

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

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Эволюция структуры композита на основе титанового сплава при фрикционной перемешивающей обработке

УДК 669.295.5.055-419.8

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4Б71	Назаренко Никита Леонидович		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ	Ваулина О. Ю.	К.Т.Н		

Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Младший научный сотрудник ИФПМ СО РАН	Воронцов А. В.			

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Маланина Вероника Анатольевна	К.Э.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Черемискина Мария Сергеевна	-		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
22.03.01 Материаловедение и технологии материалов	Ваулина О. Ю.	К.т.н., доцент		

Планируемые результаты обучения ООП

Код компетенции	Наименование компетенции
Универсальные компетенции	
УК(У)-1	Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач
УК(У)-2	Способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений
УК(У)-3	Способен осуществлять социальное взаимодействие и реализовывать свою роль в команде
УК(У)-4	Способен осуществлять деловую коммуникацию в устной и письменной формах на государственном и иностранном (-ых) языке (-ах)
УК(У)-5	Способен воспринимать межкультурное разнообразие общества в социально-историческом, этическом и философском контекстах
УК(У)-6	Способен управлять своим временем, выстраивать и реализовывать траекторию саморазвития на основе принципов образования в течение всей жизни
УК(У)-7	Способен поддерживать должный уровень физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности
УК(У)-8	Способен создавать и поддерживать безопасные условия жизнедеятельности, в том числе при возникновении чрезвычайных ситуаций
Общепрофессиональные компетенции	
ОПК(У)-1	Способен решать стандартные задачи профессиональной деятельности на основе информационной и библиографической культуры с применением информационно-коммуникационных технологий и с учетом основных требований информационной безопасности
ОПК(У)-2	Способен использовать в профессиональной деятельности знания о подходах и методах получения результатов в теоретических и экспериментальных исследованиях
ОПК(У)-3	Готов применять фундаментальные математические, естественнонаучные и общеинженерные знания в профессиональной деятельности
ОПК(У)-4	Способен сочетать теорию и практику для решения инженерных задач

ОПК(У)-5	Способен применять в практической деятельности принципы рационального использования природных ресурсов и защиты окружающей среды
Профессиональные компетенции	
ПК(У)-1	Способен использовать современные информационно-коммуникационные технологии, глобальные информационные ресурсы в научно-исследовательской и расчетно-аналитической деятельности в области материаловедения и технологии материалов
ПК(У)-2	Способен осуществлять сбор данных, изучать, анализировать и обобщать научно-техническую информацию по тематике исследования, разработке и использованию технической документации, основным нормативным документам по вопросам интеллектуальной собственности, подготовке документов к патентованию, оформлению ноу-хау
ПК(У)-3	Готов использовать методы моделирования при прогнозировании и оптимизации технологических процессов и свойств материалов, стандартизации и сертификации материалов и процессов
ПК(У)-4	Способен использовать в исследованиях и расчетах знания о методах исследования, анализа, диагностики и моделирования свойств веществ (материалов), физических и химических процессах, протекающих в материалах при их получении, обработке и модификации
ПК(У)-5	Готов выполнять комплексные исследования и испытания при изучении материалов и изделий, включая стандартные и сертификационные, процессов их производства, обработки и модификации
ПК(У)-6	Способен использовать на практике современные представления о влиянии микро - и нано- структуры на свойства материалов, их взаимодействии с окружающей средой, полями, частицами и излучениями
ПК(У)-7	Способен выбирать и применять соответствующие методы моделирования физических, химических и технологических процессов
ПК(У)-8	Готов исполнять основные требования делопроизводства применительно к записям и протоколам; оформлять проектную и рабочую техническую документацию в соответствии с нормативными документами
ПК(У)-9	Готов участвовать в разработке технологических процессов производства и обработки покрытий, материалов и изделий из них, систем управления технологическими процессами

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:

Бакалаврской работы

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

Студенту:

Группа	ФИО
4Б71	Назаренко Никита Леонидович

Тема работы:

Эволюция структуры композита на основе титанового сплава при фрикционной перемешивающей обработке	
Утверждена приказом директора ИШНПТ	Приказ № 57–51/с от 26.02.2021

Срок сдачи студентом выполненной работы:

--	--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Образцы технического титана Ti6Al4V размером 60×300×2.5 мм3 без предварительной термообработки Порошок Cu (ПМС-1)
--------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	Изучение литературы, подбор материалов для исследований, изготовление образцов; Микроструктурное исследование образцов соединения Ti-Cu полученных in situ методом ФПО; Определение механических свойств исследуемых материалов; Электронно-микроскопические исследования образцов после ФПО.
Перечень графического материала	-

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент...	В. А. Маланина, доцент отделения социально-гуманитарных наук
Социальная ответственность	М.С. Черемискина, ассистент отделения общетехнических дисциплин
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
------------------------------------------------------------------------------------------	--

Задание выдал руководитель / консультант (при наличии):

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Младший научный сотрудник ИФПМ СО РАН	Воронцов А. В.	-		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4Б71	Назаренко Никита Леонидович		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСООБЪЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
4Б71	Назаренко Никита Леонидович

Школа	ИШНПТ	Отделение школы (НОЦ)	ОМ
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	22.03.01 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>	<i>Стоимость материальных ресурсов и специального оборудования определены в соответствии с рыночными ценами г. Томска Тарифные ставки исполнителей определены штатным расписанием НИ ТПУ</i>
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	<i>Норма амортизационных отчислений на специальное оборудование</i>
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	<i>Отчисления во внебюджетные фонды 30,2 %</i>

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	<i>Определение потенциальных потребителей Анализ конкурентоспособности SWOT-анализ</i>
2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	<i>Структура работ. Определение трудоемкости. Разработка графика проведения исследования. Расчет бюджетной стоимости НИ</i>

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. <i>Оценка конкурентоспособности технических решений</i>
2. <i>Матрица SWOT</i>
3. <i>Альтернативы проведения НИ</i>
4. <i>График проведения и бюджет НИ</i>
5. <i>Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ</i>

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Маланина Вероника Анатольевна	к.э.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4Б71	Назаренко Никита Леонидович		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа 4Б71	ФИО Назаренко Никита Леонидович
----------------	------------------------------------

Школа	Инженерная школа новых производственных технологий	Отделение (НОЦ)	Материаловедения
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	22.03.01 Материаловедение и технологии материалов

Тема ВКР:

Эволюция структуры композита на основе титанового сплава при фрикционной перемешивающей обработке	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объект исследования: структура композиционного материала нового типа. Область применения: биосовместимые импланты костей скелета человека и животных.
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	При планировке рабочего места были учтены требования трудового кодекса Российской Федерации и нормативных документов, регламентирующих рабочую зону. - ГОСТ 21889-76 [32] - ГОСТ 12.2.033-78 [33] - ГОСТ 22615-77 [34] - ГОСТ Р 50923-96 [35]
2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	Вредные факторы: Повышенный уровень шума, повышенный уровень вибрации, электромагнитные поля радиочастот. Опасные факторы: движущиеся детали машин и подвижные части производственного оборудования, высокая температура рабочих поверхностей
3. Экологическая безопасность:	При выполнении дипломной работы возможны выбросы в атмосферу вредных веществ путем испарения жидкостей с высокотемпературных рабочих поверхностей. Выбросы в гидросферу и литосферу: химикаты, используемые при травлении образцов

4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	Возможными ЧС являются: подтопления лабораторий, природные пожары. Наиболее типичной ЧС для лабораторий являются пожары при работе с электронной аппаратурой.
-------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Черемискина Мария Сергеевна	-		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4Б71	Назаренко Никита Леонидович		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 65 страниц, 24 рисунка, 12 таблиц, 46 источников.

Ключевые слова: композиционные материалы, фрикционная перемешивающая обработка, титановый сплав, модификация поверхности, Ti-Cu композит, *in situ*.

Объектом исследования является композиционный материал на основе соединения Ti-Cu.

Цель работы – эволюция структуры композита Ti-Cu *in situ* методом фрикционной перемешивающей обработки.

В процессе исследования проводились подготовка образцов к исследованию, изучение микроструктуры, испытания на растяжение, анализ изломов композита с помощью растрового электронного микроскопа, рентгеноструктурный анализ образцов, электронно-микроскопические исследования.

В результате исследования установлено влияние ФПО на свойства и структуру соединения Ti-Cu.

Область применения: предприятия авиационной промышленности, а также медицинские предприятия, специализирующиеся на протезировании.

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	12
1. Литературный обзор:.....	13
1.1 Композитные материалы и сплавы на основе Ti-Cu	13
1.2 Фрикционная перемешивающая обработка	21
1.3 Недостатки основных способов получения соединения Ti-Cu	25
1.4 ФПО при получении композита Ti-Cu.....	25
1.5 Области возможного применения.....	26
2. Объект и методы исследования.....	27
3. Результаты исследования	29
3.1 Металлографические исследования.....	29
3.2 Рентгеноструктурный анализ и электронная микроскопия	32
3.4 Механические испытания	36
4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	38
4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	38
4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования	38
4.1.2 Анализ конкурентных технических решений	38
4.1.3 SWOT – анализ	39
4.2 Планирование научно-исследовательских работ	41
4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования	41
4.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ	42
4.2.3 Разработка графика проведения научного исследования.....	43
4.3 Бюджет научно-технического исследования	47
4.3.1 Расчет затрат на материалы	47
4.3.2 Расчет затрат на специальное оборудования для научных (экспериментальных) работ.....	48
4.3.3 Расчет заработной платы.....	49
Вывод:	51
5. Социальная ответственность.....	52
5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	52
5.1.1 Специальные (характерные для рабочей зоны исследователя) правовые нормы трудового законодательства.	52
5.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя	53
5.2 Профессиональная социальная безопасность	54
5.2.1 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть в лаборатории при проведении исследований.....	55
5.3 Экологическая безопасность.....	57

5.3.2 Анализ влияния процесса исследования на окружающую среду	57
5.3.3 Обоснование мероприятий по защите окружающей среды	57
5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	58
5.4.1 Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть в лаборатории при проведении исследований	58
5.4.2 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС	59
Заключение.....	60
6. Заключение.....	61
Список использованных источников.....	63

ВВЕДЕНИЕ

В последние два десятилетия большое внимание уделяется технологии фрикционной перемешивающей обработки (ФПО). Фрикционная перемешивающая обработка, внесла значительный вклад в создание функционально-градиентных материалов с плавно изменяющимися структурой и механическими свойствами. С использованием фрикционной перемешивающей обработки возможно повышение как трибологических свойств изделий из металлов и сплавов, так и прочностных свойств с модификацией тех областей изделия, где необходимы конкретные функциональные свойства в процессе эксплуатации. При этом имеется ряд неописанных на настоящее время процессов в зоне фрикционной перемешивающей обработки при формировании композиционных материалов с формированием упрочняющих фаз непосредственно в процессе обработки. К ним относятся как механизмы пластического течения материала в зоне обработки по контуру инструмента, так и процессы структурно-фазового приспособления материала при обработке.

