

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 15.04.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств
 Отделение школы (НОЦ) Отделение материаловедения

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Оптимизация структуры конструкционных материалов для обеспечения управляемого напряженно-деформированного состояния элементов пар трения технических систем УДК_620.22-048.34:681.587-25

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8NM71	Писаренко Маргарита Игоревна		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ	Буханченко С.Е.	к.т.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Подопригора Игнат Валерьевич	к.э.н		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ООД	Исаева Елизавета Сергеевна			

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
15.04.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств	Крауиньш Петр Янович	д.т.н.		

Томск – 2019 г.

Планируемые результаты обучения по ООП

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
Профессиональные компетенции		
Р1	Применять <i>глубокие естественнонаучные и математические знания</i> для создания нового технологического оборудования и машин.	Требования ФГОС ВО (ОПК 1, ПК2, 3). Критерий 5 АИОР (п. 2.1), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI
Р2	Применять <i>глубокие знания</i> в области современного машиностроительного производства для решения <i>междисциплинарных инженерных задач</i>	Требования ФГОС ВО (ПК-1-4). Критерий 5 АИОР (п. 2.1, п. 2.2), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI
Р3	Ставить и решать <i>инновационные задачи инженерного анализа</i> , связанные с созданием и обработкой новых изделий с использованием системного анализа и моделирования объектов машиностроительного производства	Требования ФГОС ВО (ПК-5-9). Критерий 5 АИОР (п. 2.2), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI
Р4	<i>Разрабатывать</i> и использовать <i>новое</i> оборудование и инструменты для обработки материалов и изделий, конкурентоспособных на мировом рынке машиностроительного производства	Требования ФГОС ВО (ПК-15-17). Критерий 5 АИОР (п. 2.3), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI
Р5	Проводить теоретические и модельные исследования в области машиностроительного производства	Требования ФГОС ВО (ОПК 1, ПК16). Критерий 5 АИОР (п. 1.4), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI
Р6	Внедрять и обслуживать современные высокотехнологические линии автоматизированного производства, обеспечивать их высокую эффективность, соблюдать правила охраны здоровья и безопасности труда на машиностроительном производстве, выполнять требования по защите окружающей среды	Требования ФГОС ВО (ОК-2, ПК-9, ПК-11, 12, 13, 14). Критерий 5 АИОР (п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI

Универсальные компетенции		
Р7	Использовать <i>глубокие знания</i> для <i>инновационной инженерной деятельности</i> с учетом юридических аспектов защиты интеллектуальной собственности	Требования ФГОС ВО (ОПК-4, ПК2, ПК-3, ПК-13, ПК-14, ПК-18). Критерий 5 АИОР (п. 2.1), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE

		и FEANI
P8	<i>Активно владеть иностранным языком</i> на уровне, позволяющем работать в иноязычной среде, разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты инновационной деятельности	Требования ФГОС ВО (ОПК-3, ОПК-4, ПК-13, ПК-18). Критерий 5 АИОР (п. 2.2), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P9	Эффективно работать индивидуально, в качестве <i>члена и руководителя группы</i> , состоящей из специалистов различных направлений и квалификаций, демонстрировать ответственность за результаты работы и готовность <i>следовать корпоративной культуре</i> организации	Требования ФГОС ВО (ОПК-1, ПК18). Критерий 5 АИОР (п. 2.13), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI
P10	Демонстрировать глубокие знания социальных, этических и культурных аспектов, компетентность в вопросах устойчивого развития	Требования ФГОС ВО (ОК-2). Критерий 5 АИОР (п. 2.14), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI
P11	Самостоятельно учиться и непрерывно повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности	Требования ФГОС ВО (ОК-3). Критерий 5 АИОР (п. 2.14), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI

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

Инженерная школа новых производственных технологий
Направление подготовки: 15.04.05 Конструкторско-технологическое обеспечение
машиностроительных производств
Отделение материаловедения

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП

(Подпись) (Дата) Крауиньш П.Я.

ЗАДАНИЕ на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

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

Студенту:

Группа	ФИО
8НМ71	Писаренко Маргарита Игоревна

Тема работы:

Оптимизация структуры конструкционных материалов для обеспечения управляемого напряженно-деформированного состояния элементов пар трения технических систем	
Утверждена приказом директора ИШНПТ	Приказ № 1908 от 18.03.2019

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

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>	Объект исследования – неравномерность износа элементов пары трения «вал – колодки», изготовленных при помощи традиционных и аддитивных технологий из различных конструкционных материалов. Предмет исследования – перераспределение износа конструкционных материалов в парах трения технических систем. Режимы нагружения трибосопряжения – циклический, переменный. Усилия нормального нагружения - 300 Н. Частота вращения контртела – от 0 до 1000 об/мин. Материалы, подлежащие исследованию – EOS Titanium Ti6Al4V, EOS Aluminium AlSi10Mg, EOS Nickel Alloy HX, EOS Nickel Alloy IN718. Материалы пар трения – контртела ШХ15,
--	--

	испытываемых образцов – BT6, EOS Titanium Ti6Al4V
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, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i>	1. Литературный обзор; 2. Объект и методы исследования; 3. Расчеты и аналитика; 4. Результаты проведенного исследования; 5. Социальная ответственность; 6. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение; 7. Заключение.
Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	В электронной форме на диске CD-R: пояснительная записка.
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i>	
Раздел	Консультант
Исследовательская часть	Буханченко Сергей Евгеньевич, доцент ОМ
Технологическая часть	Стрелкова Ирина Леонидовна, доцент ОМ
Финансовый менеджмент	Подопригора Игнат Валерьевич, доцент ОСГН
Социальная ответственность	Исаева Елизавета Сергеевна, старший преподаватель ООД
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Обзор литературы	

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

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ	Буханченко Сергей Евгеньевич	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8НМ71	Писаренко Маргарита Игоревна		

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа новых производственных технологий
Направление подготовки: 15.04.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств
Отделение материаловедения

Форма представления работы:

Магистерская диссертация
(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
с 01.11.2017 по 28.01.2018	Анализ применимости материалов, полученных с использованием аддитивных технологий для узлов трения технических систем	
с 29.01.2018 по 18.02.2018	Разработка технического задания на выполнение научно-исследовательской работы	
с 19.02.2018 по 30.06.2018	Моделирование нагруженного состояния пары трения при динамических законах нагружения	
с 28.08.2017 по 31.12.2017	Написание тезисов доклада и выступление на международной конференции	
с 19.02.2018 по 30.06.2018	Исследование поведения пар трения при динамических режимах из оригинальных материалов и материалов, полученных с использованием аддитивных технологий	
с 08.01.2018 по 30.06.2018	Написание тезисов доклада, статьи в журнал ВАК и выступление на международной конференции	
с 27.08.2018 по 31.12.2018	Разработка алгоритма 3D дизайна поверхностей трения при динамических режимах нагружения трибосопряжения	
с 27.08.2018 по 31.12.2018	Написание тезисов доклада, статьи в журнал ВАК и выступление на международной конференции	
с 07.01.2019 по 28.02.2019	Испытание аддитивно полученных конструкционных материалов с переменной структурой и свойствами при динамических режимах нагружения	
с 01.03.2019 по 31.03.2019	Исследования структуры аддитивно полученных конструкционных материалов после триботехнических испытаний	
с 01.04.2019 по 30.04.2019	Сравнительный анализ теоретических и практических результатов испытаний	
с 07.01.2019 по 31.05.2019	Написание тезисов доклада и выступление на международной конференции	

<i>с 01.05.2019 по 30.05.2019</i>	Подготовка текста диссертационной работы	
<i>с 01.06.2019 по 10.06.2019</i>	Подготовка презентационного и демонстрационного материалов, доклада для защиты магистерской диссертации	

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ	Буханченко С.Е.	к.т.н.		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
15.04.05 Конструкторско- технологическое обеспечение машиностроительных производств	Крауиньш Петр Янович	д.т.н.		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит пояснительную записку, содержащую 133 с., 62 рис., 29 табл., 21 источник, 2 прил.

