимата на рабочем месте

Период года	Температура воздуха, °С		Температура поверхностей, °С	Относительная влажность воздуха	Скорость движения воздуха, м/с	
	ниже оптимальных величин	выше оптимальных величин			Ниже оптимальных величин	Выше оптимальных величин
Холодный	17,0-18,0	21,1-23,0	16,0-24,0	15-75	0,1	0,3

теплый	18,0-19,9	22,1-27,0	17,0-28,0	15-75	0,1	0,4
--------	-----------	-----------	-----------	-------	-----	-----

Температура в рабочей зоне поддерживается отоплением в холодный период и вентиляцией в теплый период.

5.3.1.2. Привышения уровня шума

Шум является одним из наиболее распространенных в производстве вредных факторов. Люди, работающие в условиях повышенного шума, жалуются на быструю утомляемость, головную боль, бессонницу. Настоящий стандарт распространяется на машины, технологическое оборудование и другие источники шума, которые создают в воздушной среде все виды шумов по ГОСТ 12.1.003-2014[76]. Для оценки шума используют частотный спектр измеряемого уровня звукового давления, выраженного в дБ, в октавных полосах частот, который сравнивают с предельным спектром, приведены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 допустимые уровни звукового давления и уровня звука на рабочих местах.

Рабочее место	Уровни звукового давления, дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц							Уровни звука дБ
	63	125	250	1000	2000	4000	8000	
Лаборатория для проведения экспериментальных работ	95	88	81	76	74	71	80	81

Основными источниками шума при выполнении исследовательской работы в помещении являются вентиляторы системы охлаждения, и шлифовально-полировальный станок «Saphir 520».

Шум оказывает на организм человека негативное воздействие и может вызвать различного рода болезненные состояния, в том числе тугоухость и глухоту. Под влиянием шума учащаются пульс и дыхание, повышается расход энергии. Длительное воздействие шума оказывает негативное влияние на центральную нервную систему и психику человека. В результате воздействия шума у человека появляются симптомы переутомления и истощения. Со стороны психики наблюдается подавленное настроение, понижение внимания, задерживаются интеллектуальные процессы, повышается нервная возбудимость. Средства индивидуальной защиты (СИЗ) применяются в том случае, если другими способами обеспечить допустимый уровень шума на рабочем месте не удастся. Средства индивидуальной защиты органов слуха работающих установлены: это противозумные шлемофоны (шлемы), наушники, заглушки, вкладыши.

5.3.1.3. Недостатки или отсутствия естественного света.

Недостаточная освещенность рабочей зоны.

Хорошие условия освещения очень важны для жизни растений. Установлено, что свет, помимо обеспечения зрительного восприятия, воздействует через нервную оптико-вегетативную систему на эндокринную систему, систему формирования иммунной защиты, рост и развитие организма и влияет на многие основные процессы жизнедеятельности,

регулируя обмен веществ и устойчивость к воздействию неблагоприятных факторов окружающей среды [77].

При работе с персональным компьютером в сочетании с работой с нормативной и технической документацией согласно нормам СП 52.13330.2016 регламентируется максимальная искусственная освещенность рабочих мест.

По нормативу СП 52.13330.2016 освещенность на поверхности стола в зоне размещения рабочего документа должна быть 300-500 лк. Освещение не должно создавать бликов на поверхности экрана. Освещенность поверхности экрана не должна быть более 300 лк. Яркость светильников общего освещения в зоне углов излучения от 50° до 90° с вертикалью в продольной и поперечной плоскостях должна составлять не более 200 кд/м, защитный угол светильников должен быть не менее 40° [77]. Коэффициент запаса (Кз) для осветительных установок общего освещения должен приниматься равным 1,4. Коэффициент пульсации не должен превышать 5%.

В цехе применяется искусственное освещение комбинированного типа. Используются люминесцентные светильники типа ОДА, ПВЛ-1. Для создания благоприятных рабочих условий, степень освещенности в производственных помещениях нормируется, норма освещения составляет 300 лк.

Площадь рабочего место располагается 25 м² на 3 этаж, помещение представляет собой комнату размером 5м на 5м, высотой 3м.

Число светильников для цеха определяется по формуле:

$$n = \frac{ESzk}{FUm},$$

где: E – нормированная освещенность, E=300лк;

S – площадь помещения, S = 25 м²;

z – поправочный коэффициент светильника, $z = 1,2$;

k – коэффициент запаса, учитывающий снижение освещенности при эксплуатации, $k = 1,2$;

F – световой поток одной лампы, ЛД 40, $F=2500\text{лм}$;

U – коэффициент использования, $U = 0,55$;

m – число ламп в светильнике, $m = 2$.

$$n = \frac{300 \times 25 \times 1,2 \times 1,2}{2500 \times 0,55 \times 2} = 3,93$$

Расчетное количество ламп ЛД 40 составило 4 штуки. Высота подвеса светильников должна быть не меньше 1 м.

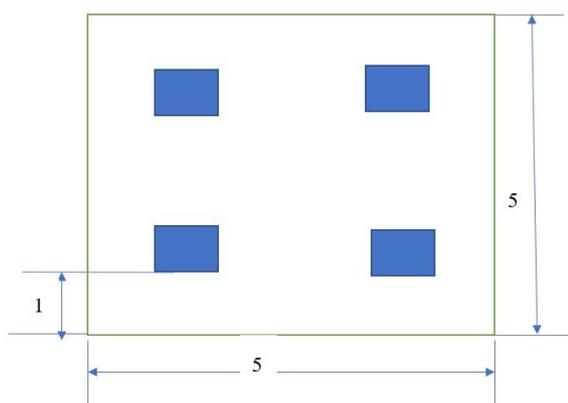


Рис.5.1 Схема освещения

5.3.1.4. Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека

При изготовлении образцов возникает необходимость работы на электрооборудовании, в результате чего создается вероятность прохождения электрического тока через тело человека. Несоблюдение правил ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. «Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов» может привести к опасным последствиям [78]. Опасное и вредное воздействия на людей электрического тока проявляются в виде

электротравм (судороги, остановка сердца, остановка дыхания, ожоги и др.) и заболеваний.

Основным фактором поражения электрическим током в экспериментах является величина тока. Поражение электрическим током в лаборатории может быть вызвано случайным контактом с электрически заряженными деталями или напряжением на металлических частях оборудования.

Максимальный ток, который человеческое тело может выдержать в нормальных условиях, составляет 8 В и 1 мА (постоянный ток) или 2 В, 0,3 мА (переменный ток с частотой 50 Гц) [78].

5.4. Экологическая безопасность

Неизбежно, что любое предприятие, осуществляющее свою деятельность, так или иначе наносит ущерб окружающей среде. В случае с данным проектом основными воздействиями на окружающую среду являются следующие:

- Во время высокотемпературной металлообработки в рабочей камере могут образовываться некоторые вредные газы;
- пожароопасность некоторых материалов;
- Спирт для герметизации.

Защита атмосферы. В процессе экспериментов весь образец находится в высокотемпературной вакуумной среде, которая может выделять некоторые вещества. Сульфиды (содержится в уплотнительной резиновой ленте) Оксиды азота (содержится в высокотемпературной вакуумной камере) [79] Обычно используется вытяжная вентиляция и фильтры для уменьшения выброса этого вещества в атмосферу.

Защита гидросферы. Отходы ПЭВМ содержат большое количество химических элементов первого и второго класса опасности [79]. Свинец (батареи для ноутбуков) Кадмий (резисторы) Медь (кабели) и другие элементы. Все эти отходы после равномерной обработки вывозятся на специальные полигоны, где утечки элементов, возникающие в процессе обработки, просачиваются в почву и загрязняют грунтовые воды. Обычным методом утилизации является помещение опасных веществ в специальную зону утилизации для равномерной утилизации специализированным персоналом.