ФПО может использоваться для регулировки и контроля микроструктуры материалов, включая устранение дефектов и поэтому широко применяется в титане и его сплавах для применения в биомедицине, аэрокосмической и автомобильной промышленности. В представленной работе рассматриваются методы исследования ФПО, эволюции микроструктуры материалов и краткое изложение свойств материалов, полученных методом ФПО.

Таким образом, целью настоящей работы является получение и исследование структуры, а также механических характеристик композитов, основанных на титановом сплаве Ti6Al4V, армированного порошковым материалом меди (ПМС-1) посредством фрикционной перемешивающей обработки.

1. Литературный обзор:

1.1 Композитные материалы и сплавы на основе Ti-Cu

Большая часть литературы о композиционных материалах посвящена их получению путем плавления и литья [1,2], так же возможно получение соединения путем порошковой металлургии, таким как холодное прессование с последующим вакуумным спеканием [3], горячее прессование порошков Ti и Cu [4]. Диаграмма состояния системы Ti-Cu представлена на рисунке 1.

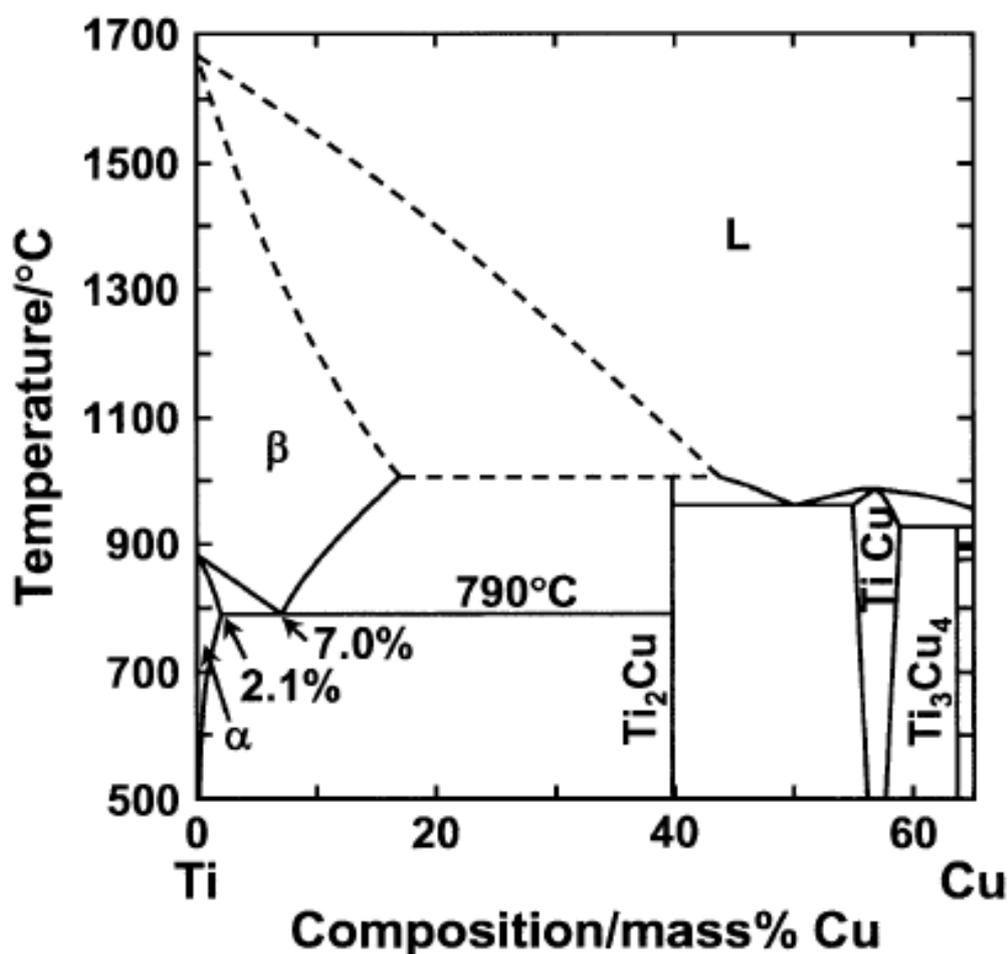


Рисунок 1 – Диаграмма состояния системы Ti-Cu

Так, например в автомобилестроении данный сплав в виде соединения Ti-1Cu и Ti-1Cu-0.5Nb (для систем, требующих лучшей устойчивости к окислению) широко используется для автомобильных выхлопных систем.

Ниже приведены 4 основных свойства титанового композитного материала для автомобильной выхлопной системы:

1. Достаточная прочность при температуре 600 °С и выше; их прочность не должна снижаться после длительного использования.
2. Высокотемпературная коррозия слабо выражена при температурах выше 700°С
3. Высокая пластичность, способность к вытяжке при комнатной температуре.
4. Высокое сопротивление ползучести при температурах выше 600 °С.

Рассмотрим репрезентативные свойства сплавов Ti-1Cu и Ti-1Cu-0.5Nb (рисунок 2, рисунок 3, таблица 1, рисунок 4, рисунок 5) в виде листового проката, каждый из которых был получен разными способами:

1. путем вакуумно-дуговой переплавки
2. горячейковки
3. горячей прокатки
4. холодной прокатки и отжига (750, 1ч)

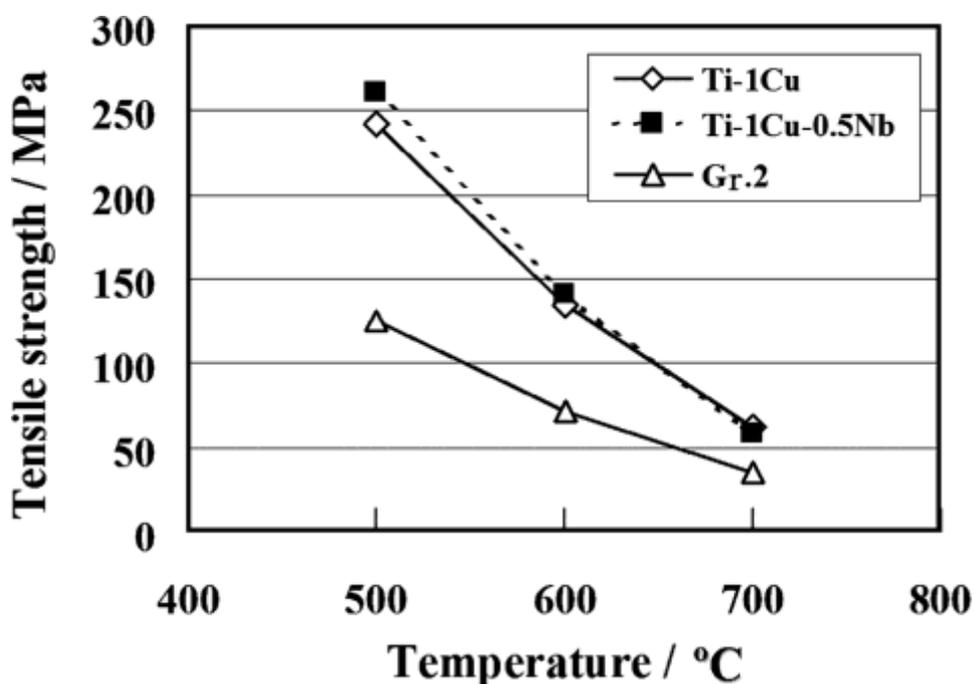


Рисунок 2 – Прочность на растяжение при повышенной температуре (Gr.2 – чистый титан)

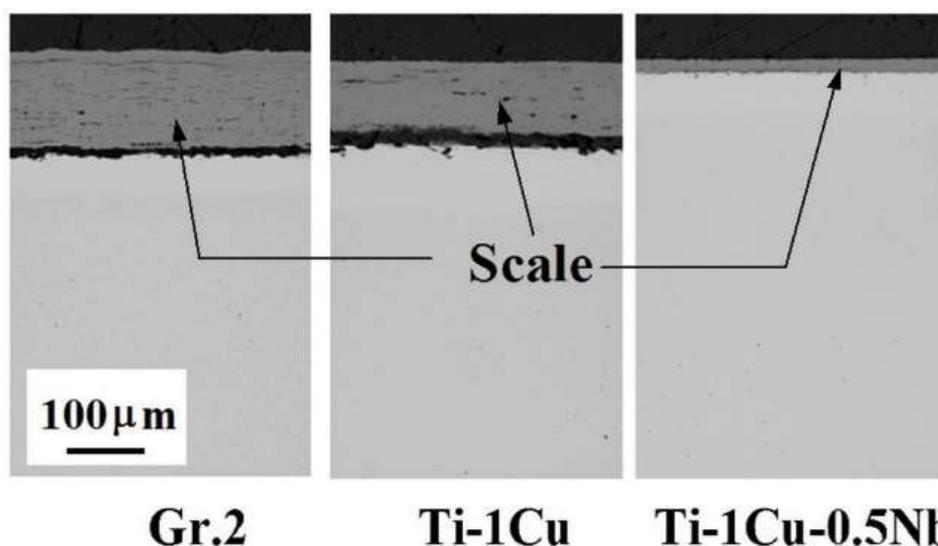


Рисунок 3 – Поперечное сечение образцов при выдержке в окислителе
(воздух, T=800, t =100 часов)