Ключевые слова: аддитивные технологии, конструкционные материалы, трибологические испытания, трение, износ.

Объектом исследования является неравномерность износа пар трения технических систем.

Цель работы – разработка научно-практических основ обеспечения равномерности изнашивания трибосопряжений, полученных с помощью аддитивных технологий, при динамических условиях их нагружения.

В процессе исследования проводились исследования структур аддитивно полученных материалов, математическое моделирование исследуемой пары трения, исследование образцов, изготовленных при помощи АТ и традиционных технологий АТК.

В результате исследования были изучены основные характеристики исследуемых образцов (микроструктура, поведение при испытаниях на АТК) и сделаны выводы о дальнейшей работе над образцами для достижения поставленной цели.

В будущем планируется_ разработка алгоритмов формирования режимов получения элементов пар трения технических систем посредством аддитивных технологий.

Определения, обозначения, сокращения, нормативные ссылки

Определения

Трибосопряжение (ТС) – две функционально связанные детали (вал – втулка, два зубчатых колеса и др.). ТС согласно ЕСКД может быть отнесено к сборочной единице или изделию, состоящего из двух составных частей [1].

Аддитивное производство (аддитивный технологический процесс) (additive manufacturing) – процесс изготовления деталей, который основан на создании физического объекта по электронной геометрической модели путем добавления материала, как правило, слой за слоем, в отличие от вычитающего (субтрактивного) производства (механической обработки) и традиционного формообразующего производства (литья, штамповки) [2].

3D-принтер – установка для 3D-печати [2].

Слой [вещества] (layer) – материал, предварительно нанесенный для создания поверхности [2].

Порошковый материал – сыпучий материал размером до 1 мм [8].

Сокращения

АП – аддитивное производство

АТ – аддитивные технологии

АТК – автоматизированный триботехнический комплекс

ММ – математическое моделирование

МКЭ – метод конечных элементов

ПО – программное обеспечение

СИЗ – средства индивидуальной защиты

Оглавление

Определения, обозначения, сокращения, нормативные ссылки	9
Определения	9
Сокращения	9
Введение	11
1. Обзор литературы	15
1.1. Проблема неравномерности износа	15
1.2. Аддитивные технологии как инструмент для решения проблемы неравномерности износа пар трения.....	21
2. Объект и методы исследования.....	30
3. Расчеты и аналитика	38
3.1. Исходные данные	40
3.2. Моделирование пары трения «вал-колодки»	42
3.3. Контактное взаимодействие. Изменение напряженно-деформированного состояния.....	44
3.4. Изменение тепловых полей	48
4. Результаты проведенного исследования	55
5. Финансовый менеджмент	58
1.2. SWOT-анализ.....	58
6. Социальная ответственность.....	81
Заключение.....	102
Список публикаций	104
Список используемых источников	105
Приложение А	108
Приложение Б	132

Введение

Актуальность работы. Конкурентоспособность проектируемых машин и механизмов, а также увеличение их срока службы на всех этапах жизненного цикла изделия при эксплуатации является одной из основных проблем в современном машиностроении. Это особенно касается тех типов изделий, к которым предъявляются высокие требования по эксплуатации.

Существенную роль в данном вопросе играет ресурс, который зависит от долговечности механизмов, составляющих трибосопряжение. При этом важен характер износа трибосопряжений. Большая часть узлов трения подвержена динамическим нагрузкам, как, например, удар с проскальзыванием в двух взаимно перпендикулярных направлениях при воздействии как высоких, так и низких температур. В таком случае возникает проблема неравномерности износа механизмов трибосопряжений, который концентрируется в определенных участках деталей и механизмов и ведет к уменьшению ресурса и скорейшей поломке агрегата. Существует множество примеров механизмов, где можно наблюдать неравномерность износа. Например, аксиально-поршневые насосы, шестеренчатые насосы, кольца и сепараторы подшипников качения, клиноременные передачи, шаровые опоры и т.д.

Существует несколько основных параметров, влияющих на неравномерность износа (Рисунок 1).



Рисунок 1. Параметры, влияющие на неравномерность износа

Есть различные способы, позволяющие уменьшить или вовсе устранить неравномерность износа трибосопряжений (Рисунок 2).

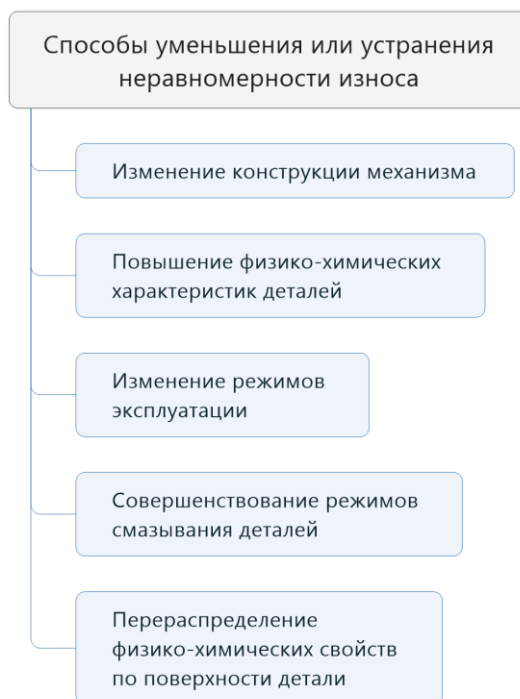


Рисунок 2. Способы уменьшения или устранения неравномерности износа

Наиболее распространённым способом является изменение конструкции механизма. Однако при проектировании трибоузлов необходимо учитывать специфические особенности износа при динамическом нагружении. Без учета этих особенностей полученный трибоузел после изменения конструкции также может быть недостаточно надежным.

Одним из наиболее перспективных можно считать способ уменьшения или устранения неравномерности износа трибосопряжения посредством перераспределения физико-механических свойств по поверхности детали. Одним из инструментов, позволяющих обеспечить такое перераспределение свойств, можно считать аддитивные технологии – актуальное и бурно развивающееся направление технологий производства.

Известно, что аддитивные технологии позволяют «выращивать» трехмерные изделия посредством послойного спекания порошковых материалов. На сегодняшний день существует большой перечень различных способов получения изделий в рамках аддитивного производства. При этом данные технологии позволяют управлять составом и свойствами изготавливаемых деталей (по поверхности и объему).

Цель и основные задачи исследования

Цель: разработка научно-практических основ обеспечения равномерности изнашивания трибосопряжений, полученных с помощью аддитивных технологий, при динамических условиях их нагружения.

Для достижения поставленной цели определены следующие основные **задачи:**

1. Анализ условий функционирования и причин возникновения неравномерности изнашивания элементов пар трения реальных машин и механизмов.
2. Анализ существующих способов и методов устранения неравномерности износа трибосопряжений.

3. Анализ аддитивных технологий, оборудования и материалов (их структуры), используемых при создании элементов узлов трения машин и механизмов.

4. Моделирование и теоретическое исследование изнашивания элементов трибосопряжений с переменной структурой по объему при различных динамических (реальных) режимах нагружения.

5. Разработка алгоритма создания элементов трибосопряжений с переменной структурой по объему для различных динамических (реальных) режимов нагружения.

6. Испытание элементов трибосопряжений с типовой и переменной структурой по объему при различных динамических (реальных) режимах нагружения.

7. Сравнительный анализ теоретического и физического исследований и корректирование математической модели.

8. Разработка методики формирования переменной объемной структуры элементов трибосопряжений для различных (реальных) режимов динамического нагружения.

Объект исследования – неравномерность износа пар трения технических систем.

Предмет исследования – перераспределение износа конструкционных материалов в парах трения технических систем.