Защита литосферы. В процессе производства образуется ряд отходов металлические обрезки титан, медь и алюминий, бумага, отработанный спирт, при выбросе эти соединения представляют угрозу для литосферы в виде различных соединений, которые попадают в почву. Они должны быть утилизированы в соответствии с классом опасности или переработаны, чтобы минимизировать воздействие на литосферу [80].

5.5. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Возможные чрезвычайные ситуации при выполнении проекта являются: поражение электрическим током, замыкание электрической цепи, и как следствие, пожар. Для предотвращения ЧС необходимо осуществлять меры по технике безопасности на рабочем месте.

При возникновении ЧС должен быть разработан следующий комплекс мероприятий [81]:

- рассредоточение и эвакуация;
- обеспечение индивидуальными средствами защиты;

– организация медицинской помощи пострадавшим.

В случае чрезвычайной ситуации люди, находящиеся на рабочем месте, должны следовать плану эвакуации, вывешенному на стенах коридоров, и организованно эвакуироваться, в то время как на место происшествия также направляется охранник. Роль охранников заключается в обеспечении исправности коридоров, лестниц и других путей эвакуации.

Вывод

В этой работе учитываются различные нормы трудового права. Рабочая зона организована таким образом, чтобы обеспечить комфортные условия для работы исследователей.

В лаборатории имеется помещение с наилучшими условиями для работы: в комнате площадью 25 м² установлены четыре светильника, обеспечивающие исследователям достаточную освещенность как при искусственном, так и при естественном освещении для достижения наиболее комфортных условий. В лаборатории постоянно поддерживается равновесный микроклимат 22-25 градусов по Цельсию, даже когда персонал может находиться под воздействием микроклиматических параметров. Оборудование в помещении оборудовано таким образом, чтобы разность электрических потенциалов, вызванная токами, находилась в пределах норм безопасности.

В случае крупного аварийного пожара в лаборатории лаборатория относится к категории взрыво- и пожароопасности D. В работе определена схема пожарного инструктажа на случай пожара, и необходимые меры принимаются обычным образом.

Результаты анализа показывают, что компьютеры, отработанный спирт, пластмассы и горячий воздух, которые часто используются в лаборатории, могут оказывать негативное воздействие на окружающую среду, и предлагаются соответствующие меры по их утилизации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Liu C.T., Stiegler J.O., Froes F.H. Ordered Intermetallics. // ASM International, Metals Handbook, Tenth Edition. – 1990. – V.2. – pp. 913-942
2. Гринберг Б.А., Иванов М.А. Интерметаллиды Ni_3Al и $TiAl$: микроструктура, деформационное поведение. Екатеринбург: УрО РАН, – 2002. – 359 с.
3. Sauthoff G. Intermetallics // G. Sauthoff. – Weinheim: VCH – 1995. – 165 pp.
4. Лазуренко Д.В. Структура и свойства слоистых композиционных материалов с интерметаллидной составляющей. Специальность 05.16.09 – Материаловедение (в машиностроении) Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Новосибирск – 2020.
5. Leyens, Christoph and Peters, Manfred. Titanium and Titanium Alloys// Weinheim: WILEY-VCH. –2003. – 499 pp.
6. Zhang G.Q, Liu Y.F, Liu J.N и др. Ход исследований $TiAl$ процесса интерметаллической порошковой металлургии // Аэрокосмические технологии производства. – 2019. – №62(22): 38-42.(Оригинал:<http://www.amte.net.cn/CN/article/downloadArticleFile.do?attachType=PDF&id=3916>)
7. Lundström D. Creep Behaviour of Titanium Aluminides and its Relation to Phase Distributions and Dislocation Structures // Göteborg: Doctoral thesis, Chalmers University of Technology – 2001.
8. Clemens H., Mayer S. Intermetallic titanium aluminides in aerospace applications – processing, microstructure and properties // Materials at High Temperatures, – 2016. - V. 33. – V. 4-5. – pp. 560-570. <https://doi.org/10.1080/09603409.2016.1163792>.

9. Kothari K., Radhakrishnan R., Wereley N.M. Advances in gamma titanium aluminides and their manufacturing techniques // Progress in Aerospace Sciences, - 2012. – V. 55. - PP.1-16. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2012.04.001>

10. Григоренко Г.С., Григоренко Г.М., Задорожнюк О.М. Интерметаллиды титана. Особенности, свойства, применение (Обзор) // Современная электрометаллургия – 2017 - № 3 (128). – 51-58 с. <https://doi.org/10.15407/sem2017.03.08>

11. Froes F.H. , Suryanarayana C., D. Eliezer Synthesis, properties and applications of titanium aluminides // Journal of materials science - 1992. - V.27(19). - 5113-5140 pp. DOI: 10.1007/BF00553381

12. Chesnutt J.C. Titanium Aluminides for Aerospace Applications in book Superalloys / edited by S.D. Antolovich et al. // The Minerals, Metals and Materials Society: – 1992. – 381-389 pp.

13. Cupid M.D. Thermodynamic Assessment of the Ti-Al-Nb, Ti-Al-Cr and Ti-Al-Mo Systems // Gainesville: University of Florida, - 2009.

14. Franzen S. F., Karlsson J. γ -titanium aluminide manufactured by electron beam melting. An Investigation of Microstructural Behavior and Related Mechanical Properties // diploma work № 37/2010 at Department of materials and manufacturing technology Chalmers university of technology. – Gothenburg, Sweden. – 2010.

15. Peters M., Leyens C. Titanium and Titanium Alloys // Wiley, VCH, Weinheim, Germany. – 2003.

16. Колачев Б.А., Ильин А.А., Дроздов П. Д. О влиянии границ зерен на пластичность интерметаллидов // Металлы – 2001 - №3 - 41–48с.

17. Minonishi Y. Plastic deformation of single crystals of Ti_3Al with D019

structure // Philosophical Magazine A. – 1991.– Vol. 63, iss. 5. –pp.1085–1093.

18. Kim Y W., Wagner R., Yamaguchi M. Gamma titanium aluminides // Minerals, Metals and Materials Society, Warrendale, PA (United States) - 1995.

19. Wu X.H. Review of alloy and process development of TiAl alloys // Intermetallics, - 2006. – V. 14. PP. 1114-1122.
<https://doi.org/10.1016/j.intermet.2005.10.019>

20. Kim, Young-Won. Gamma titanium aluminides: Their status and future. // The journal of the Minerals, Metals & Materials Society. – 1995. – V.47. - 39-41 PP.
DOI:10.1007/BF03221229

21. Recina V. Mechanical Properties of Gamma Titanium Aluminides. // Göteborg: Chalmers University of Technology. - 2000.

22. Wisbey A., Kearns M.W., Partridge P.G. Superplastic deformation in Ti alloy IMI 834 and alpha-2 titanium aluminide // Materials Letters. – 1994. – V. 21. – PP. 31-39. [https://doi.org/10.1016/0167-577X\(94\)90120-1](https://doi.org/10.1016/0167-577X(94)90120-1)

23. Imaev R.M., Imaev V.M., Khismatullin T.G. et al. New approaches to designing alloys based on γ -TiAl + α_2 -Ti₃Al phases // Phys. Metals Metallogr. – 2006. – V. 102. – PP. 105-113. <https://doi.org/10.1134/S0031918X06070155>

24. Srivastava D. Microstructural Characterization of the γ -TiAl alloy Samples Fabricated by Direct Laser Fabrication Rapid Prototype Technique. // Bull. Material Science. – 2002. - V. 25. -Iss. 7. – pp. 619-633.