Таблица 1 – Растяжение при комнатной температуре в (L) - продольном, (D) – диагональном, (T) – поперечном направлениях

	Направл ение	0,2%PS (МПа)	Прочн ость на разрыв (МПа)	Удлиненн е (%)
Ti-1Cu	L	195	408	45.2
	D	230	364	46.9
	T	273	366	36.5
Ti-1Cu-0.5Nb	L	228	433	50.4
	D	252	387	49.5
	T	294	384	37.6

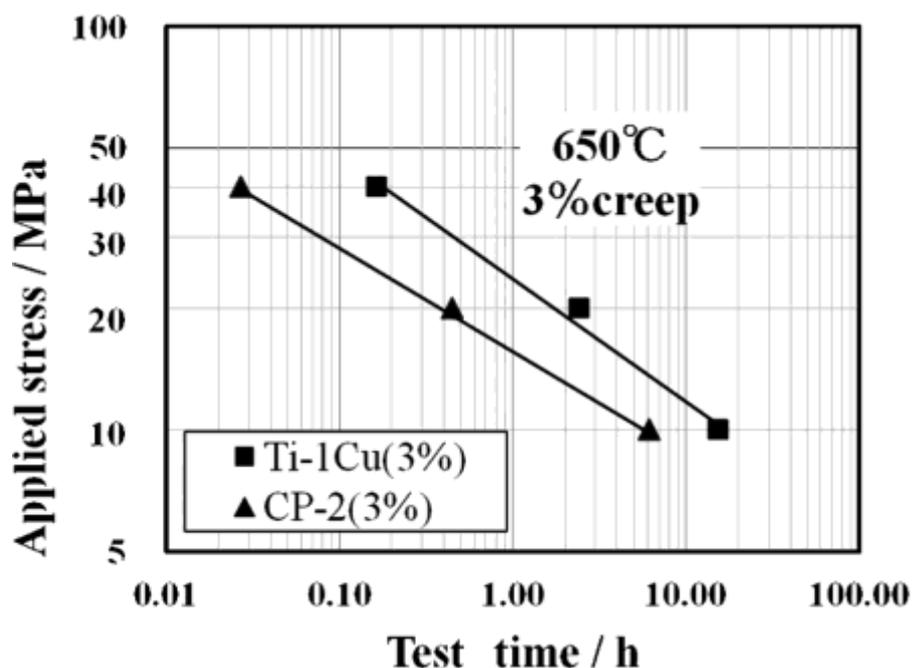


Рисунок 4 - Зависимость между приложенным напряжением и временем, необходимым для 3% деформации ползучестью при $T=650^{\circ}\text{C}$

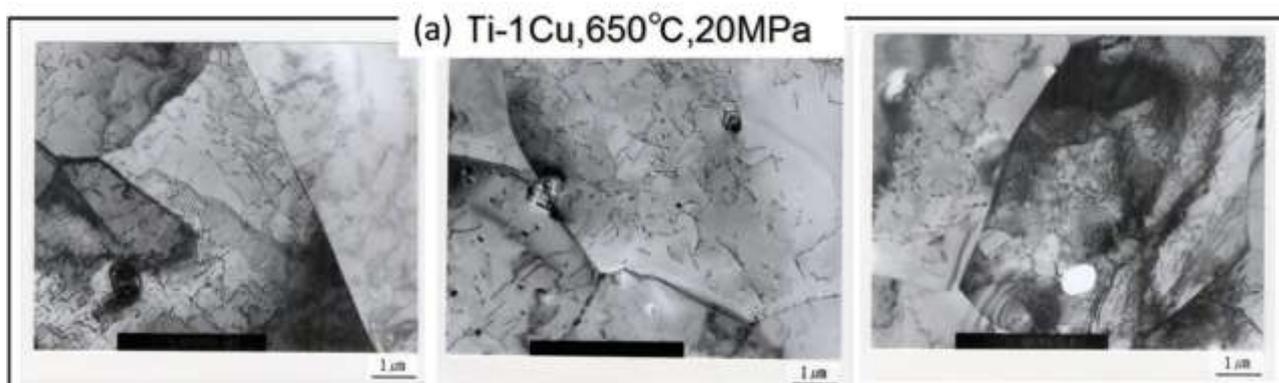


Рисунок 5 – Микроструктура материала при приложенном напряжении в 20MPa при 650°C

В сфере медицинских технологий и способов получения сплавов системы Ti-Cu существуют исследования в области зубного протезирования и, в частности, при литье зубных протезов. Так как чистый титан является отличным биосовместимого материалом, он отлично подходит для медицинских целей, высокую температуру плавления (1670°C) и высокую химическую реактивность при такой температуре решили путем легирования

медью. Температура плавления сплава снижается с увеличением количества меди, например, температура ликвидуса Ti-10%Cu составляет около 1540°C.

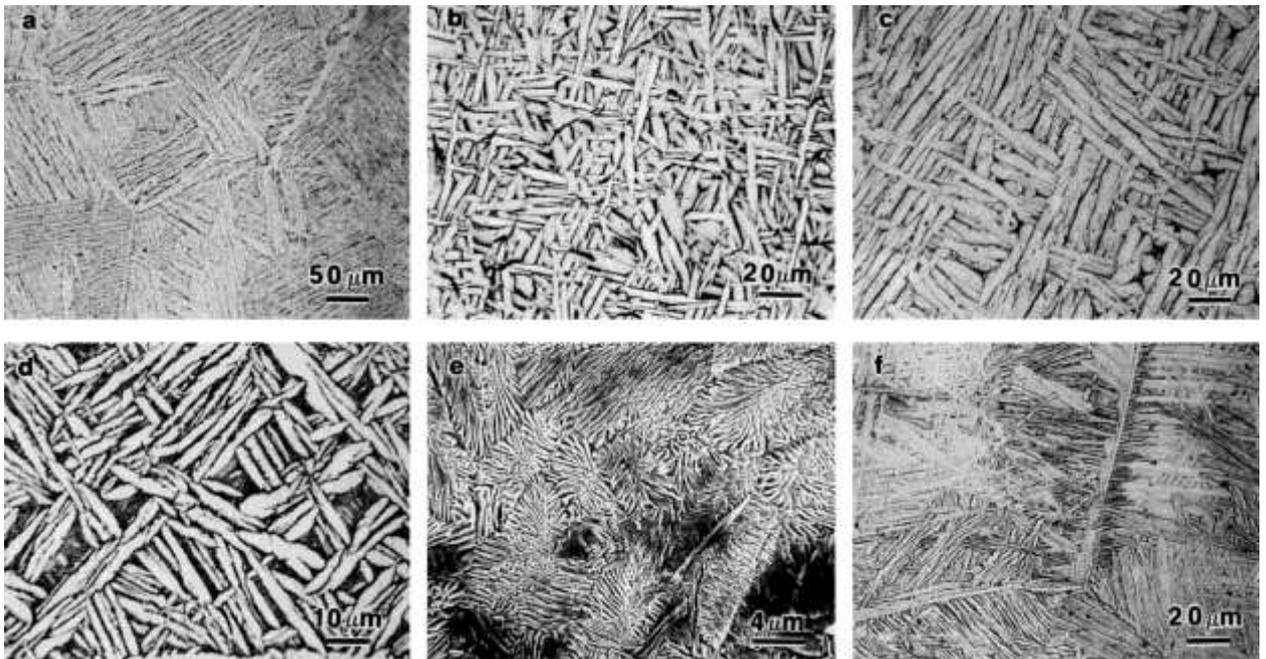


Рисунок 6 - Типичные микроструктуры литых сплавов: (a) CP Ti; (b) 1% Cu; (c) 2% Cu; (d) 5% Cu; (e) 10% Cu; (f) Ti-6Al-4V

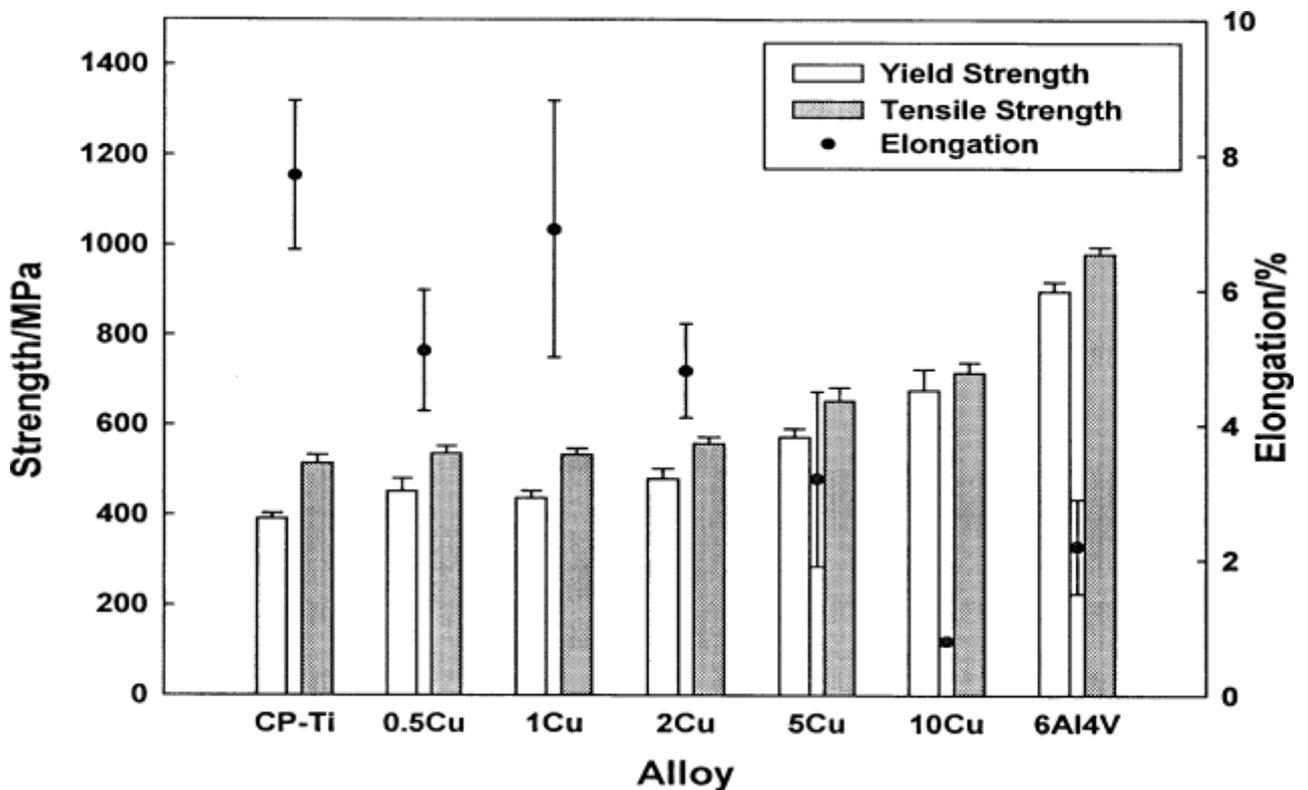


Рисунок 7 - Предел прочности при растяжении, предел текучести и удлинение испытанных сплавов