Научная новизна полученных результатов – разработка методики перераспределения физико-механических свойств поверхностных слоев пар трения технических систем.

Практическое значение полученных результатов – разработка алгоритмов формирования режимов получения элементов пар трения технических систем посредством аддитивных технологий.

1. Обзор литературы

1.1. Проблема неравномерности износа

Процесс изнашивания – это процесс разрушения и отделения материала с поверхности твердого тела или накопление его остаточной деформации при трении, проявляющийся в постепенном изменении размеров и формы тела [3]. В свою очередь износ – это результат изнашивания, определяемый в единицах длины, объема, массы [3].

При изнашивании трибосопряжений наблюдается уменьшение прочности деталей, снижение производительности трибоузла, нарушение кинематической точности механизмов, составляющих трибосопряжение. Как следствие, идет увеличение расхода энергии при работе трибосопряжения, а также увеличение затрачиваемых ресурсов на ремонт. Вследствие изнашивания проявляются дополнительные нагрузки, шумы и вибрации, которые не были предусмотрены при конструировании трибоузла.

Классификация процесса изнашивания довольно сложна вследствие разнообразия режимов эксплуатации. Условно выделяют следующую классификацию процессов изнашивания и вызываемых ими эксплуатационных повреждений механизмов:



Рисунок 3. Классификация видов изнашивания

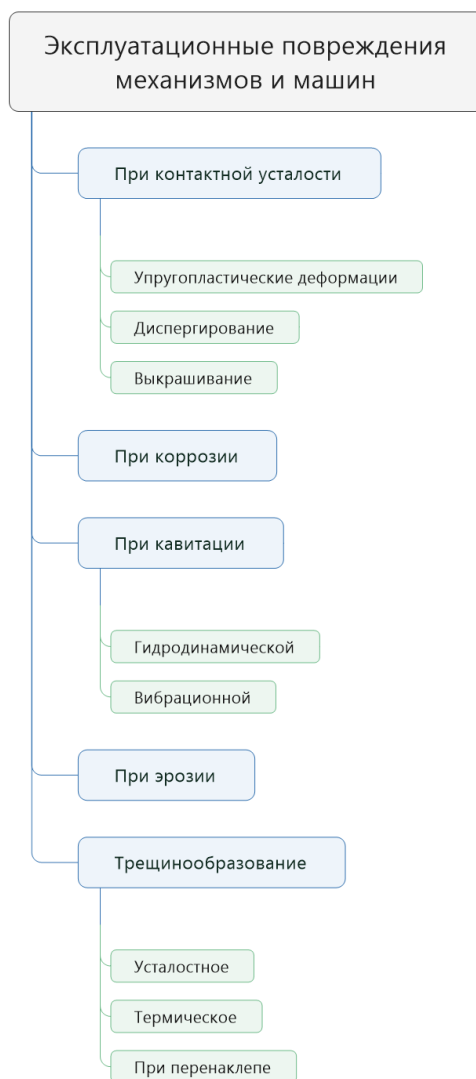


Рисунок 4. Виды эксплуатационных повреждений механизмов и машин

В подавляющем большинстве случаев идет сочетание различных процессов изнашивания на поверхности трения в силу возникновения многообразия изменений в приграничном контактном слое. Поэтому на практике наблюдается сочетание различных процессов воздействия на поверхность трения.

Существуют две количественные характеристики изнашивания. Первая характеристика – скорость изнашивания, которая выражается отношением значения износа Δh к интервалу времени t . Мгновенная скорость изнашивания фиксируется в определенный момент времени, средняя скорость изнашивания – в определенный интервал времени. Вторая

характеристика — интенсивность изнашивания, которая выражается отношением значения износа Δh к обусловленному пути L [3].

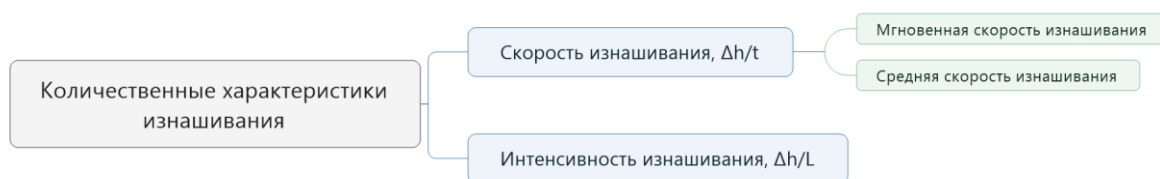
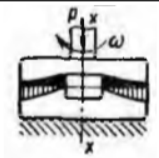
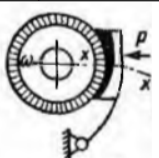
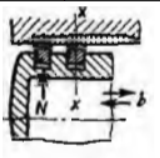
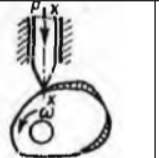
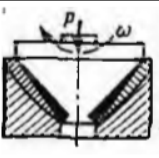
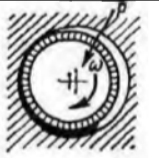
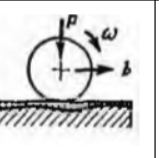
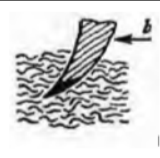


Рисунок 5. Количественные характеристики изнашивания

При проектировании механизмов также важно понимать, что существенное влияние на распределение износа по поверхности трения, а также на характер взаимодействия изношенных поверхностей оказывает влияние непосредственно конструктивная схема трибосопряжения. И чаще всего влияние именно конструкции является более существенным, чем влияние закономерностей изнашивания материалов. То есть форма износа зависит от сил, которые действуют на элементы трибосопряжения, от характера взаимодействия (относительного движения) элементов пары трения, от их размеров и конфигурации [4].

Различные сопряжения можно классифицировать по условиям изнашивания следующим образом:

Таблица 1. Классификация сопряжений по условиям изнашивания

Тип	А – Условия контакта постоянны		Б – Условия контакта переменны		
	1 группа	2 группа	3 группа	4 группа	5 группа
	Точки, расположенные на одной траектории, имеют одинаковые условия изнашивания для каждого из двух тел	Условия изнашивания сохраняются только для точек одного тела, лежащих на данной траектории	Сопряжения с низшими парами	Сопряжения с высшими парами	Детали, контактирующие с твердой средой
I	Сопряжения имеют дополнительные неизнашивающиеся или малоизнашивающиеся направляющие, которые обеспечивают сближение деталей при износе только в заданном направлении $x - x$				
					
II	В сопряжениях происходит самоустановка изношенных деталей, их взаимное расположение зависит от формы изношенной поверхности				
					

Такая классификация связывает характеристику вероятностного износа с разрабатываемой конструкцией трибосопряжений.

Также следует обратить внимание на стадии изменения износа во времени, которые иллюстрируются кривыми изнашивания. Типичная кривая изнашивания представлена на рисунке 6.

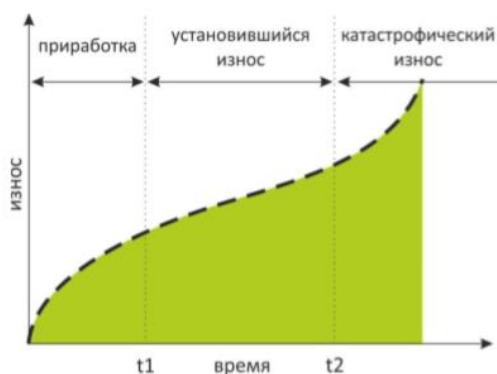


Рисунок 6. Общий вид кривой изнашивания

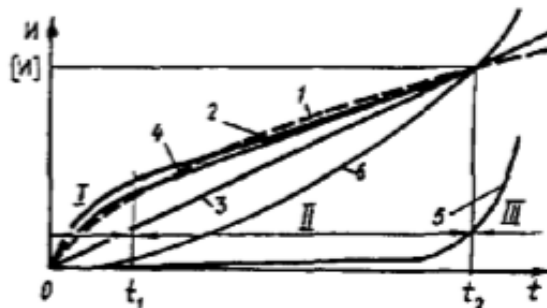


Рисунок 7. Кривые изнашивания поверхностей трения [3]

Стадии изнашивания можно охарактеризовать следующим образом:



Рисунок 8. Характеристика стадий изнашивания

Однако в зависимости от используемых материалов для изготовления детали и узла трения, а также от условий и режимов эксплуатации кривые изнашивания могут иметь вид, который представлен на рисунке 7.