25. Kotoban D., Nazarov A., Shishkovsky I. Comparative Study of Selective Laser Melting and Direct Laser Metal Deposition of Ni₃Al Intermetallic Alloy // Science Direct IUTAM Symposium on Growing solids, Moscow, Russia (June 23 – 27, 2015). Procedia IUTAM – 2017. -V. 23. – pp.138 – 146. doi: 10.1016/j.piutam.2017.06.014

26. Wang J., Pan Z.X., Wei L.L., He S, Cuiuri D., Li H.J. Introduction of ternary alloying element in wire arc additive manufacturing of titanium aluminide intermetallic. // Additive Manufacturing. – 2019. - V. 27. – pp. 236-245.
27. Cormier D. et al. Freeform Fabrication of Titanium Aluminide via Electron Beam Melting Using Prealloyed and Blended Powders. // Research Letters in Materials Science. - 2007. -V.2007. <https://doi.org/10.1155/2007/34737>
28. Вальтер А.В. Технологии аддитивного формообразования: учебное пособие – Томск: Изд-во ТПУ, 2013.– 174 с.
29. Murr L.E. A metallographic review of 3D printing/additive manufacturing of metal and alloy products and components // Metallography, microstructure and analysis – 2018. – №7. – pp.103–132.
30. Valkov S., Ormanova M.; Petrov P. Electron-Beam Surface Treatment of Metals and Alloys: Techniques and Trends. // Metals – 2020. -V. 10. – pp.1219.
31. Wohlers T., Caffrey T. Additive manufacturing. The state of the industry // Manufacturing engineering magazine – 2016. – № 5. – pp. 45–52.
32. Cheah C.M., Chua C.K., Lee C.W., et al. Rapid prototyping and tooling techniques: a review of applications for rapid investment casting. // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2005. -V.25(3). – pp. 308-320.
33. Чжу Л.Ю., Бай П.К., Чжу Ц.М. Быстрое создание прототипов и технология производства присадок. // Пекин: Пресса национальной оборонной промышленности. - 2003. (оригинал-
<http://www.opticsjournal.net/Articles/abstract?aid=OJ090525000070jQmSpV>)
34. Tong J., Bowen C. R., Persson J., Plummer A. Mechanical properties of titanium-based Ti–6Al–4V alloys manufactured by powder bed additive manufacture. //

Materials Science and Technology. – 2017. - V. 33 – Iss. 2. – pp.138-148. DOI: 10.1080/02670836.2016.1172787.

35. Ма М., Лян Ё., Чжан Ч. Современное состояние и перспективы исследований по приготовлению высокоэнтропийных сплавов по аддитивной технологии производства. // Материалы прямые. – 2020. - №34(17). – С.17082-17088. (Оригинал: <http://www.mater-rep.com/CN/Y2020/V34/I17/17082>)

36. Razavi S.M.J., Van Hooreweder B., Berto F. Effect of build thickness and geometry on quasi-static and fatigue behavior of Ti-6Al-4V produced by Electron Beam Melting. // Additive Manufacturing. – 2020. – V. 36. – pp.101426. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101426>.

37. Karlsson J., Snis A., Engqvist H., et al. Characterization and comparison of materials produced by Electron Beam Melting (EBM) of two different Ti-6Al-4V powder fractions. // Journal of Materials Processing Technology. – 2013. – V. 213. – Iss. 12. - pp. 2109-2118. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.06.010>

38. Ahn Y.K., Kim H.G., Park H.K., et al. Mechanical and microstructural characteristics of commercial purity titanium implants fabricated by electron-beam additive manufacturing. // Materials Letters. – 2017. – V. 187. – pp. 64-67. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2016.10.064>

39. Fuchs J., Schneider C., Enzinger N. Wire-based additive manufacturing using an electron beam as heat source. // Weld World - 2018. – V. 62. – pp. 267–275. <https://doi.org/10.1007/s40194-017-0537-7>

40. Kloeden B., Kirchner A., Kieback B. et al. Processing Specifics in Electron Beam Melting of TiAl alloy RNT650 // Conference: Fraunhofer Direct Digital Manufacturing Conference DDMC. Berlin. - 2016. – pp. 5.

41. Körner C. Additive manufacturing of metallic components by selective electron beam melting – a review. // *International Materials Reviews*. – 2016. – V. 61 – Iss.5. – pp. 361-377. DOI: 10.1080/09506608.2016.1176289
42. Eskandari Sabzi H. Powder bed fusion additive layer manufacturing of titanium alloys. // *Materials Science and Technology*. – 2019. – V. 35. – Iss. 8. – pp. 875-890. DOI: 10.1080/02670836.2019.1602974
43. Martín, A., Cepeda-Jiménez, C.M. and Pérez-Prado, M.T. Gas atomization of γ -TiAl Alloy Powder for Additive Manufacturing. // *Adv. Eng. Mater.* – 2020. – V. 22 – Iss. 1. – pp. 1900594. doi:10.1002/adem.201900594
44. Зыкова Е. Д., Кашимбетова А.А. Исследование структуры и свойств покрытий, полученных методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошковых смесей // XVIII международная научно-техническая Уральская школа-семинар металлосведов-молодых ученых. Екатеринбург. – 2017. -V. 2017. – Iss. 18. – pp. 510-514.
45. Wang J., Pan Z., Wei L., et al. Introduction of ternary alloying element in wire arc additive manufacturing of titanium aluminide intermetallic. // *Additive Manufacturing*. – 2019. – V.27. – pp. 236-245. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.03.014>
46. Tseng J.C., Huang W.C., Chang W., et al. Deformations of Ti-6Al-4V additive-manufacturing-induced isotropic and anisotropic columnar structures: In situ measurements and underlying mechanisms. // *Additive Manufacturing*. – 2020. – V. 35. – Iss. 101322. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101322>.
47. Pushilina N.S., Klimenov V.A., Cherepanov R.O. Beam Current Effect on Microstructure and Properties of Electron-Beam-Melted Ti-6Al-4V Alloy. // *Journal of*

Materials Engineering and Performance. – 2019. – V. 28. – Iss. 10. - pp.6165-6173.
<https://doi.org/10.1007/s11665-019-04344-0>

48. Серeda Б.П., Жеребцов А.А. Исследование структурообразования алюминидов титана при их получении методом СВС. // Запорожская государственная инженерная академия: Сб. трудов «Строительство, материаловедение, машиностроение. - 2008. – pp.15-17.

49. Filimonov V.Y., Korchagin M.A., Dietenberg I. A., et al. High temperature synthesis of single-phase Ti_3Al intermetallic compound in mechanically activated powder mixture // Powder Technology. – 2013. – V. 235. – pp. 606–613.

50. Mogale N.F., Matizanhuka W.R. Spark Plasma Sintering of Titanium Aluminides: A Progress Review on Processing, Structure-Property Relations, Alloy Development and Challenges. // *Metals*. – 2020. – V.10. – Iss.8. – pp.1080. <https://doi.org/10.3390/met10081080>

51. Nepapushev A.A., Moskovskikh D.O., Vorotilo K.V., et al. TiAl-Based Materials by In Situ Selective Laser Melting of Ti/Al Reactive Composites // *Metals*. – 2020. -V. 10. – Iss. 11. – pp. 1505. doi:10.3390/met10111505

52. Пячин С.А., Ершова Т.Б., Бурков А.А., и др. Использование алюминидов титана для создания электроискровых покрытий // Наноструктурированные материалы и функциональные покрытия. - 2015. - №1. - С. 55-61. DOI 10.17073/1997-308X-2015-1-55-61.

53. Ladd, M.; Palmer, R. Structure Determination by X-ray Crystallography. In *Analysis by X-rays and Neutrons*. Springer: New York, NY, USA, 2013; pp. 784, doi:10.1007/978-1-4614-3954-7.

54. Rietveld, H.M. Line Profiles of Neutron Powder-diffraction Peaks for

Structure Re-finement. *Acta Cryst.* 1967, 22, 151–152.