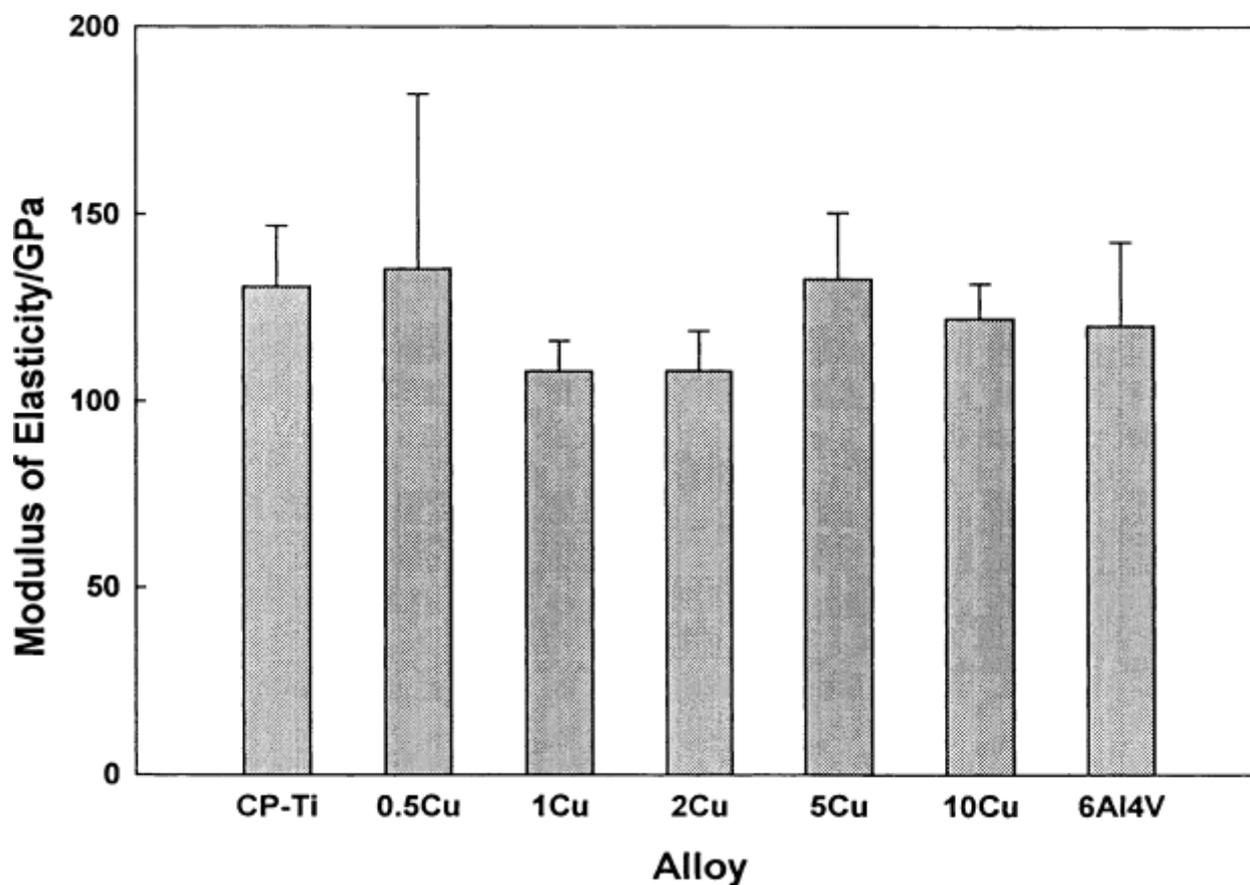


Рисунок 8 - Модуль упругости испытанных сплавов

Серьезным недостатком данных сплавов при литье являлась недостаточная пластичность.

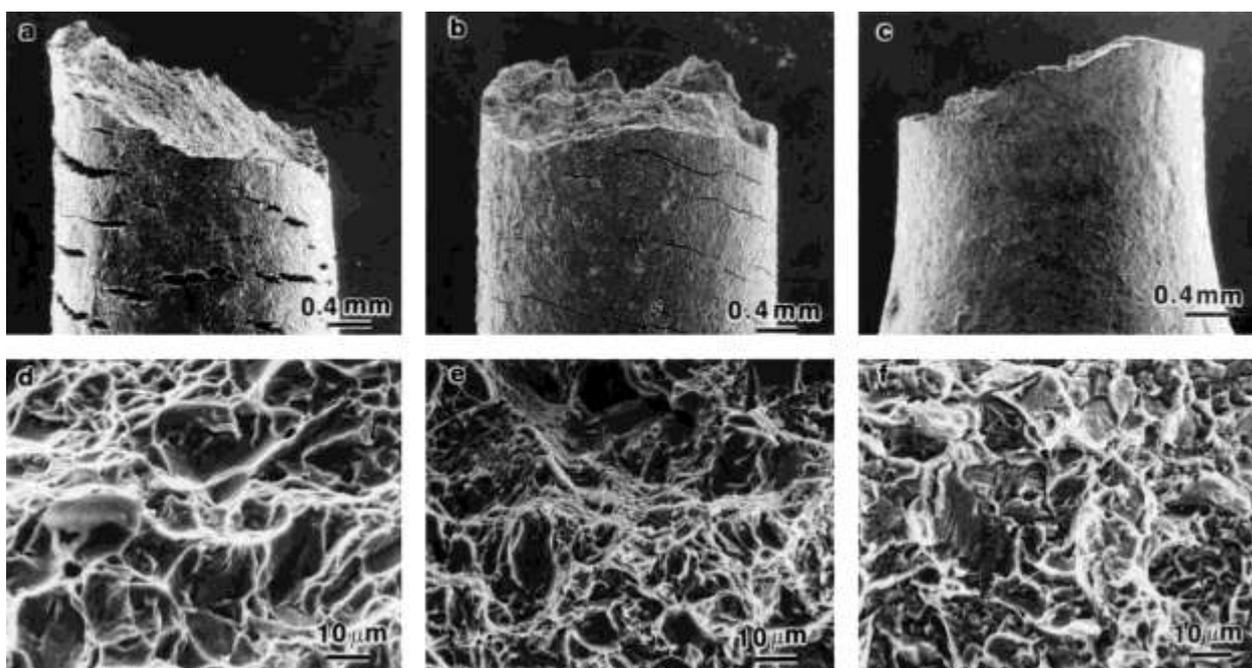


Рисунок 9 – Структуры литых сплавов после испытания на растяжение (a/d)

1% Cu; (b/e) 5% Cu; (c/f) 10% Cu

Вследствие образования β -стабилизированного слоя во всех литых сплавах была обнаружена большая твердость вблизи поверхности по сравнению с твердостью матрицы композита. Считалось [2], что увеличение твердости происходит в основном за счет диффузии кислорода, выделяющегося в результате реакции расплавленного металла и формы.

Порошковая металлургия (ПМ) является одной из технологий для разработки сплавов Ti-Cu с целью биомедицинского использования. Основные исследования сосредоточены на использовании метода холодного прессования.

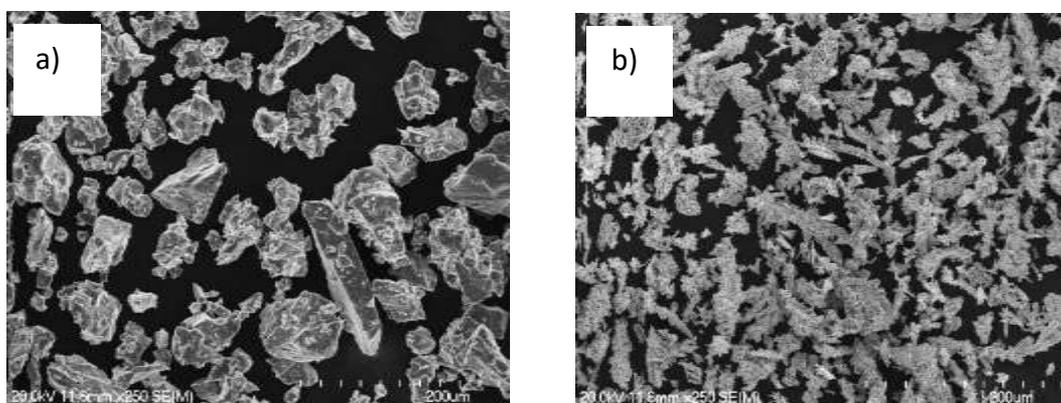


Рисунок 10 – Морфология исходных материалов в виде порошка: Ti (a) и Cu (b)

Полученная структура представлена на следующем рисунке:

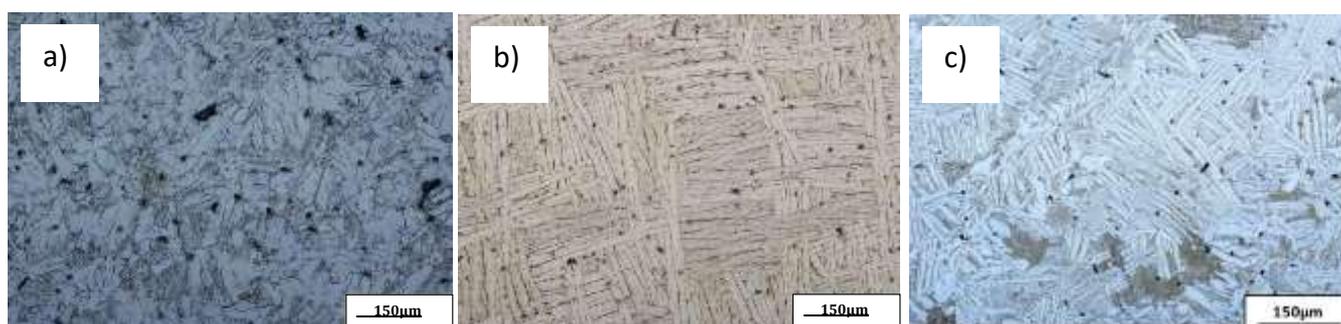


Рисунок 11– Микроструктура спеченных сплавов Ti-Cu:

a -Ti-0.5Cu; b – Ti-2.5Cu; c – Ti-5Cu

Из рисунка 11 и таблицы 2 можно заметить, что фактические значения свойств при растяжении (предел текучести - Y_S , предел прочности - UTS и удлинение) сильно зависят от химического состава сплава и процесса

производства. В частности, предел текучести увеличивается с 467 МПа до 627 МПа, а удлинение уменьшается с 15,0 % до 9,0 % при увеличении содержания Cu в сплаве. Кроме того, для спеченных материалов, дальнейшее увеличение предела текучести до 602 МПа до 757 МПа с увеличением содержания Cu достигается с помощью этапаковки после обработки, а удлинение кованных образцов увеличивается (3,9–6,7%) с увеличением содержания Cu. Что касается твердости сплавов, существует четкая линейная зависимость между содержанием Cu и твердостью материалов как для спеченных, так и для кованных образцов β , так как чем выше содержание Cu, тем тверже сплав.

Сплав упруго деформируется примерно до 500 МПа, прежде чем начинает деформироваться пластически, предел упругости увеличивается с увеличением кол-ва Cu в сплаве.

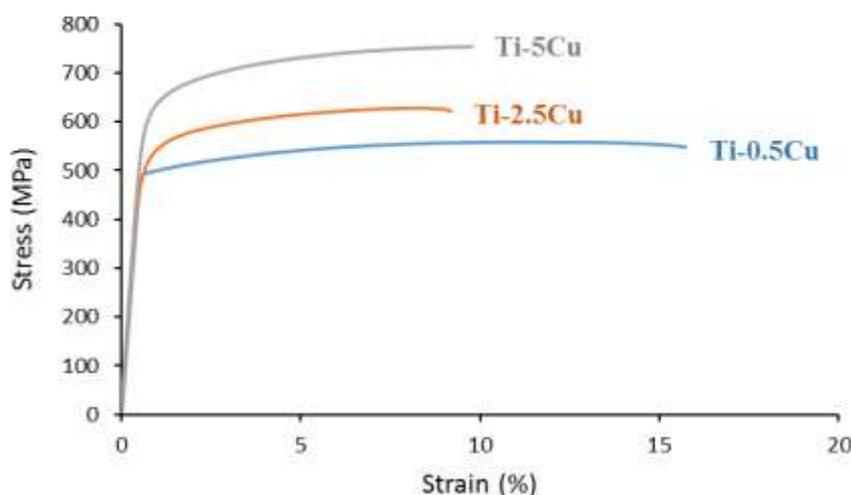


Рисунок 12 - Зависимость напряжение-деформация композиционных материалов

Таблица 2 – Механические свойства спеченных и кованных сплавов системы Ti-Cu

Material	Предел текучести (MPa)	Предел прочности (MPa)	Удлинение (%)	Твердость по Викерсу
Ti-0.5Cu (спеченный)	467 ± 16	555 ± 8	15.4 ± 2.8	174 ± 2.8
Ti-2.5Cu (спеченный)	516 ± 8	625 ± 9	10.1 ± 0.6	204 ± 6.9

Ti-5Cu (спеченный)	627 ± 14	754 ± 17	9.5 ± 1.5	227 ± 10.4
Ti-0.5Cu (β-кованный)	602 ± 26	650 ± 3	3.9 ± 0.4	235 ± 3.7
Ti-2.5Cu (β-кованный)	652 ± 14	749 ± 34	5.0 ± 1.1	269 ± 18.9
Ti-5Cu (β-кованный)	757 ± 16	901 ± 5	6.7 ± 0.6	302 ± 21.6

Таблица 2 – Механические свойства спеченных и кованных сплавов системы Ti-Cu

1.2 Фрикционная перемешивающая обработка

ФПО использует несколько подходов к включению/соединению частиц и материалов:

1. Groove Filling Method (Метод заполнения канавок)

Для получения объёмных композитов возможно делать более глубокие канавки. Для изготовления композитов применялись как однопроходная, так и многопроходная ФПО. Этот метод достаточно прост и как правило дает композиты с равномерным распределением частиц. Более того, равномерность распределения увеличивается с количеством проходов. Что наглядно проиллюстрировано на рисунке (второй). Данный метод приобрел значительную популярность для изготовления металломатричных композитов

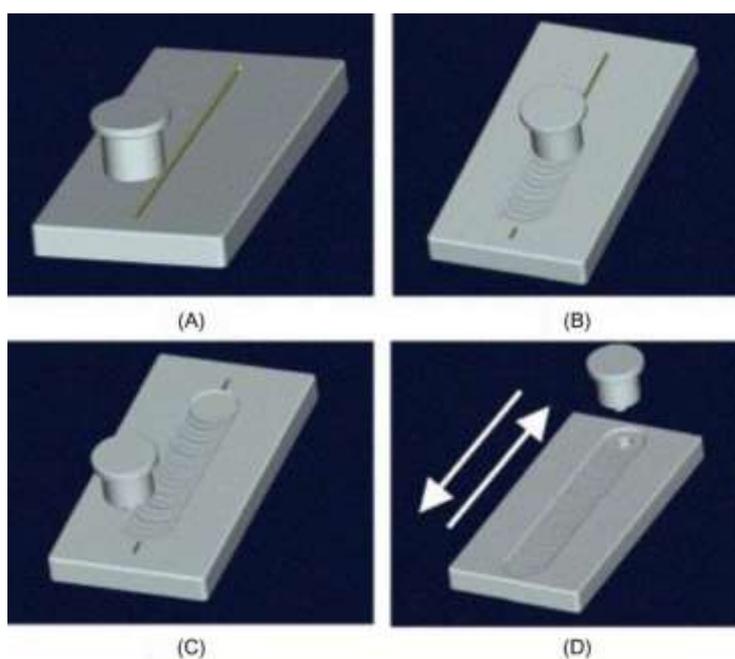


Рисунок 13 – Схематическое изображение метода ФПО

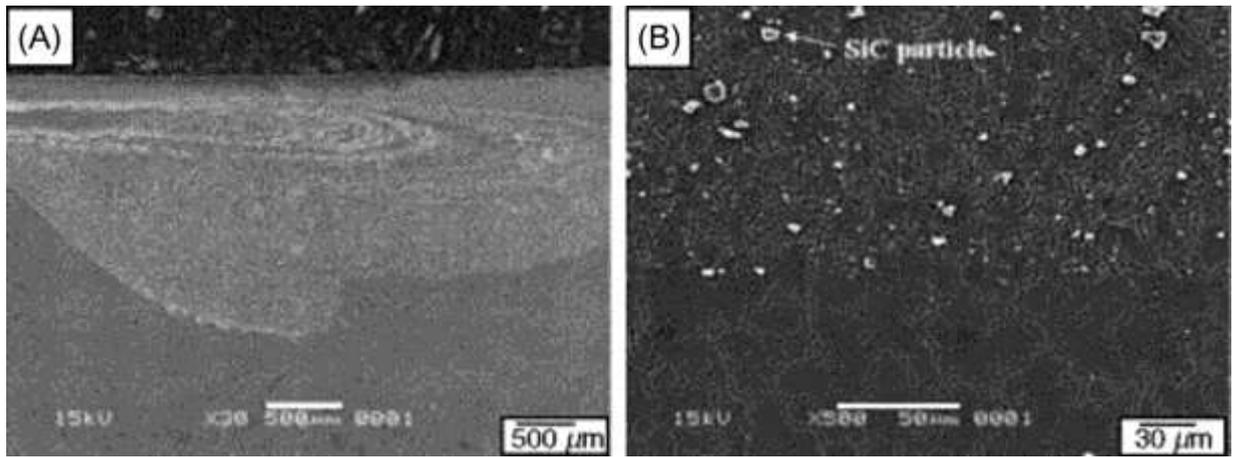


Рисунок 14 - РЭМ-изображения зоны перемешивания (А) с частицами SiC и (В) зоны раздела между композитом AZ31/SiC и AZ31 [5].

2. Drill-Hole Method (Метод заполнения отверстий)

Аналогичный подход, в котором используется ряд отверстий на пластине для введения порошков необходимого химического состава. Отверстия, расположенные в пределах диаметра инструмента, заполняются армирующим порошком, далее проводится ФПО. Данный метод также использовался для включения нановолокон TiO₂ в Al [6]. Кроме того, он также использовался для изготовления функционально градиентных композитов Al–TiC [7].