Следует отметить, что представленные кривые отображают условия, при которых узлы трения работают непрерывно. В большинстве случаев узлы трения эксплуатируются с перерывами, что ведет к возрастанию скорости изнашивания. Это происходит за счет колебаний внешних нагрузок, особенно в моментах пуска и торможения, а также при адгезии, возникающей в паре трения, находящейся под напряжением, величина которого определяется длительностью перерыва в работе узла трения.

Важно также помнить о том, что в начале взаимодействия элементов пары трения идет процесс их приработки (макроприработки), когда происходит увеличение площадей контакта за счет изнашивания сопряженных поверхностей [4] и распределение нагрузок. Неполный контакт проявляется в случае неточного изготовления элементов пары трения или монтажа. В случае, если при изготовлении пары трения будут применены более износостойкие материалы, то такое решение поспособствует увеличению периода приработки. Здесь либо не будет раскрыт потенциал используемых износостойких материалов, либо их применение приведет к различным отрицательным явлениям. В таком случае необходимо применение мер по уменьшению периода приработки элементов пары трения.

Обобщая вышесказанное, можно выделить следующие параметры, влияющие на неравномерность износа:

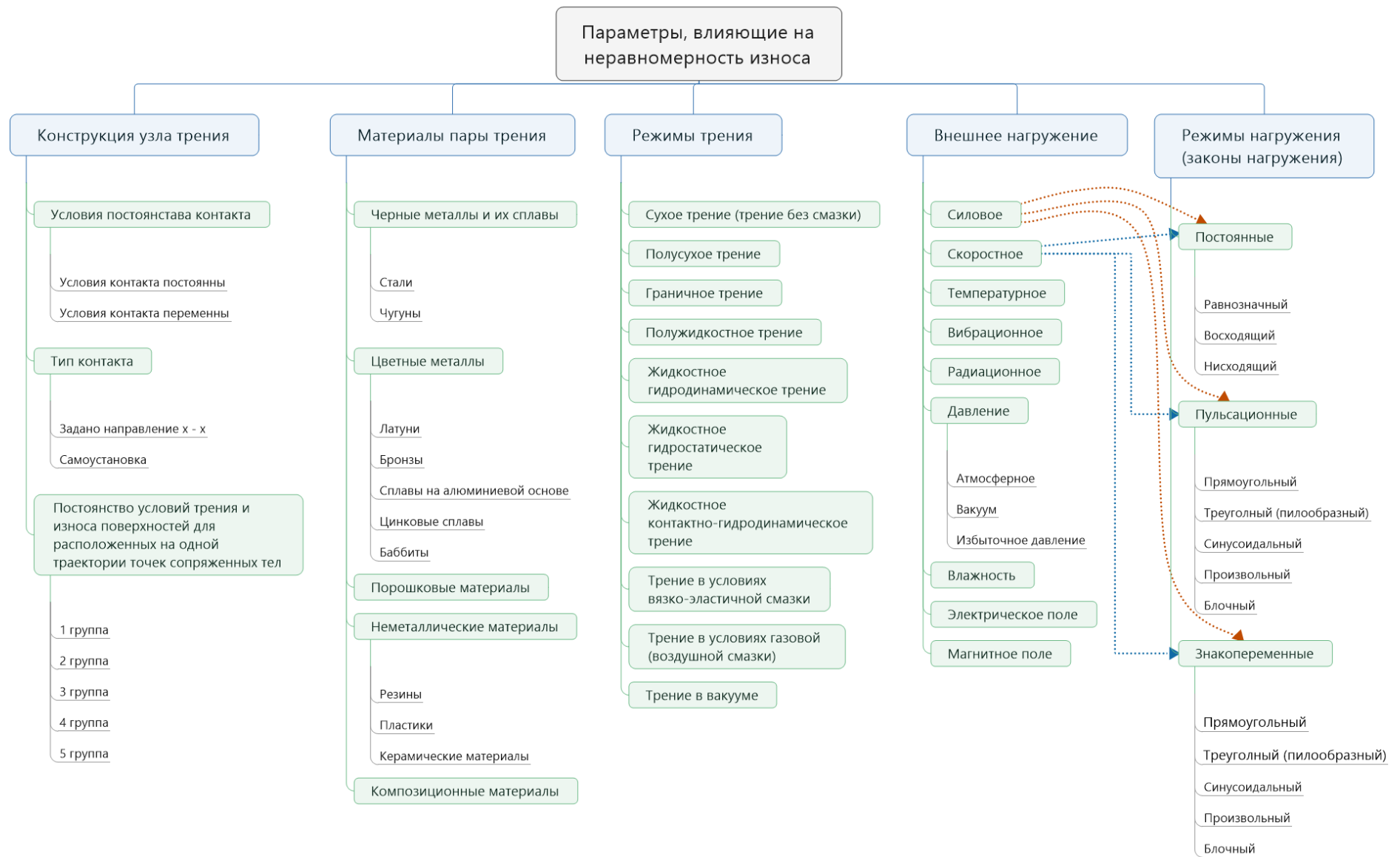


Рисунок 9. Классификация параметров, влияющих на неравномерность износа пары трения

Подводя итоги, следует отметить, что существуют различные способы повышения долговечности конструкции (рисунок 2). Можно выделить следующие принципы по созданию долговечных конструкций машин [4], в соответствии с которыми необходимо подбирать оптимальные материалы, технические и технологические решения:

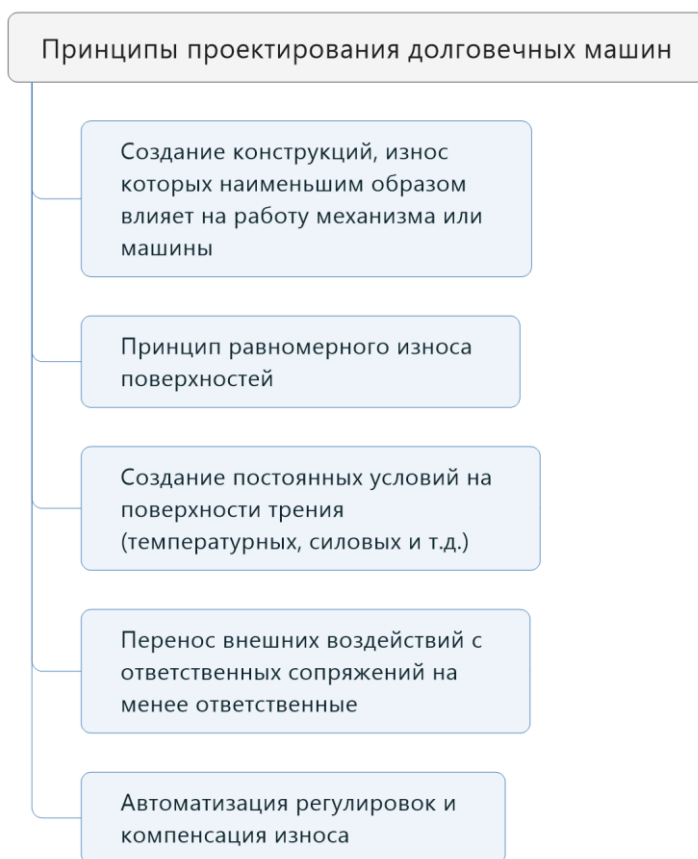


Рисунок 10. Основные принципы проектирования долговечных машин и механизмов

1.2. Аддитивные технологии как инструмент для решения проблемы неравномерности износа пар трения.