55. Chen, Y., Yue, H., Wang, X., Xiao, S., Kong, F., Cheng, X., Peng, H. Selective electron beam melting of TiAl alloy: Microstructure evolution, phase transformation and microhardness // *Materials Characterization*. – 2018. – T. 142. – C. 584-592.

56. Barbosa J., Ribeiro C. S., Monteiro A. C. Influence of superheating on casting of γ -TiAl // *Intermetallics*. – 2007. – T. 15. – №. 7. – C. 945-955.

57. Ye, X. C., Xiao, K. Q., Cao, R. X., Wu, H., Zhao, G. W., Li, B. Microstructure evolution and microhardness of TiAl based alloy blade by vacuum suction casting // *Vacuum*. – 2019. – T. 163. – C. 186-193.

58. Shen, S., Wang, H., He, B., & Zhang, S. Microstructure evolution and phase transformation behavior of Ti17 and γ -TiAl bimetallic structure fabricated by directed energy deposition // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2022. – T. 907. – C. 164571.

59. Fan, J., Li, X., Su, Y., Guo, J., Fu, H. Effect of growth rate on microstructure parameters and microhardness in directionally solidified Ti–49Al alloy // *Materials & Design*. – 2012. – T. 34. – C. 552-558.

60. Kan, W., Chen, B., Peng, H., Liang, Y., Lin, J. Fabrication of nano-TiC reinforced high Nb-TiAl nanocomposites by electron beam melting // *Materials Letters*. – 2020. – T. 259. – C. 126856.

61. Wang, Y., Xu, Z., Hu, J., Zhang, A. Surface integrity analysis of electrochemical machining of γ -TiAl alloys // *Materials Today Communications*. – 2020. – T. 25. – C. 101686.

62. Renjie, C., Ming, G., Hu, Z., & Shengkai, G. Interactions between TiAl

alloys and yttria refractory material in casting process //Journal of Materials Processing Technology. – 2010. – Т. 210. – №. 9. – С. 1190-1196.

63. Yue, H., Peng, H., Li, R., Yang, J., Gao, R., Zhang, S., Chen, Y. Metastable phase and microstructural degradation of a TiAl alloy produced via selective electron beam melting //Vacuum. – 2021. – Т. 192. – С. 110491.

64. Świdarska-Środa, A., Wejrzanowski, T., Kurzydłowski, K. J., & Wyrzykowski, J. W. Quantitative analysis of Al₂O₃ particles in Al₃Ti/Al₂O₃/Al composites //Materials characterization. – 2003. – Т. 51. – №. 2-3. – С. 141-146.

65. Lu, Z., Wei, N., Li, P., Guo, C., & Jiang, F. Microstructure and mechanical properties of intermetallic Al₃Ti alloy with residual aluminum //Materials & Design. – 2016. – Т. 110. – С. 466-474.

66. Bataev, I. A., Bataev, A. A., Mali, V. I., Pavlyukova, D. V., Yartsev, P. S., & Golovin, E. D. Nucleation and growth of titanium aluminide in an explosion-welded laminate composite //The Physics of Metals and Metallography. – 2012. – Т. 113. – №. 10. – С. 947-956.

67. Yuan M. N., Li L., Wang Z. J. Study of the microstructure modulation and phase formation of TiAl₃Ti laminated composites //Vacuum. – 2018. – Т. 157. – С. 481-486.

68. Lu Z. Lu, Z., Wei, N., Li, P., Guo, C., & Jiang, F. Microstructure and mechanical properties of intermetallic Al₃Ti alloy with residual aluminum //Materials & Design. – 2016. – Т. 110. – С. 466-474.

69. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. От 27.12.2018)

70. ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя.

Общие эргономические требования.

71. ГОСТ 12.2.033-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ стоя.

Общие эргономические требования.

72. ГОСТ 12.2.049-80 ССБТ. Оборудование производственное. Общие эргономические требования

73. ГОСТ 21958-76. Система «человек-машина». Зал и кабины операторов. Взаимное расположение рабочих мест. Общие эргономические требования.

74. ГОСТ 12.0.003-2015 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.

75. СанПиН 1.2.3685-21 "Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания"

76. ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности.

77. СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение.»

Актуализированная редакция СНиП 23-05-95*

78. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов

79. СанПиН 1.2.3685-21"Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания"

80. ГОСТ Р 53692-2009 «Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Этапы технологического цикла отходов».

81. Федеральный закон от 22 июля 2008 г. N 123-ФЗ " Технический

регламент о требованиях пожарной безопасности" (с изменениями на 30 апреля 2021 года)

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

1. Юаньсюнь Л. Выбор режимов процесса электронно-лучевой аддитивной технологии //Прогрессивные технологии и экономика в машиностроении: сборник трудов XIII Всероссийской научно-практической конференции для студентов и учащейся молодежи, 7-9 апреля 2022 г., Юрга. – Томский политехнический университет, 2022. – С. 7-9.

2. Лю ю. Использование селективной электронно-лучевой технологии для получения интерметаллидов ti-al //научная инициатива иностранных студентов и аспирантов. – 2021. – с. 166-170.

Список литературы

1.

Приложение II

(справочное)

Название раздела ВКР на иностранном языке

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ01	Лю Юаньсюнь		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ИФПМ	Ковалевская Ж.Г.	д.т.н.		

Консультант-лингвист отделения иностранных языков ШБИП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Демьяненко Н.В.	ОИЯ		

1. Literature review

1.1. Titanium-aluminum intermetallics

Modern civilization is rapidly developing due to the widespread use of metal alloys. Metal alloys have excellent properties and are easily processed into various parts, while still having sufficient strength. But at present, working equipment is used in increasingly harsh conditions (high temperatures, aggressive environments), and the available materials are no longer able to meet the needs of people.

Intermetallic compounds are a unique class of materials that retain an ordered structure up to the melting point. The long-range order provides a stronger interatomic bond. Intermetallics exist in certain, rather narrow compositional ranges and have a simple stoichiometric ratio. When the composition deviates from the stoichiometric ratio, the structure can become less ordered [1, 2].

Recent research into new high temperature structural materials has increased interest in intermetallic compounds as they exhibit good high temperature properties due to their long range order. An ordered structure reduces the mobility of dislocations and more effectively prevents diffusion processes at elevated temperatures [3].

Intermetallics have excellent properties: high strength, which does not degrade with increasing temperature; anomalous dependence of the yield strength observed in some intermetallic compounds; low and very low density of intermetallics based on Al, Ti, Si, which leads to a high strength-to-density ratio; high moduli of elasticity, and with increasing temperature they decrease more slowly than in disordered alloys; high resistance to oxidation, which are intermetallic compounds with a high content of Al; low diffusion coefficients and, as a result, lower creep, recrystallization, and corrosion

rates [1-4].

A remarkable balance of properties is found in titanium aluminides. This contributed to the development of alloys based on them, intended for use as light high-temperature materials. The aluminum content in these alloys is a wide range designed to improve their performance [5-7].