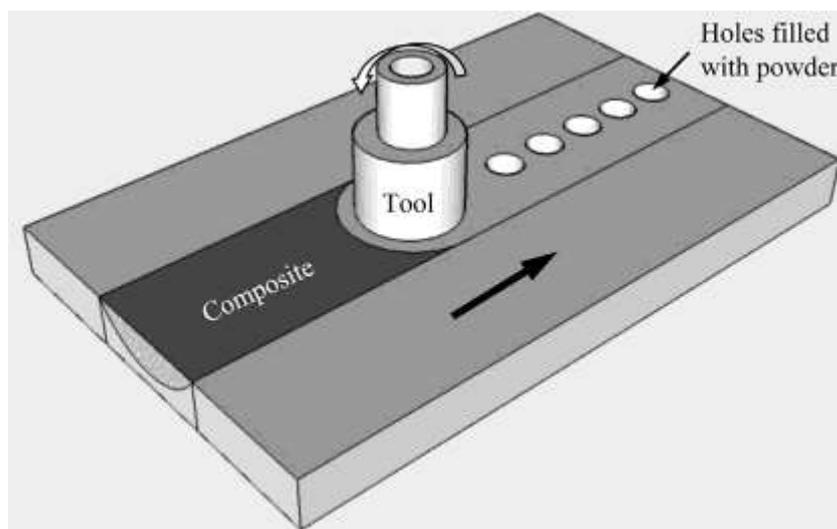


Рисунок 15 – Схематическое изображение метода

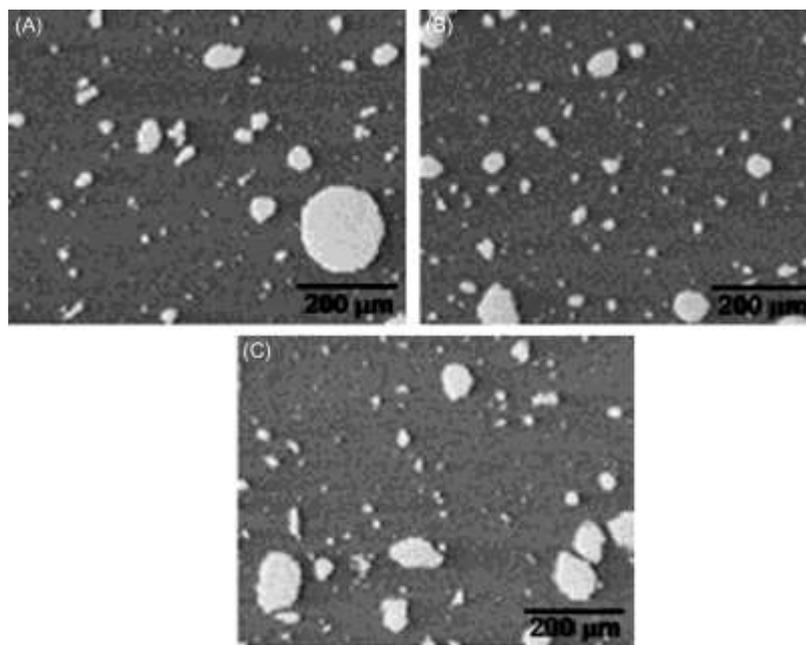


Рисунок 16 - РЭМ-изображения, показывающие равномерно распределенные частицы NiTi в различных областях зерен композитов ФПО (А–С) [8].

3. Powder Metallurgy Route

В некоторых случаях для обработки металломатричных композитов используется комбинация порошковой металлургии (ПМ) и ФПО. При таком подходе сначала с помощью обычного процесса ПМ изготавливается небольшая заготовка, содержащая желаемое армирование порошком в матрице. Он включает смешивание порошков матрицы и армирующего материала с последующим уплотнением и спеканием. Спеченная заготовка затем подвергается ФПО, что приводит к окончательной консолидации. Начальное спекание в данном случае используется только для обеспечения достаточной прочности заготовки, чтобы она не разрушилась во время ФПО. Окончательное уплотнение происходит во время ФПО, перераспределение армирующего материала также происходит из-за потока материала в ФПО. Поэтому при таком сочетании ПМ и ФПО ожидается получение плотного композита с закрытой пористостью и равномерным распределением армирующего компонента.

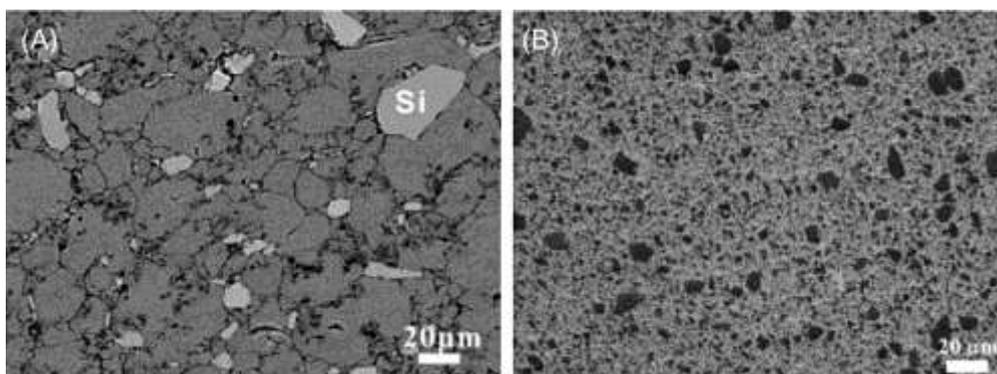


Рисунок 17 - РЭМ-изображения (А) Al-10Si, спеченного при 803 К, и (В) Al-30Si, полученного в результате четырех проходов FSP [9].

4. In situ Method

Создание армирующих частиц во время процесса вместо их отдельного добавления имеет такие преимущества как, чистая граница раздела частиц с матрицей, лучшее сцепление частиц с матрицей, термодинамически стабильные и более мелкие частицы. Синергетический эффект фрикционного нагрева и экзотермическая природа реакции *in situ* были использованы для обработки композитов *in situ* методом ФПО. Для инициирования реакции *in situ* обычно используются два подхода.

В одном подходе исходный порошок сначала загружается в базовую пластину через канавки или просверленные отверстия, а затем подвергается ФПО.

Во втором подходе используется ПМ. Исходные порошки предварительно смешиваются и прессуются. Затем заготовка из ПМ подвергается ФПО для обработки композита *in situ*. Композиты Al-Al₃Ti-Al₂O₃ были получены с помощью этого подхода путем подвергания заготовки Al-TiO₂, изготовленной с помощью ПМ, реактивной ФПО. Компоненты, Al и TiO₂, вступали в реакцию во время ФПО и образовывали дисперсные частицы Al₃Ti и Al₂O₃ в матрице Al [10,11].

1.3 Недостатки основных способов получения соединения Ti-Cu

Исходя из анализа основных методов получения сплавов на основе Ti-Cu можно выделить ряд основных недостатков:

В методах порошковой металлургии основным недостатком является остаточная пористость, придающая изделиям нежелательные изменения механических свойств.

Литье данного сплава требует специальных условий и оборудования из-за реакции окисления и высокой температуры плавления. Помимо увеличения стоимости, этот подход так же характеризуется рядом недостатков, включая проблемы нежелательной сегрегации и ликвации.

1.4 ФПО при получении композита Ti-Cu

Метод фрикционной перемешивающей обработки (ФПО) является перспективным методом получения новых композиционных материалов на основе титана [12,13]. Ранее была показана возможность получения композита Ti6Al4V/TiO₂ ФПО, имеющего повышенную микротвердость поверхности и хорошую биосовместимость. В работе [14] получен композит Ti6Al4V-B₄C FSP с повышением твердости, модуля упругости, предела прочности при сжатии на ~57%, 17%, 47% соответственно, по сравнению с исходным Ti6Al4V. ФПО характеризуется сочетанием очень больших деформаций, высоких температур и высоких скоростей деформации. В Ti6Al4V процессы деформации дополнительно сопровождаются фазовыми превращениями, что делает их особенно интересными для фундаментального изучения. Особый интерес вызывает *in situ* композит системы Ti-Cu, так как небольшое количество меди (~5vol.%) приводит к значительному повышению износостойкости [15], коррозионной стойкости [16], высокой прочности при повышенных температурах [17], обладают огнезащитной функцией [18,19], наилучшими антибактериальными свойствами и хорошей биосовместимостью [20–22].

1.5 Области возможного применения

Имея на выходе прекрасные антибактериальных свойства и хорошую биосовместимость основным направлением при использовании данного материала можно с уверенностью назвать сферу медицинских технологий: протезирование и имплантирование в частности. Также нельзя не учитывать тот факт, что при использовании *in situ* ФПО метода, можно получать сплавы с бездефектной поверхностью при невысоком содержании меди в % долях. Известно, что повышенное содержание меди может вызывать диарею, тошноту, расстройство желудка и даже повреждение тканей. Поэтому, использование сплавов Ti-Cu полученными другими способами с содержанием меди >6% может быть связано с определенными рисками [3].

2. Объект и методы исследования

Настоящие исследования выполнены на промышленных пластинах Ti6Al4V размером 60×300×2.5 мм³ без предварительной термообработки. Рентгенофлюорисцентным анализом был уточнен химический состав подложки:

Таблица 3 – Состав подложки Ti6Al4V

Содержание масс. %			
Al	V	Fe	Ti
0.34	0.1	0.022	99.538

Для получения *in situ* композита Ti-Cu использовали промышленные порошки Cu (pure 99.5%) со средним размером частиц 10.5 ± 0.5 мкм.

Перед изготовлением композитов на пластинах Ti6Al4V были сделаны отверстия для порошка Cu диаметром 1.2 мм, глубиной 2 мм и интервалом между отверстиями 5.4 мм, как показано на рисунке 18а. Диаметр, глубина и интервал между отверстиями создавали общий объем в зоне перемешивания пластины Ti6Al4V около 5 vol. % Cu.

Далее порошки Cu засыпали в отверстия и уплотняли механическим способом. В процессе ФПО использовали инструмент из суперсплава на основе никеля с резьбовым пином в форме усеченного конуса высотой 2 мм, диаметром плеч инструмента 20 мм, углом наклона инструмента был 3°. Во всех экспериментах Ti6Al4V использовалось направление вращения инструмента против часовой стрелки (рисунок 18а). Для равномерного распределения порошков Cu внутри матрицы Ti6Al4V проводили многопроходную ФПО пластин Ti6Al4V со 100% перекрытием без изменения направления между проходами. Во избежание перегрева инструмента использовали систему водяного охлаждения инструмента. Аргон использовался в качестве защитного газа для предотвращения окисления обрабатываемой пластины Ti6Al4V и пина инструмента в процессе FSP.