В современном производстве АТ становятся все более распространенными. С помощью такого рода технологий создаются различные трехмерные объекты (цельные или сборные), имеющие практически любую форму.

Суть АТ заключается в том, что сначала создается трехмерная модель будущего изделия, для чего используется различные CAD-системы. Затем

полученная модель разбивается на горизонтальные сечения (слои). После чего идет выращивание объекта слой за слоем при помощи 3D-принтера с использованием материала в виде порошка с частицами сферической либо несферической формы. Полученные изделия могут применяться как в виде прототипов, так и в качестве готового продукта.

Можно выделить следующие этапы аддитивного производства [12]:



Рисунок 11. Этапы аддитивного производства

В сравнении с традиционными технологиями, у АТ можно выделить следующие преимущества и недостатки [5,6,7]:

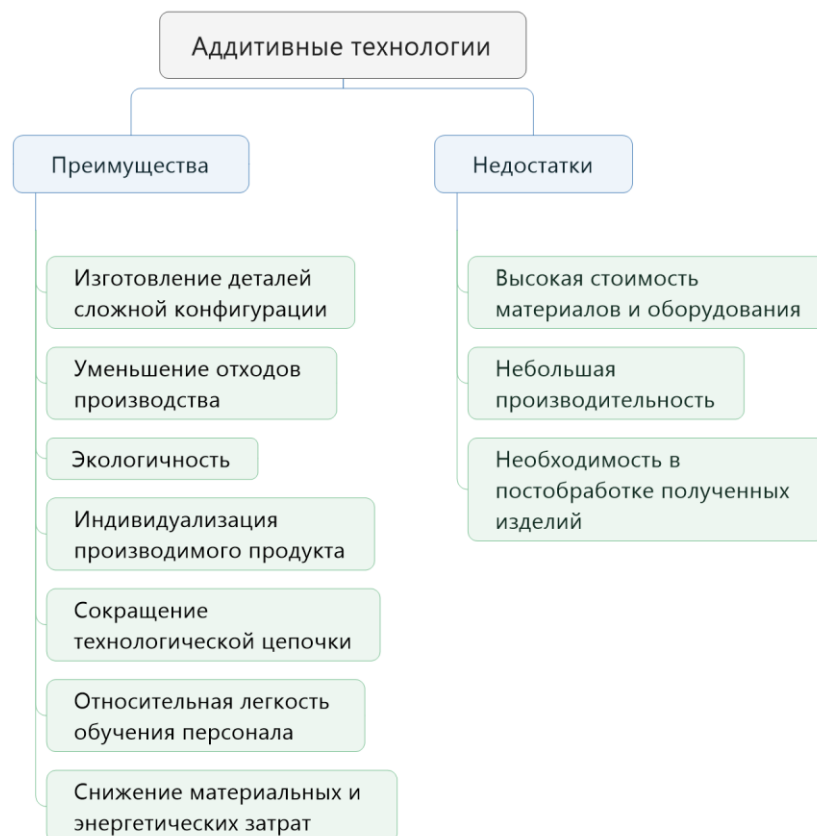


Рисунок 12. Преимущества и недостатки аддитивных технологий

Прежде всего, технологии послойного синтеза можно классифицировать по принципу формирования слоя печати [8].



Рисунок 13. Классификация принципов формирования слоев печати

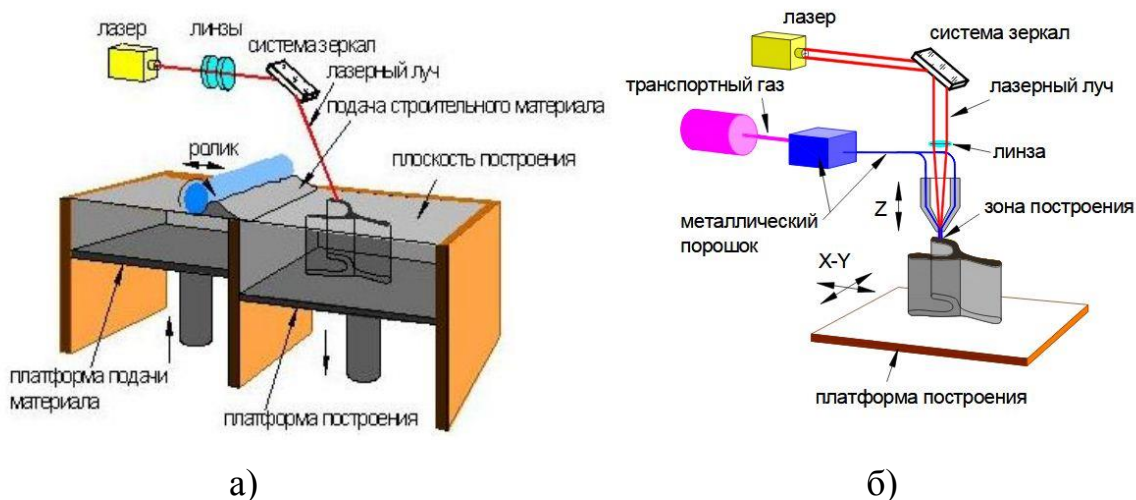


Рисунок 14. Принципы формирования слоев печати: а) – bed deposition, б) – direct deposition

В целом можно выделить следующие основные параметры, непосредственно влияющие на качество печати детали (форма детали, структура, шероховатость поверхности, пористость и т.д.).

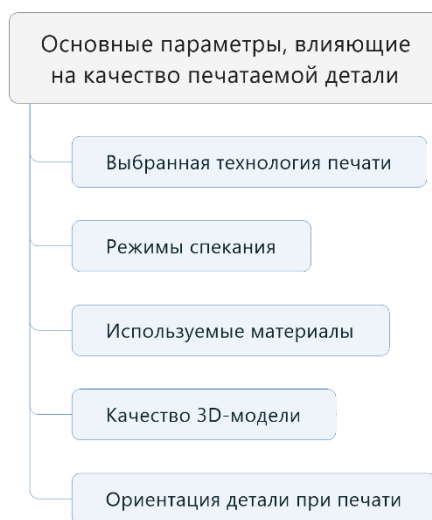


Рисунок 15. Перечень основных параметров, влияющих на качество печатаемой детали

В зависимости от используемого материала различаются разные способы 3D-печати. В данной работе будут рассмотрены АТ, где в качестве материала для печати используются металлические порошки.



Рисунок 16. Классификация технологий 3D-печати металлическими материалами в зависимости от их состояния

На данный момент существует огромный спектр АТ. У каждой из них имеются свои достоинства и недостатки, и их можно разграничить по способам их применения. Для данной работы актуальными являются технология селективного лазерного спекания (SLS), технология электронно-лучевой плавки (EBM), технология точечной подачи порошка (DMF), так как перечисленные технологии наиболее распространены в России. Для данной научно-исследовательской работы образцы для исследований были изготовлены при помощи технологий SLS и EBM.

Говоря об основном преимуществе, а именно об изготовлении деталей сложной конфигурации и формы, следует отметить, что АТ позволяют изготовить изделия с переменными по толщине свойствами (так называемые градиентные детали), вырастить одну деталь внутри другой детали, создание различных сетчатых и пористых конструкций, ремонт дорогостоящего оборудования [8].