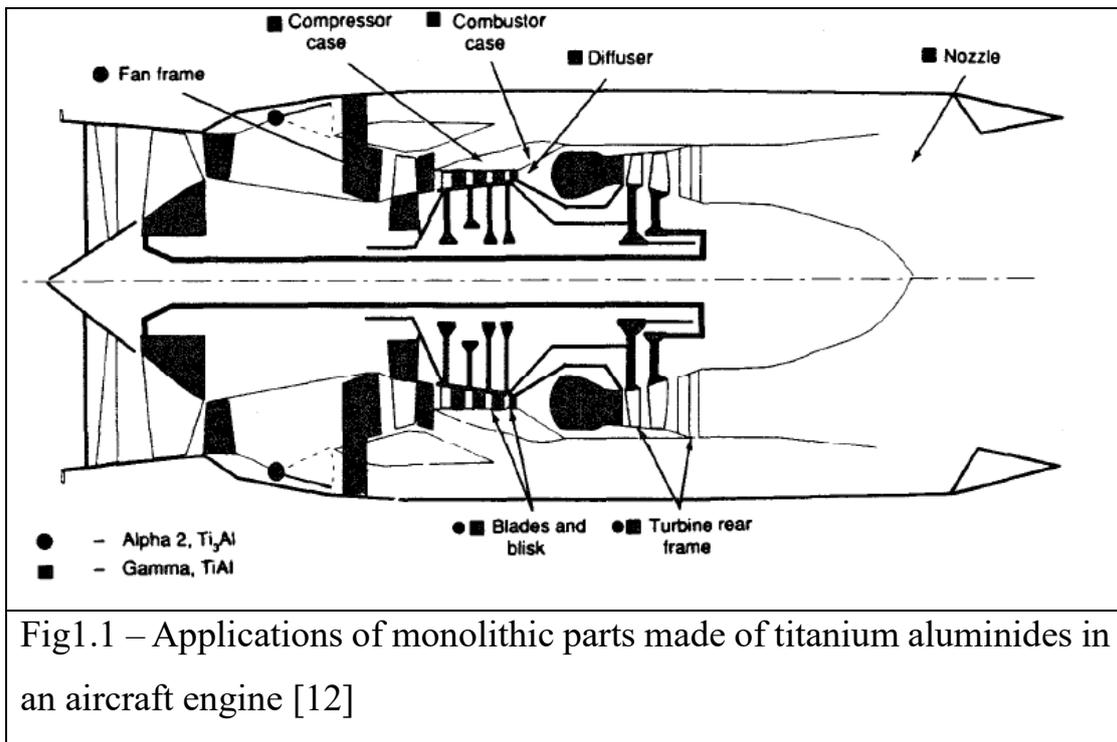
1.1.1. Application area

Titanium aluminides have the following excellent properties: high melting point, low density, high elastic moduli, increase in yield strength (for TiAl) with increasing temperature, oxidation and fire resistance, high strength/density ratio, heat resistance - all this creates favorable conditions for the application of these materials for new generation aerospace engines [8-11]. That is why scientists are now very fond of using it in the aerospace field [12].

The prospects for the use of materials based on titanium aluminides are expanding due to the development of work on the creation of a new generation of hypersonic aerospace vehicles, and their use is being considered both in skin elements and in jet engine structures. Ti₃Al titanium aluminide foil is used for the manufacture of actively-cooled honeycomb skin panels, multilayer hollow light shafts in rocket technology, etc. Titanium aluminide in a monolithic form is supposed to be used for housing elements of compressors, turbines, blades, combustion chambers, diffusers and engine nozzles . The use of parts made of titanium intermetallic compounds in a gas turbine engine instead of the materials used will reduce the total weight of the engine and increase its thrust-to-weight ratio, i.e. thrust-to-weight ratio [12].

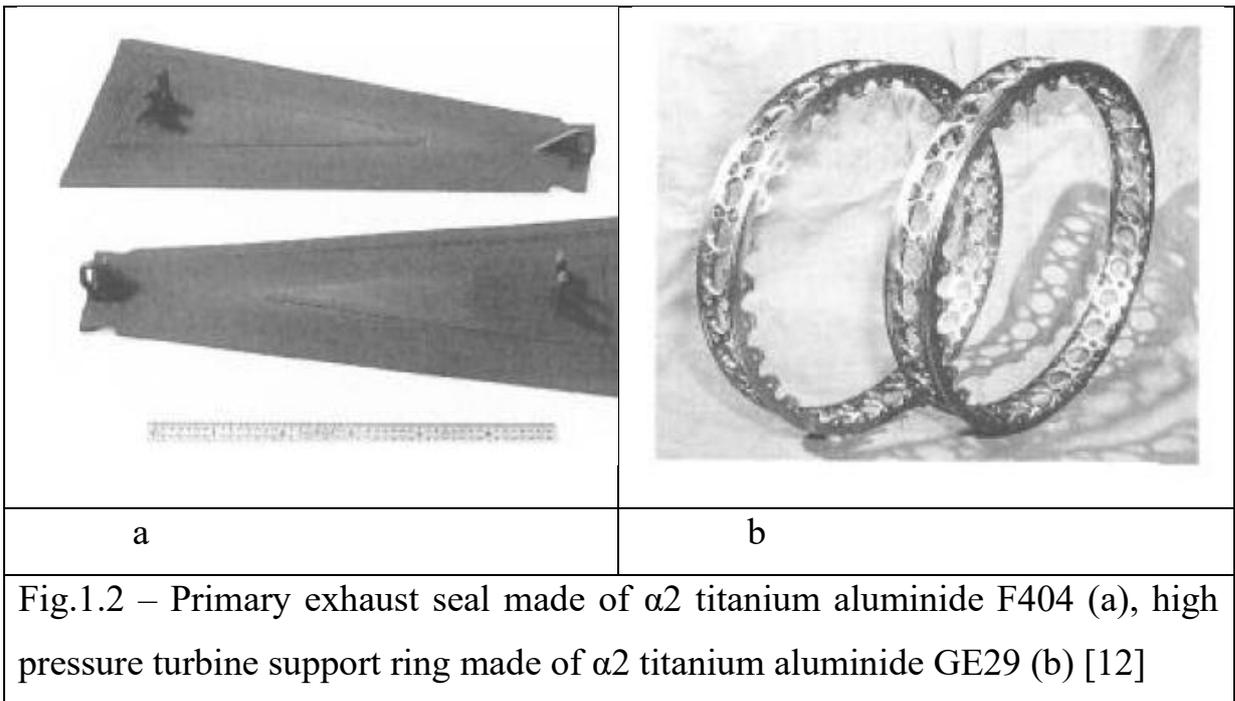
Several promising details for the application of titanium aluminide castings in

an aircraft engine are shown schematically in Figure 1.1 [12].



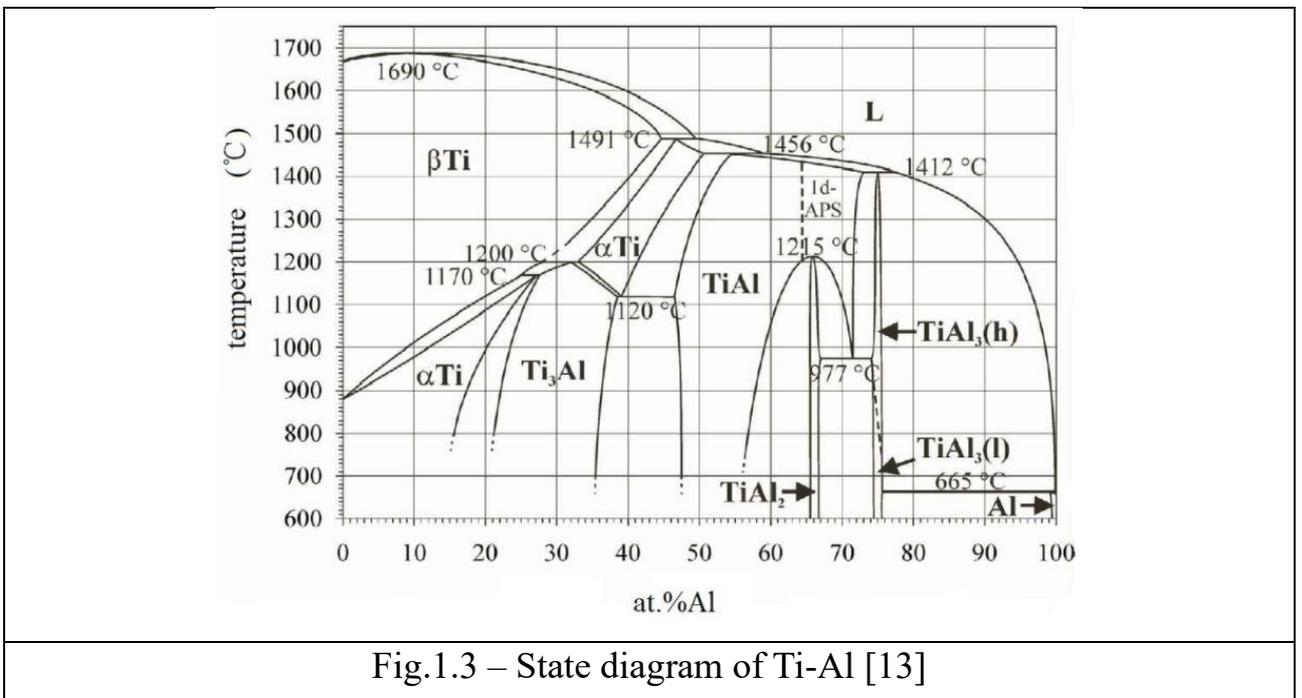
Titanium aluminides can be widely used in transport engineering (engine and automotive industries). In particular, for the production of valves and impellers for turbocharging units in diesel and piston engines, which ensures high reliability and operational durability of structures. Also, TiAl aluminide can be used in gas and oil refineries of the chemical industry and in nuclear engineering, where specific characteristics are required - corrosion resistance and resistance to swelling under the action of radiation [10].