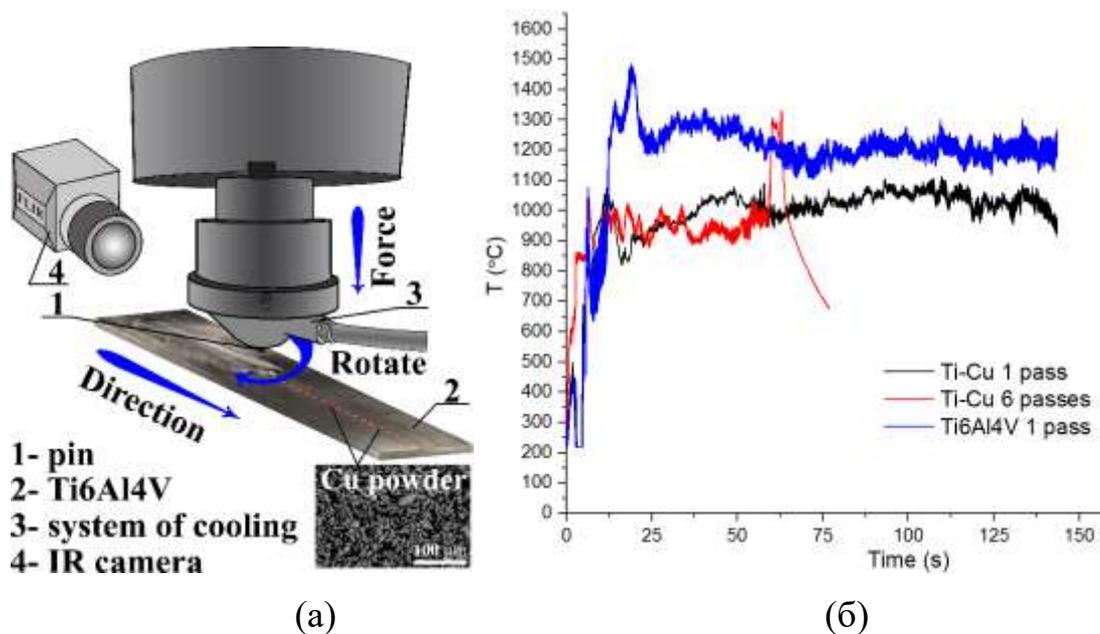


Рисунок 18 - Схема процесса FSP (а); температурный профиль в процессе FSP (б)

Микроструктурные характеристики полученных *in situ* композитов Ti-Cu исследовали с помощью оптической микроскопии (ОМ; Altami Met 1S) и растровой электронной микроскопии (SEM, Zeiss LEO EVO 50). Поперечные сечения образцов вырезали электроэрозионным методом и готовили стандартным металлографическим способом. Химический состав локальных участков композитов анализировали с помощью SEM, оснащенной системой анализа энергетической рентгеновской спектроскопии (EDS). Тонкие фольги, вырезанные в зонах перемешивания поверхностных *in situ* композитов Ti-Cu, были приготовлены сфокусированным ионным пучком и проанализированы с помощью просвечивающей электронной микроскопии (ТЕМ) на микроскопе JEOL-2100. Фазы, присутствующие в поверхностных композитах, исследовали на дифрактометре XRD-7000S (с излучением $Co_{K\alpha}$). Испытания на одноосное растяжение проводили на универсальной испытательной машине УТС-110М-100.

4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

При создании метода необходимо определить потенциального потребителя данной технологии. Ввиду того, что способ получения композита методом ФПО наукоемкий и технически сложный и для того, чтобы им воспользоваться, необходимы знания и умения в области электротехники, физики и материаловедения, потенциальными потребителями продукции будут являться предприятия авиационной промышленности, а также медицинские предприятия, специализирующиеся на протезировании.

4.1.2 Анализ конкурентных технических решений

В качестве основных конкурентных технических решений были выбраны следующие технологии:

- Получение композита Ti-Cu методом ФПО (данная работа) (1),
- Литье сплава Ti-Cu (2).

Результаты конкурентного анализа приведены в таблице 4:

Таблица 4 – Оценочная карта

Критерии оценки	Вес	Баллы		Конкурентоспособность	
		Б ₁	Б ₂	К ₁	К ₂
Технические критерии оценки ресурсоэффективности					
1. Энергоэкономичность	0,3	3	4	1,5	0,9
2. Функциональная мощность	0,2	5	3	1,0	0,6
3. Повышение производительности труда пользователя	0,2	5	4	1,0	0,8
4. Простота эксплуатации	0,05	4	5	0,2	0,25

5. Стойкость инструмента, высокий срок эксплуатации оборудования	0,1	5	4	0,5	0,4
6. Надежность	0,1	5	4	0,5	0,4
Экономические критерии оценки эффективности					
7. Конкурентоспособность технологии	0,05	5	4	0,25	0,2
Итого:		35	26	4,95	3,55

Таблица 4 – Оценочная карта

- Критерий «функциональная мощность» отражает наличие, либо отсутствие дополнительных возможностей.
- Под «простотой эксплуатации» понимается то, насколько быстрее и проще проходит данный процесс для получения требуемых свойств материала, что так же снижает требования к уровню квалификации привлекаемого персонала.
- Под «надежностью» подразумевается уровень дефектности получаемого продукта, повышение надежности достигается за счет снижения дефектности, а также за счет отмены дополнительной обработки.

Конкурентоспособность проекта 1 исполнения относительно проекта 2 исполнения:

$$\bullet K_{12} = \frac{K_1}{K_2} = \frac{5,0}{3,5} = 1,39$$

4.1.3 SWOT – анализ

Описание сильных и слабых сторон проекта, выявление возможностей и угроз. Результаты представлены в таблице 5:

Таблица 5 – Результаты первого этапа SWOT – анализа

	Сильные стороны 1. Повышение эффективности производственных процессов; 2. Улучшение качества металлургической продукции; 3. Повышение стойкости обрабатываемого инструмента и	Слабые стороны 1. Отсутствие четких режимов для проведения технологии 2. Отсутствие необходимого оборудования для получения желаемого эффекта 3. Малое количество предприятий по распространению и применению данной технологии.
--	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

	долговечности оборудования. 4. Широкие возможности по масштабированию проекта	
Возможности 1. Появление дополнительного спроса на новый продукт 2. Проектирование и изготовление нового металлообрабатывающего оборудования	В1С1С2С3С4: Продолжение проведения исследований ФПО при различных режимах и на других видах соединений металлов. В2С1С2С3С4: Модернизация существующего оборудования под технологию ФПО	В1С1: Инженерам не нужно вдаваться в подробности проведения технологии, что оптимизирует их работу. В2С2: При всей сложности физики процесса ФПО ход исследования достаточно понятный и доступный для начинающих специалистов.
Угрозы 1. Отсутствие мотивации к дальнейшему развитию проекта 2. Проблемы внешней политики, которые ведут к ограничению распространения проекта.	У1С1С2С3С4: Режимы проведения технологии не всегда дают положительный результат, что требует нетривиальных методов проведения процесса и большого опыта инженера.	У2С2: Использование привычной технологии процесса потребует большой работы для увеличения масштабов проекта, что увеличит его стоимость.

Таблица 5 – Результаты первого этапа SWOT – анализа

Интерактивная матрица проекта представлена в таблицах:

Таблица 5.1 – Интерактивная матрица проекта (сильные стороны)

	Сил1	Сил2	Сил3	Сил4
В1	+	+	+	+
В2	+	+	+	+
У1	+	+	+	+
У2	-	-	-	-

Таблица 5.2 – Интерактивная матрица проекта (слабые стороны)

	Слаб1	Слаб2	Слаб3
В1	+	-	-
В2	-	+	-
В3	-	-	-
У1	+	-	-
У2	-	+	-

4.2 Планирование научно-исследовательских работ

4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

Перечень этапов и работ в рамках проведения научного исследования представлен в таблице 6:

Таблица 6 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№	Продолжительность, дни	Содержание работ	Исполнитель	Загрузка исполнителей
Постановка задачи и аналитический обзор	1	1	Постановка задачи	НР	НР-100%
	2	4	Анализ предметной области (актуальность, цель, назначение, область применения)	ИТ, НР	НР – 20% ИТ -100%
	3	5	Анализ технических требований к медицинским биоматериалам	ИТ, НР	НР-30% ИТ-100%
Разработка технического задания	4	2	Разработка и утверждение технического задания	НР, ИТ	НР-100% ИТ-20%
	5	17	Изучение литературы	ИТ	ИТ-100%
	6	5	Проведение консультаций	НР, ИТ	НР-100% ИТ-20%
Проведение экспериментальных работ	7	2	Подготовка образцов к исследованиям	ИТ	ИТ-100%
	8	5	Выполнение фрикционной перемешивающей обработки, формирование композита	НР	НР - 100%
	9	15	Проведение исследовательских работ (испытания материалов на физико-механические свойства, исследование структуры).	ИТ, НР	НР-10% ИТ-100%
Обобщение и оценка результатов	10	24	Обработка полученных результатов	ИТ	ИТ-100%
	11	6	Визуализация (анализ результатов исследования, выводы по проделанной работе)	ИТ, НР	НР-30% ИТ-100%
Оформление отчета по работе	12	10	Составление отчетной документации проекта	ИТ	ИТ-100%
	13	1	Сдача проекта	ИТ	ИТ-100%

НР – научный руководитель, ИТ – инженер-технолог

4.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ

Расчет продолжительности этапов работ осуществляется двумя методами:

- технико-экономическим;
- опытно-статистическим.

В данном случае используется опытно-статистический метод, который реализуется двумя способами:

- Аналоговый;
- Вероятностный.

Для определения ожидаемого значения продолжительности работ $t_{ож}$ применяется вероятностный метод – метод двух оценок t_{min} и t_{max} .

$$t_{ож} = \frac{3t_{min} + 2t_{max}}{5},$$

где t_{min} - минимальная трудоемкость работ, чел/дн.;

t_{max} -максимальная трудоемкость работ, чел/дн.

Для выполнения перечисленных работ потребуются следующие специалисты:

- научный руководитель (НР);
- инженер-технолог (ИТ).