В целом на основании исследований [9, 10, 11] можно выделить следующие параметры, управляющие спеканием материалов:

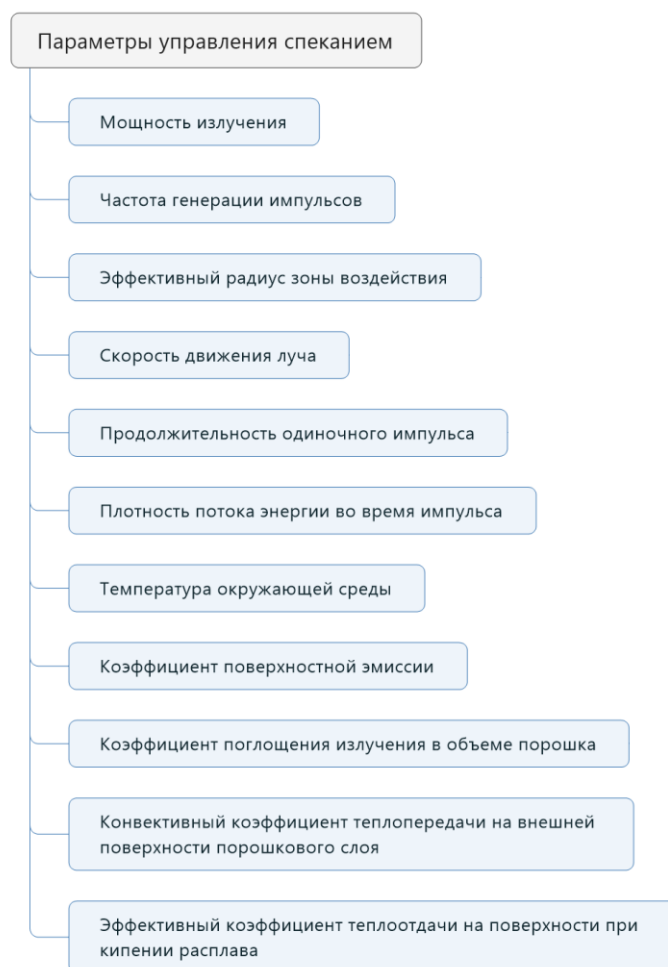


Рисунок 17. Управляющие параметры печати деталей

Также немаловажную роль играют используемые при спекании материалы. Существует большой перечень материалов, которые применяются при создании различных изделий с помощью АТ (рисунок 15). Для данной работы наибольший интерес представляют порошковые металлические материалы, так как для перечисленных выше технологий, рассматриваемых в данной работе, применяются именно порошковые материалы.

Одним из основных требований к порошкам для печати является форма частиц порошка, которая, с одной стороны, влияет на компактность укладывания частиц материала в определенный объем, и, с другой стороны, на быстроту подачи порошка в системах подачи материала [8]. Сферическая форма частиц порошка обеспечивает большую «текучесть» при подаче.

Однако также ведутся исследования о применимости в аддитивном производстве порошков несферической формы [12, 13].

Можно выделить требования по технологическим свойствам (текучесть, плотность), по химическому составу и газовым примесям [14].

Также классификацию порошков можно провести по условному диаметру d в зависимости от используемых 3D-принтеров [12]:

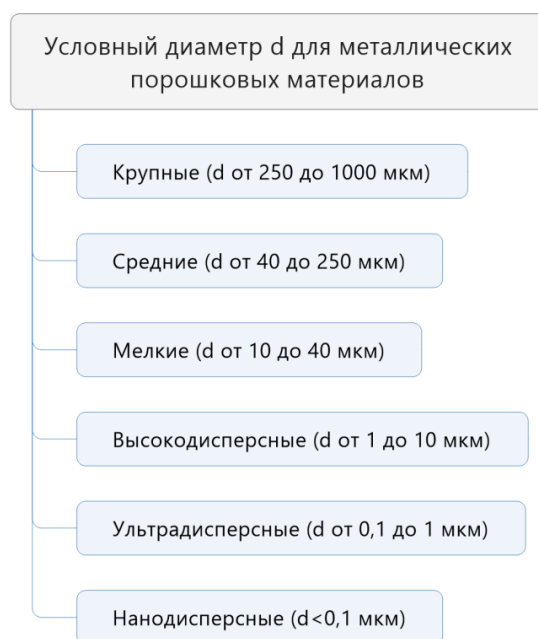


Рисунок 18. Классификация металлических порошковых материалов для 3D-печати по условному диаметру d

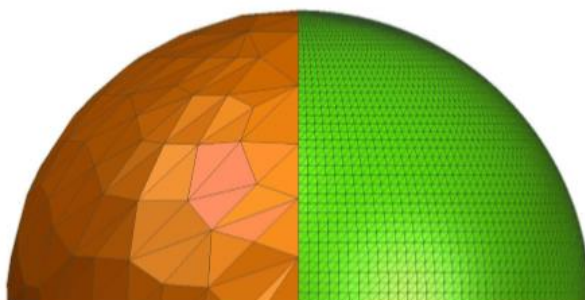
Еще одним из параметров, характеризующим порошковые материалы, может быть средний диаметр частиц d_{50} . Например, при $d_{50} = 40$ мкм у 50% частиц порошка размер частиц будет меньше или равен 40 мкм [12]. Данный параметр используется для классификации размера частиц, используемых в различных АМ-машинах.

В целом можно сказать, что в настоящее время нет общих требований к металлическим порошкам, которые применяются в АТ. Требования к материалам зависят от предписаний компаний, производящих 3D-принтеры, для которых составляют перечень тех материалов, которые можно использовать. Обычно эти материалы поставляются самими компаниями по

производству АМ-оборудования. Их классификация представлена в Приложении Б.

Важную роль играет и «чистота» порошка. В процессе спекания металла при использовании принципа формирования детали «bed deposition» прилегающий материал к непосредственно строящейся детали может «портиться» под воздействием источника энергии, а именно лазера при использовании SLS-технологии. Данный материал впоследствии просеивается и отбраковывается от «чистого» материала.

Еще одним важным параметром является качество построенной CAD-модели. Например, модель может представлять собой 3D-поверхность с полигональной сеткой. Чем мельче элементы сетки, тем качественнее модель и, соответственно, качественнее поверхность печатаемой детали.



а) модель низкого качества б) модель высокого качества

Рисунок 19. Качество построения модели [8]

Также на шероховатость поверхности и на пористость влияет ориентация печатаемой детали на платформе построения.

Выращивание детали происходит слоями (сечениями). При печати получается ступенчатая структура, где размер ступенек соответствует шагу построения детали. Чем меньше шаг, тем меньше шероховатость поверхности детали.



Рисунок 20. Послойное выращивание детали [8]

Рассматривая рисунок 20, можно заметить, что ближе к платформе построения качество поверхности выше. Для улучшения качества поверхности необходимо размещение детали на платформе под некоторым оптимальным углом.

Согласно исследованиям [15] при испытаниях на растяжение образцов, выращенных в горизонтальном и вертикальном направлениях, выявляются более высокие прочностные свойства у деталей, выращенных в горизонтальном направлении. Это объясняется как наличием и направлением образующихся пор, так и направлением образующейся микроструктуры.

Резюмируя вышесказанное, можно сделать вывод о том, что при изменении вышеперечисленных параметров, влияющих на качество построения детали, возможно воздействие на механические свойства детали, шероховатость поверхности, пористость и получение разной плотности спекания слоев детали и перераспределение свойств по поверхности и объему детали.

2. Объект и методы исследования

Объект исследования: неравномерность износа элементов пары трения «вал – колодки», изготовленных при помощи традиционных и аддитивных технологий из различных конструкционных материалов.

Методы исследования:

- при помощи оптической металлографии – исследование пористости и микроструктур образцов из конструкционных материалов, изготовленных традиционными и аддитивными технологиями;
- при помощи математического моделирования – создание симуляционной математической модели пары трения «вал – колодки» в программном комплексе ANSYS для исследования контактного взаимодействия (законы силового, скоростного и теплового нагружений);
- при помощи триботехнических испытаний на АТК и методик испытаний, разработанных на кафедре «Автоматизация и роботизация в машиностроении» Института кибернетики Томского политехнического университета.