Demonstration of the possibility of using these alloys in conventional fuel engines is planned for IHPTET (Integrated High Performance Turbine Engine Technology) engines. Several engine parts tested by GEAE (GE Aircraft Engines) were made from $\alpha 2$ -Ti₃Al alloy. Two parts made of $\alpha 2$ -Ti-24Al-11Nb alloy are shown in fig.1.2. [12].



1.1.2. Structure and properties

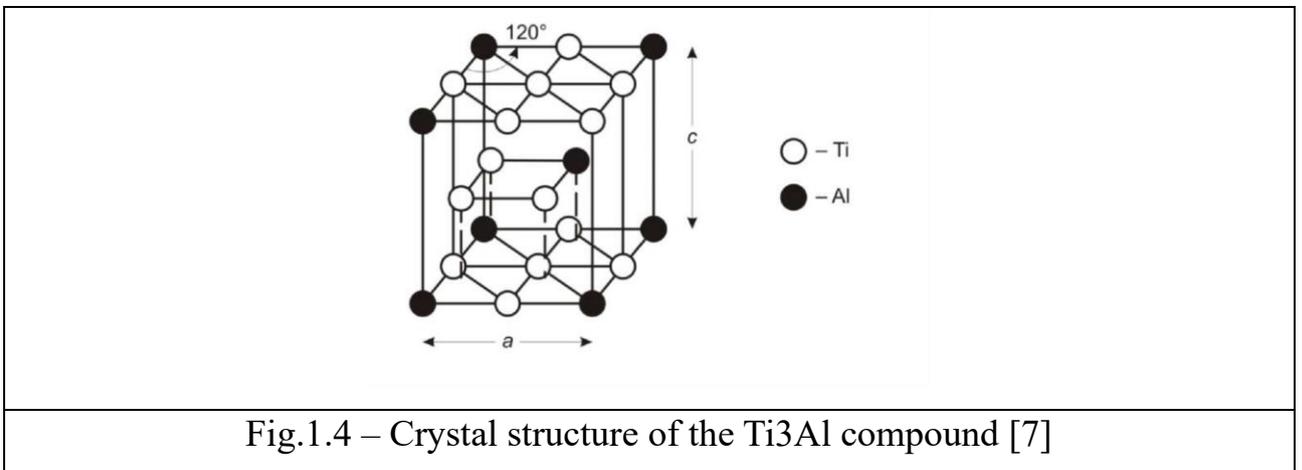
The Ti-Al phase diagram contains many different intermetallic compounds such as Ti_3Al , $TiAl$, $TiAl_2$ and $TiAl_3$ (Fig. 1.3) [13].



However, developers of structural materials have focused on two materials, α_2 -Ti₃Al and γ -TiAl, as they have shown to have the potential to meet the design requirements of the intended applications [11].

Intermetallic compound α_2 -Ti₃Al

The lattice type of α_2 -Ti₃Al is hexagonal close-packed (hcp) (Fig. 1.4) [7]. The α_2 -Ti₃Al phase has a lattice similar to that of the α -phase, but differs from it in the ordered arrangement of titanium and aluminum atoms. Aluminum atoms in the lattice have common bonds only with titanium atoms, which are relative to them in the positions of the nearest neighbor. This lattice can be represented as a set of four interpenetrating sublattices, three of which contain Ti atoms, and one contains Al atoms. The density of Ti₃Al aluminide is 4.20 g/cm³ [14].



The homogeneity region of titanium aluminide Ti₃Al at room temperature is in the range from 15 to 23 wt. % AL and retains an ordered structure up to a temperature of 1090°C. Lattice periods of the α_2 phase: $a_{\alpha_2} = 2a_{\alpha}$; $c_{\alpha_2} = c_{\alpha}$ ($a_{\alpha_2} = 0.577$ nm; $c_{\alpha_2} = 0.460$ nm; $c/a = 0.797$) [15].

The plasticity of the Ti₃Al intermetallic compound is low; it is associated with a limited number of slip systems (less than five). The crystal is deformed mainly by sliding along the {1010} plane. With an increase in the heating temperature due to an increase in the mobility of dislocations, the plasticity of the intermetallic compound increases to 10-20%. One of the sliding systems of single-crystal Ti₃Al is characterized by an anomalous temperature dependence of the yield strength. Manifested in the fact that when the material is heated, its strength continuously increases [10].

The microstructure of the Ti-25Al-7.5Nb alloy with α_2 morphology is shown below [11]. Figure 1.5 shows the structural transformation from the high-temperature β -phase in the form of: an equiaxed microstructure with a large volume fraction of the primary α_2 -phase (a), a microstructure with a low volume fraction of the primary α_2 -phase in the matrix, having a Widmanstätt structure (b), a rough microstructure created by path converted from a Widmanstätt structure (c), and a fine microstructure converted from a Widmanstätt structure (d).