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определим продолжительность каждой работы в рабочих днях T_p , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями. Такое вычисление необходимо для обоснованного расчета заработной платы, так как удельный вес зарплаты в общей сметной стоимости научных исследований составляет около 65 %.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожi}}{Ч_i},$$

где T_{pi} – продолжительность одной работы, раб. дн.;

$t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.

$Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

4.2.3 Разработка графика проведения научного исследования

Для построения линейного графика необходимо рассчитать длительность этапов в рабочих днях, а затем перевести в календарные дни.

Расчет ведется по формуле:

$$T_{РД} = \frac{t_{ОЖ}}{K_{ВН}} \cdot K_{Д},$$

где $t_{ОЖ}$ – трудоемкость работы, чел/дн;

$K_{ВН}$ – коэффициент выполнения нормы ($K_{ВН} = 1$);

$K_{Д}$ – коэффициент, учитывающий дополнительное время на компенсации и согласование работ ($K_{Д} = 1.2$).

$$T_{КД} = T_{РД} \cdot T_{К}$$

где $T_{К}$ – коэффициент календарности.

$$T_{К} = \frac{T_{КАЛ}}{T_{КАЛ} - T_{ВД} - T_{ПД}},$$

где $T_{КАЛ}$ – календарные дни ($T_{КАЛ} = 365$);

$T_{ВД}$ – выходные дни ($T_{ВД} = 104$);

$T_{ПД}$ – праздничные дни ($T_{ПД} = 12$).

$$T_{К} = \frac{365}{365 - 104 - 12} = 1,46$$

В таблице 7 приведены длительность этапов работ и число исполнителей, занятых на каждом этапе проектирования.

Данные расчеты необходимы для построения линейного графика.

Таблица 7 - Длительность этапов работ и число исполнителей, занятых на каждом этапе проектирования

Название работы	Исполнители	Трудоемкость работ, дни			Длительность работ, чел - дни			
		t _{min}	t _{max}	t _{ож}	ТРД		ТКД	
					НР	ИТ	НР	ИТ
Постановка задачи	НР	1	2	1,4	1,6 8	-	2,45	-
Анализ предметной области (актуальность, цель, назначение, область применения)	НР, ИТ	3	6	4,2	1,0 1	5,04	1,82	7,36
Анализ технических требований к медицинским биоматериалам	НР, ИТ	4	7	5,2	1,8 7	6,24	2,73	9,11
Разработка и утверждение технического задания (ТЗ)	НР, ИТ	1	4	2,2	2,6 4	0,53	3,85	0,77
Изучение литературы	ИТ	16	19	17, 2	-	20,6	-	30,1 4
Проведение консультаций	НР, ИТ	4	7	5,2	6,2 4	1,25	9,11	1,82 2
Подготовка образцов к исследованиям	ИТ	1	3	5,2	-	2,16	-	3,15
Выполнение фрикционной перемешивающей обработки, формирование композита	НР	4	7	5,2	6,2 4	-	9,11	-
Проведение исследовательских работ (испытания материалов на физико-механические	НР, ИТ	14	17	15, 2	1,8 2	18,2	2,66	26,6

свойства, исследование структуры).								
Обработка полученных результатов	ИТ	23	26	24, 2	-	29	-	32,4
Визуализация (анализ результатов исследования, выводы по проделанной работе)	ИТ	5	8	6,2	2,2 3	7,44	3,26	8,86
Составление отчетной документации проекта	ИП	9	12	10, 2	-	12,2	-	15,8 7
Сдача проекта	ИП	1	2	1,4	-	1,7	-	2,45
Итого:				10 3	23, 7	105	35	152

Таблица 7 - Длительность этапов работ и число исполнителей, занятых на каждом этапе проектирования

4.3 Бюджет научно-технического исследования

В состав затрат на получение композитного материала на основе Ti-Cu методом ФПО, включается стоимость всех расходов, необходимых для реализации комплекса работ, составляющих содержание данной разработки. Расчет сметной стоимости на выполнение данной работы производится по следующим статьям затрат:

- материалы и покупные изделия;
- основная заработная плата;
- дополнительная заработная плата;
- отчисления в социальные фонды;
- расходы на электроэнергию;
- амортизационные отчисления;
- прочие расходы.

4.3.1 Расчет затрат на материалы

Отражает стоимость материалов, используемых при формировании композитного материала на основе соединения Ti-Cu методом ФПО.

Таблица 8 – Расходные материалы

Наименование материалов	Цена ед., (руб.)	Количество	Сумма, (руб.)
Титан (пластины)	1000	2 шт	2000
Медь (порошок ПМС-1)	590	200 г	118
Шлифовальная бумага	16.2	10	162
Полировальное сукно	80	2шт.	160
Алмазная паста	4	20гр.	80
Халат	1000	1 шт.	1000
Медицинские перчатки	16	2 шт.	32

Кислоты для травления	0,053	200мл.	10,6
Итого			3562.6

Таблица 8 – Расходные материалы

Согласно таблице 8 расход на материалы составляет $C_{\text{мат}} = 3562.6$ рублей.

4.3.2 Расчет затрат на специальное оборудования для научных (экспериментальных) работ

Для проведения научно-исследовательской работы требуются следующие виды оборудования: станок полировально-шлифовальный, оптический микроскоп «Altami Met 1S», микротвердомер ПМТ – 3, универсальная испытательная машина «УТС-110М-100», просвечивающий электронный микроскоп «JEOL-2100», растровый электронный микроскоп «Zeiss LEO EVO 50», дифрактометр XRD-7000S, компьютер и принтер.

Расчет амортизации вёлся по формулам: $A_{\text{год}} = \frac{C}{T}$, где $A_{\text{год}}$ - годовая амортизация, C – стоимость оборудования, T – срок эксплуатации [лет];

$A_{\text{пр}} = \frac{A_{\text{год}}}{365} \cdot t_i$, где $A_{\text{пр}}$ - амортизационные отчисления за срок реализации проекта, t_i - срок использования оборудования в НТИ [кал.дн.].

Результаты расчетов представлены в таблице 9:

Таблица 9 – Расчет величины амортизационных отчислений

Наименование оборудования	Стоимость, руб.	Срок эксплуатации, лет	Срок использования в НТИ, кал.дн.	Амортизационные отчисления, руб.
Универсальная испытательная машина УТС-110М-100	365 000	10	1	100

Оптический микроскоп Altami Met 1S	290 000	10	15	1191,8
Растровый электронный микроскоп Zeiss LEO EVO 50	694 000	10	5	950,7
Рентгеновский дифрактометр XRD-7000S	4 187 000	10	1	1147,1
Просвечивающий электронный микроскоп JEOL-2100	15 065 700	10	1	4127,6

Таблица 9 – Расчет величины амортизационных отчислений

4.3.3 Расчет заработной платы

Расчет основной заработной платы. Под основной заработной платой понимаем заработную плату руководителя и инженера-технолога. Размер основной заработной платы устанавливается, исходя из численности исполнителей, трудоемкости и средней заработной платы за один рабочий день. Месячный оклад руководителя составляет 60 000 руб., инженера – 25 000 руб.

Средняя заработная плата рассчитывается следующим образом:

$$\text{Дневная з/плата} = \text{Месячный оклад} / 20,83 \text{ день}$$

Соответственно дневной оклад руководителя равен 2880,4 руб., а инженера-технолога – 1200,1 руб.

Расчеты затрат на основную заработную плату приведены в таблице 10. При расчете учитывалось, что в году 250 рабочих дней и, следовательно, в месяце 20,83 рабочий день, а затраты времени на выполнение работы по каждому исполнителю брались из таблицы 6. Коэффициент, учитывающий коэффициент по премиям $K_{пр}=50\%$, районный коэффициент $K_{рк}=30\%$ ($K = K_{пр} * K_{рк} = (1 + 0,5) * (1+0,3) = 1,95$);

Таблица 10 – Затраты на основную заработную плату

Исполнители	Оклад	Среднедневная ставка, руб/день	Затраты времени, дни	Коэффициент	Фонд з/пл, руб.
Руководитель	60000	2880,4	24	1,95	134 802,72
Инженер-технолог	25000	1200,1	105	1,95	245 720 ,4
Итого					380 523,195

Основная заработная плата $C_{\text{осн}}$ будет равна 380 523,195руб.

Таблица 11 – Расчет бюджета затрат НИИ

Наименование статьи	Сумма, руб.	Порядок расчета
Материальные затраты НИИ	3 562,6	Таблица 7
Затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	7 517,2	Сумма амортизационных отчислений $100+1191,8+950,7+1147,1+4127,6$
Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	380 523,195	Таблица 4.9
Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	49 468	$(\text{осн. З. П.}) \cdot 0,13$ $380 523,195 \cdot 0,13$

Отчисления на социальные нужды*	129 857,3	$(\text{осн. 3. П.} + \text{доп. 3. П.}) \cdot 0,302$ $(380\,523,195 + 49\,468) \cdot 0,302$
Затраты на научные и производственные командировки	-	-
Контрагентские расходы	-	-
Накладные расходы	91 348,5	$(\text{сумма пунктов 1-7}) \cdot 0,16$ $(3\,562,6 + 7\,517,2 + 380\,523,195 + 49\,468 + 129\,857,30 + 0) \cdot 0,16 =$ $570\,928,3 \cdot 0,16$
Бюджет затрат НИИ	662 276,8	сумма всех затрат $3\,562,6 + 7\,517,2 + 380\,523,195 + 49\,468 + 129\,857,30 + 91\,348,5$

Таблица 11 – Расчет бюджета затрат НИИ

*Для расчета отчислений на социальные нужды использовано значение ставки равное 30,2% (0,302)

Вывод:

Исходя из проведенного анализа, можно отметить, что получение композита методом ФПО, является более предпочтительным, нежели литье. Несмотря на несколько более высокую стоимость, применение ФПО имеет наибольшие показатели надежности – и ресурсоэффективности, что делает данную технологию перспективной для дальнейшего изучения и применения.

Таким образом, проект реализован в течение 152 календарных дней. В ходе выполнения работы задействован научный руководитель и инженер-технолог. Общий бюджет НИИ составил 662 276,8 рублей.