Исходные данные. Первоначально были проведены исследования пористости и структуры образцов, предназначенных для триботехнических испытаний.

Первая группа – образцы, полученные на установке EOS M290 по SLS-технологии. Установка имеет следующие технические данные:

Таблица 2. Технические данные установки EOS M290

Тип лазера	Иттербиевый волоконный лазер, 400Вт
Оптика	F-theta-линза, высокоскоростной сканер
Скорость сканирования	до 7.0 м/с
Размер пятна	100 мкм

Были использованы следующие материалы:

- EOS Titanium Ti6Al4V
- EOS Aluminium AlSi10Mg
- EOS Nickel Alloy HX

- EOS Nickel Alloy IN718

Методика проведения микроструктурного анализа приведена на схеме (Рисунок 17):

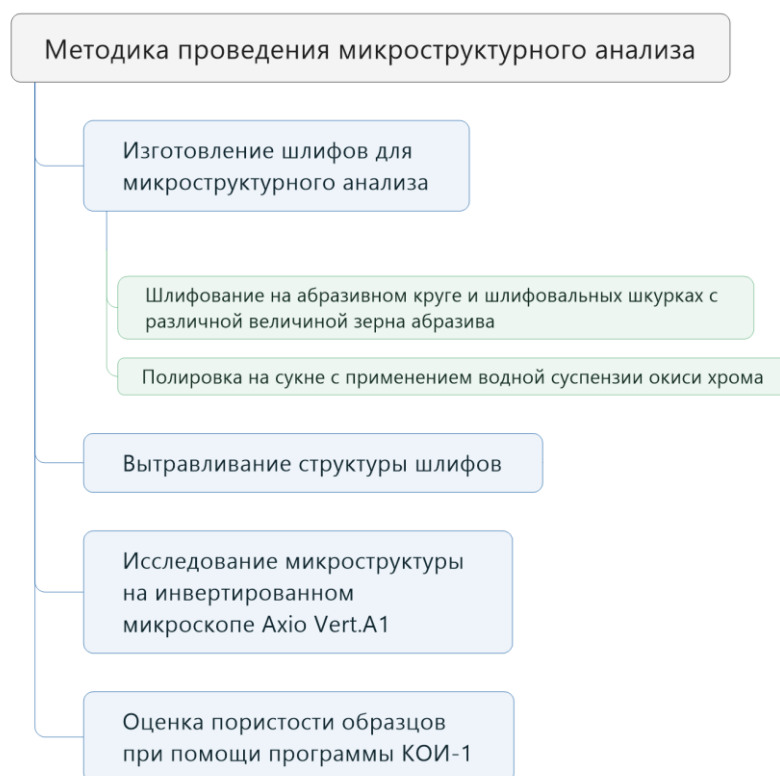


Рисунок 21. Методика проведения микроструктурного анализа

При выявлении микроструктуры были использованы следующие травители:

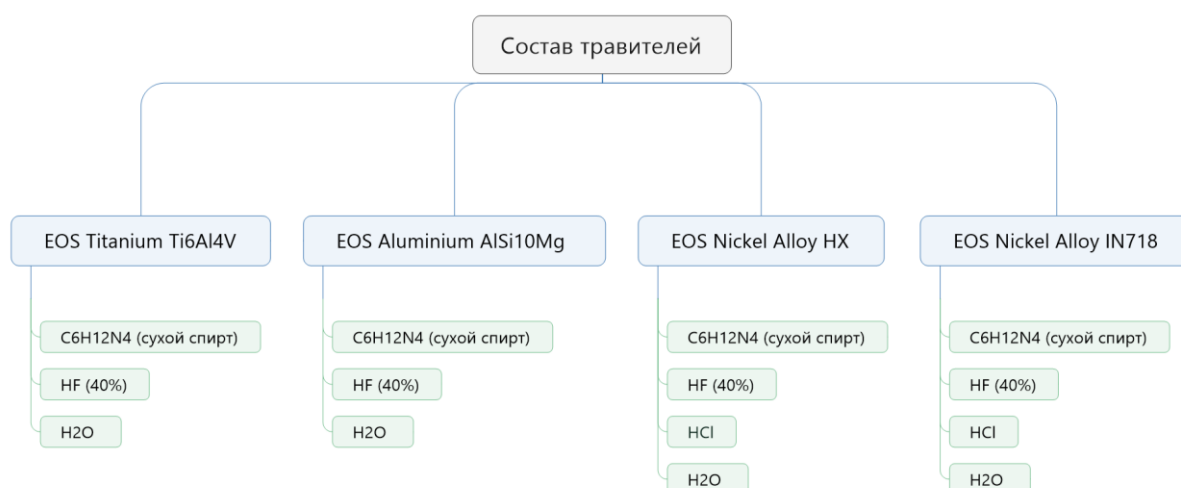


Рисунок 22. Составы травителей, использованных для выявления микроструктур аддитивно полученных материалов

При проведении микроструктурного анализа были получены следующие изображения пористости и изображения микроструктур исследуемых образцов.

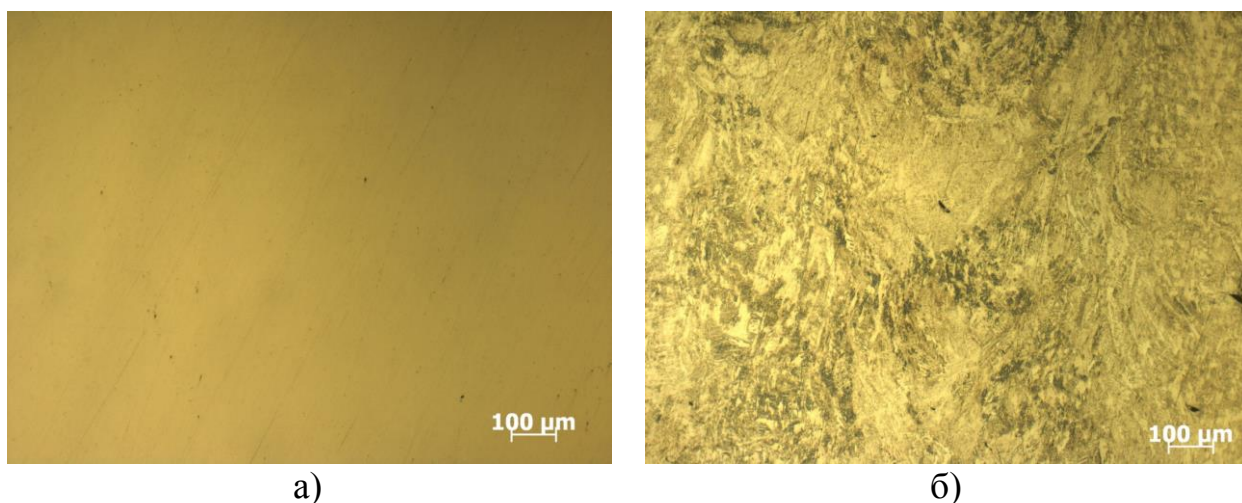
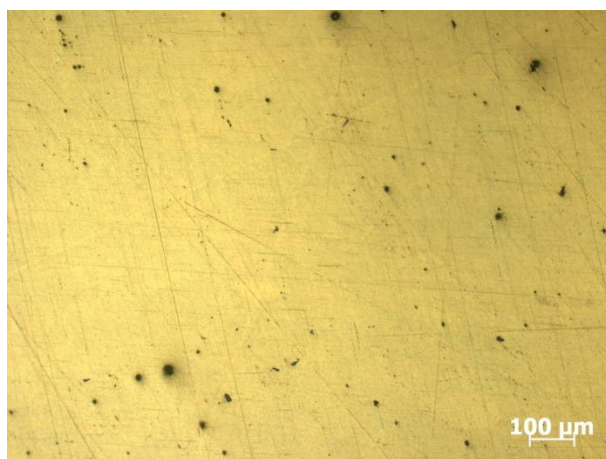
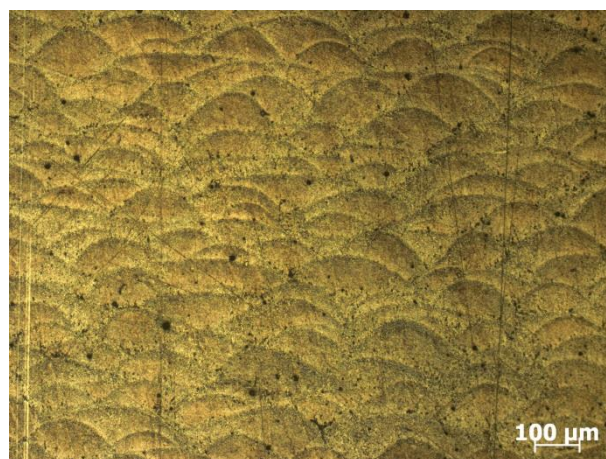