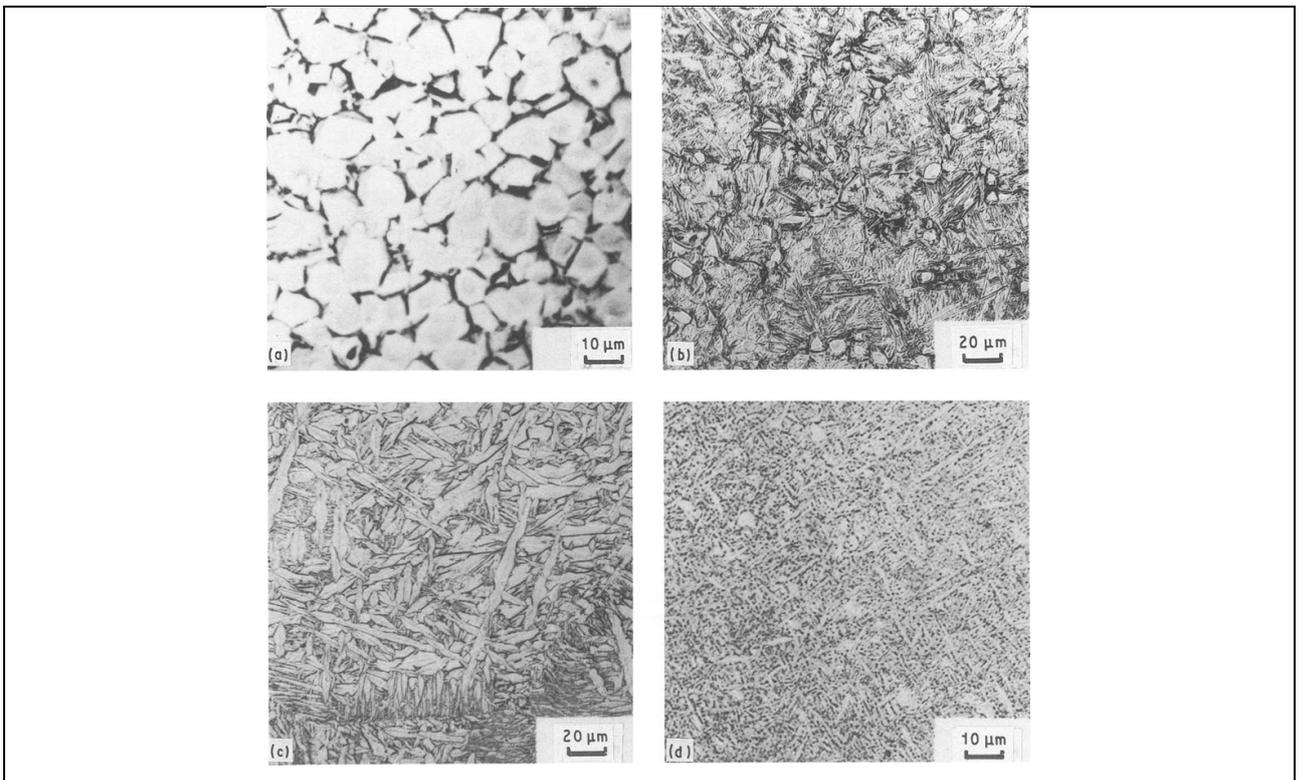


Fig.1.5 – Microstructures created in the Ti-25Al-7.5Nb alloy by transformation from the β -phase: equiaxed microstructure with a large volume fraction of the primary α_2 -phase (a), a low volume fraction of the primary α_2 -phase in the matrix transformed into Widmanstätt (b), coarse microstructure, converted to Widmanstätt (c) and fine microstructure converted to Widmanstätt (d) [11]

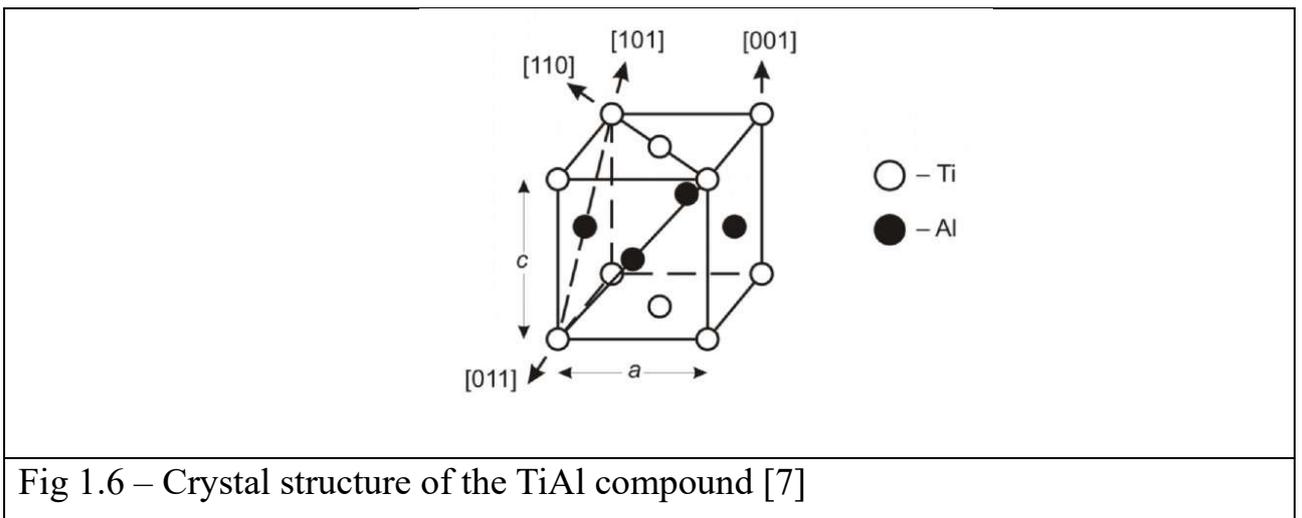
The small grain size of the α_2 phase increases strength; and, as a rule, reducing the slip length improves ductility, using either grain size or allotropic change, or isolation of particles of the second phase [11].

The mechanical properties of the Ti₃Al intermetallic compound at room temperature strongly depend on the purity of impurities, the type and parameters of the microstructure, and the size and shape of the micrograin. Therefore, the mechanical properties of Ti₃Al intermetallic compounds vary over a wide range: $\sigma_v = 220\text{-}600$ MPa, $\delta = 0\text{-}0.5\%$. The elastic moduli depend to a lesser extent on the above factors: $E \approx 140$; $G \approx 52.5$ GPa. The mechanical properties of Ti₃Al aluminide can be improved

by alloying [16, 17]. The best results are obtained by alloying aluminide Ti₃Al with niobium, so that the Ti₃Al-Nb system is fundamental in the development of alloys based on it [10].

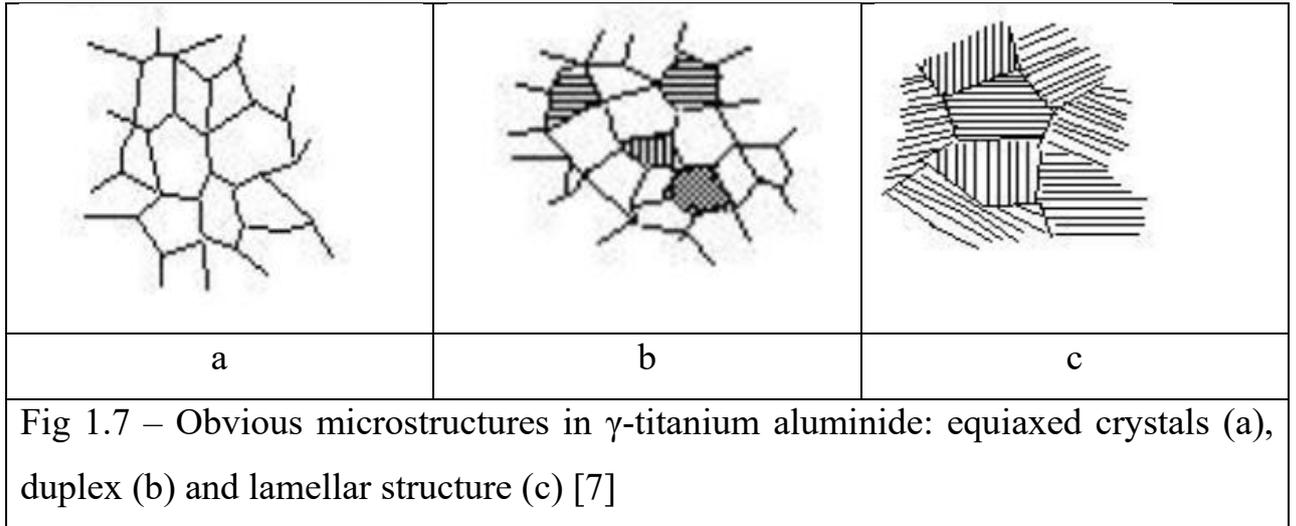
Intermetallic compound γ -TiAl

Aluminide γ -TiAl has an ordered tetragonal-distorted face-centered lattice, in which layers packed with titanium atoms alternate with layers occupied by aluminum atoms (Fig.1.6). Lattice periods of the γ -phase: $a = 0.3984\text{-}0.3949$ nm; $c = 0.4065\text{-}0.4089$ nm; $s/a = 1.020\text{-}1.035$. The lattice periods and c/a ratio increase with increasing aluminum content. The density of TiAl aluminide is 3.76 g/cm³ [14].



In γ -TiAl with an Al concentration in the range of 46-52 at.%, the microstructure usually consists of either a single-phase microstructure of a pure γ -phase or a two-phase system containing a mixture between the γ -phase and α_2 -phase [18]. These single-phase and two-phase systems combine to create the various characteristic microstructures present in the material. The various microstructures that appear in γ -TiAl are lamellar, near-lamellar, duplex, pseudo-duplex and equiaxed (Fig.

1.7) and depend on the heat treatment applied to the material and the cooling rate [7].



The equiaxed microstructure consists of one γ -phase (Fig. 1.7 a). The microstructure consists of smaller equiaxed grains. Its mechanical advantages are that γ -TiAl has a high modulus of elasticity and improved high temperature properties at low density. The disadvantages are its poor room temperature properties such as fracture toughness and ductility. This microstructure is very fragile and therefore undesirable for use in structures [14].

The lamellar microstructure consists of alternating γ and α_2 plates that fit into lamellae and form lamellar grains (Fig. 1.7 c). It is believed that the lamellar structure is more plastic than the equiaxed one, which arises due to the distance formed between the lamellar plates. In places where the lamellas come into contact, doublings and dislocations are formed. Twinning and dislocation increase high temperature strength, fracture toughness and creep resistance. The lamellar microstructure with very fine grains is reported to have excellent mechanical properties. The grain size should be in the range of 10–30 μm to ensure sufficient plasticity [14].

The duplex structure is a mixture of equiaxed γ -grains and lamellar colonies

(Fig.1.7 b). TiAl containing both equiaxed and lamellar microstructure is influenced by the mechanical properties of both microstructures. The duplex microstructure is not formed directly from the cast material. First, the right amount of Al must be present in the material, since the duplex microstructure contains both γ and $\gamma+\alpha_2$ phases. These two phases coexist only in the amount of 45 - 51 at.% on the phase diagram. Secondly, the material must be sufficiently thermally processed.

Mechanical properties, including operational properties, are largely determined by the type and parameters of the structure. Coarse-grained (completely or almost completely) lamellar structures provide relatively high fracture toughness and creep resistance, but low ductility and strength, especially at room temperature. Fine-grained equiaxed almost single-phase γ -structure and duplex microstructure with few lamellar colonies result in low fracture toughness and low creep resistance, but provide satisfactory ductility and tensile strength at room temperature. The fine-grained lamellar structure, which provides the highest complex of mechanical properties, is considered to be the best. This structure should have a grain size of 50-400 μm ,

The ultimate strength of TiAl-based alloys is in the range from 450 to 800 MPa. These values are less than the ultimate strength of alloys based on Ti₃Al. But alloys based on TiAl are characterized by high resistance to creep and oxidation. At the same time, this alloy has a good relative elongation of samples at room temperature. Single-crystal aluminide titanium TiAl is fractured under loading in the temperature range from 700°C. Plastic deformation of the γ -phase is due to the movement of single dislocations and superdislocation. The brittle fracture of an intermetallic compound at low temperatures is associated with a low mobility of dislocations. The strength of the material is determined by the mobility of the dislocation. As the temperature rises, the

dislocation mobility increases. As for alloys based on Ti₃Al.

Depending on the purity and microstructure, the mechanical properties of the TiAl intermetallic compound fluctuate over a fairly wide range and at room temperature have the following values: $\sigma_B = 350-580$ MPa, $\delta = 0.5-1.5\%$. The elastic moduli of aluminide TiAl at 20°C are: $E = 175$ GPa, $G = 67$ GPa [10].

Comparison of titanium aluminide alloys with conventional titanium-based alloys and nickel-based alloys are shown in Table1.1 [11].

Table1.1

Comparison of titanium aluminides with titanium alloys and superalloys [11]

Property	Ti alloys	α_2 -Ti ₃ Al	γ -TiAl	Superalloys
Density, g/cm ³	4.54	4.84	4.04	8.3
Young's modulus, GPa	96-100	100-145	160-176	206
Yield strength σ_t (yield strength), MPa	110	145	176	207
Tensile strength σ_v (tensile strength, UTS), MPa	480-1200	800-1140	450-800	-
Creep temperature, °C	540	730	900	1090
Oxidation temperature, °C	590	705	815	1090
Plasticity at	fifteen	2-4	1-3	3-10

room temperature, %				
Plasticity at high temperature, %	fifteen	5-12	5-12	10-20

In modern production, two classes of alloys based on titanium aluminides are used, which are called α_2 -alloys and γ -alloys [19, 20]. The first one includes a mixture of α_2 - and β -phases, and the second one - a mixture of γ - and α_2 -phases. The main typical properties obtained recently in alloys are shown in Table 1.2 [12].

Table 1.2

Main properties of alloys based on titanium aluminides [12]

α_2 alloys	γ -alloys
At room temperature $\sigma_B = 1100$ MPa, δ up to 6%	At room temperature $\sigma_B = 620$ MPa, $\delta = 3\%$
At a temperature of 760°C $\sigma_B = 620$ MPa	At 760°C $\sigma_B = 550$ MPa At 870°C $\sigma_B = 380$ MPa
Good oxidation resistance	Excellent oxidation resistance
	More refractory than conventional titanium alloys

1.1.3. Methods of acquisition

In order to make titanium aluminides commercial materials, various production methods are being researched and applied. Due to the low ductility and fracture

toughness, the material is hard, and traditional production methods are difficult to apply.

Traditional methods of alloying and creating ingots include induction melting, vacuum arc melting and plasma melting. Further, traditional methods for the production of blanks are applied, such as casting, forging or powder metallurgy, but all of them are accompanied by difficulties that must be overcome [10, 21].

Proven industrial-scale process routes include ingot casting, powder processing and forging, hot rolling plate production, powder metallurgy processing, and spin or investment casting [10, 22, 23]

An assessment of the status and usefulness of various processing methods for titanium aluminides is shown in Table 1.3. [12].

Table 1.3

Machining capabilities of titanium aluminides

Material type	Ingot metallurgy	Forging	sheet rolling	Casting
Ti alloys	Yes	Yes	Yes	Yes
α_2 alloys	Yes	Yes	yes, but difficult	limited
γ -alloys	yes, but difficult	yes, but difficult	yes, but difficult	Yes

One of the types of production of intermetallic compounds, which has recently attracted attention, is additive technologies [24–27].

1.2. Features of the structure of intermetallic compounds obtained by

additive technologies

If earlier centrifugal casting or investment casting was used to manufacture parts from intermetallic compounds, in recent years more and more scientists around the world are studying the possibility of creating parts using additive technologies [24-27].

Additive manufacturing is the construction of objects by adding the necessary material, rather than removing the excess. The term "additive manufacturing" refers to technologies for creating objects by applying successive layers of material. Models made by the additive method can be used at any production stage both for the manufacture of prototypes (rapid prototyping) and finished products (rapid production) [28-33].

One of the methods of additive manufacturing is the selective sintering of powder materials. The model layers are sintered in a thin layer of powdered material, after which the work platform is lowered and a new layer of powder is applied. The process is repeated until a solid 3D model is obtained. Unused material remains in the working chamber and serves to support the overhanging layers without requiring the creation of special supports. Another option for additive manufacturing is the use of filler wire as a forming material [29].

There are three main energy sources for consumable sintering: laser, arc plasma, and electron beam. All methods are similar [29-31].

Electron beam melting or electron beam melting (EBM) is a widely used method for the additive manufacturing of metal parts from titanium alloys [34-37]. EBM is based on melting metal powders layer by layer in a vacuum chamber. Since titanium is a reactive metal, electron beam technologies seem to be the most promising

for the development of technology for 3D metal surfacing of titanium-based alloy parts. Parts produced by EBM are characterized by solidity and, accordingly, high strength [29, 38].