Рисунок 23. Пористость (а) и структура образца материала (б) EOS Titanium Ti6Al4V (*поперечное сечение*)

Микроструктура образца, полученного методом SLS-печати имеет структуру, характерную для двухкомпонентных сплавов (α - и β -фазы). При этом границы зерен нечетко выражены, зерна имеют вытянутую форму вдоль направления выращивания образца. Микроструктура состоит из вытянутых иглообразных кристаллов мартенситной α' -фазы, пластины имеют различное направление. Все это говорит о высокой скорости кристаллизации и закалки сплава. Микроструктура неравновесная и нетипична для традиционных технологий, так как при селективном лазерном спекании диаметр лазерного луча мал, как и объем плавящегося материала. При этом скорости нагрева и охлаждения в процессе кристаллизации очень высоки [15].

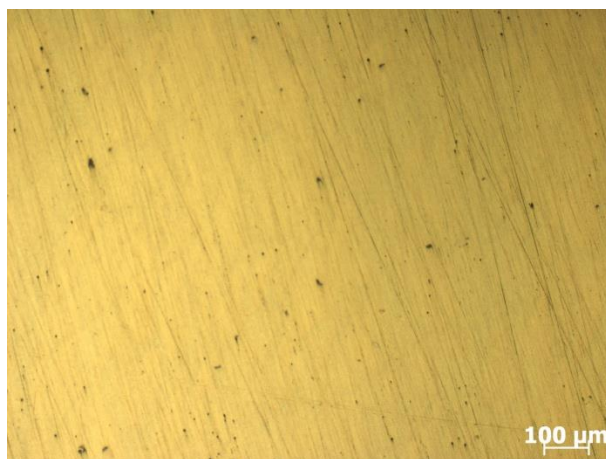


a)



б)

Рисунок 24. Пористость (а) и структура образца материала (б) EOS Aluminium AlSi10Mg (*угол печати слоев 45°, поперечное сечение*)



a)



б)

Рисунок 25. Пористость (а) и структура образца материала (б) EOS Aluminium AlSi10Mg (*угол печати слоев 90°, поперечное сечение*)

В процессе плавления и последующей кристаллизации порошкового материала идет формирование температурного градиента, который направлен перпендикулярно границ ванны расплава [15]. Сама ванна расплава называется треком и имеет выпуклую форму. В процессе печати при формировании последующих слоев идет переплав прослойки ванны расплава предыдущего слоя. Вследствие этого идет переориентация кристаллов. Горизонтально расположенные кристаллы (Рисунок 26, б) исчезают, остаются кристаллы вытянутой формы для обеспечения большей прочности соединения двух спеченных слоев.

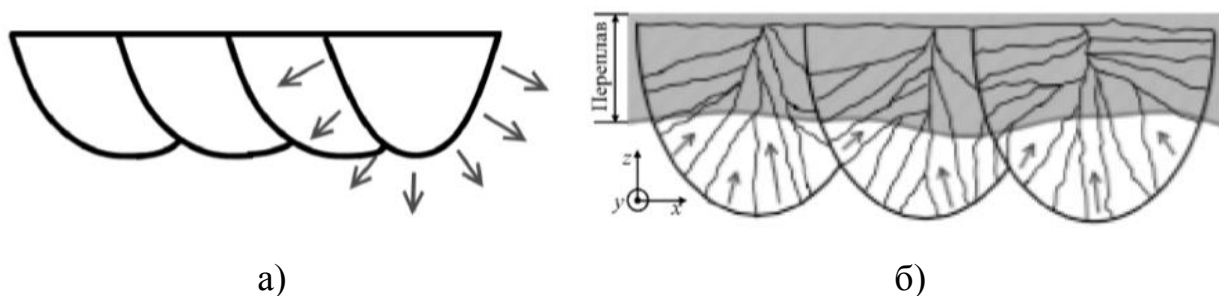


Рисунок 26. Схемы а) распределения тепла в ванне расплава и б) переплав прослойки ванны расплава [15]

Описанная выше картина наблюдается на Рисунке 27. При этом острый конец треков указывает на направление выращивания слоев.

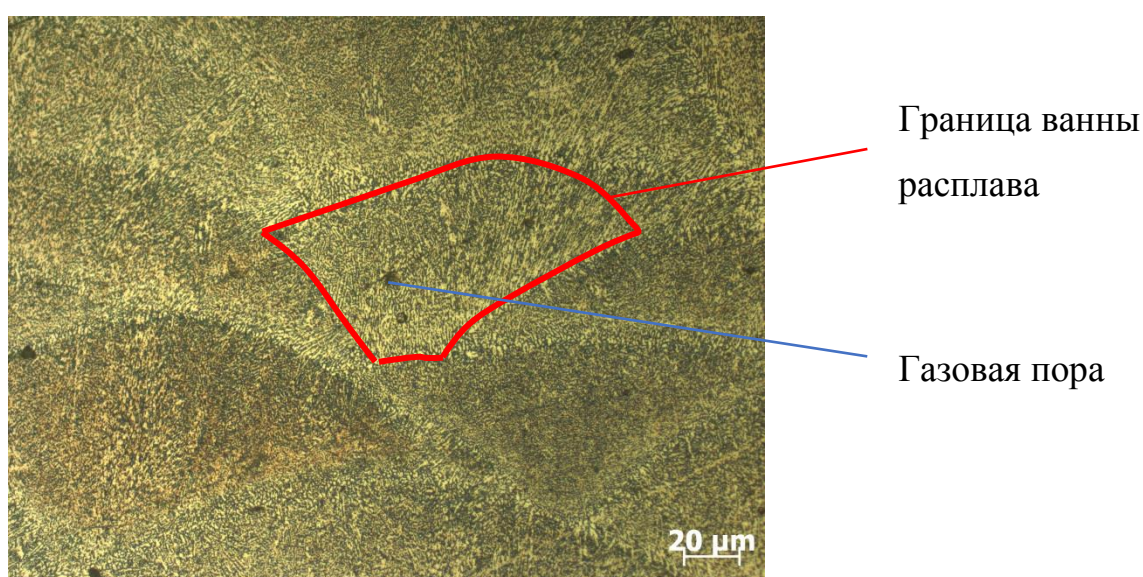


Рисунок 27. Структура образца материала EOS Aluminium AlSi10Mg (угол печати слоев 90° , поперечное сечение)

Образец на Рисунке 24 имеет большую пористость, по сравнению с образцом на Рисунке 25. При SLS-технологии могут образовываться два вида пор. Первый вид – газовые поры. Они имеют сферическую форму и образуются при неполном выходе газа из расплава за счет высокой скорости затвердевания. Второй вид – поры, которые образуются в случае, когда частицы порошка не проплавлены или проплавлены частично [15]. Такие поры имеют более вытянутую форму.

В рассматриваемых образцах присутствуют поры первого типа.

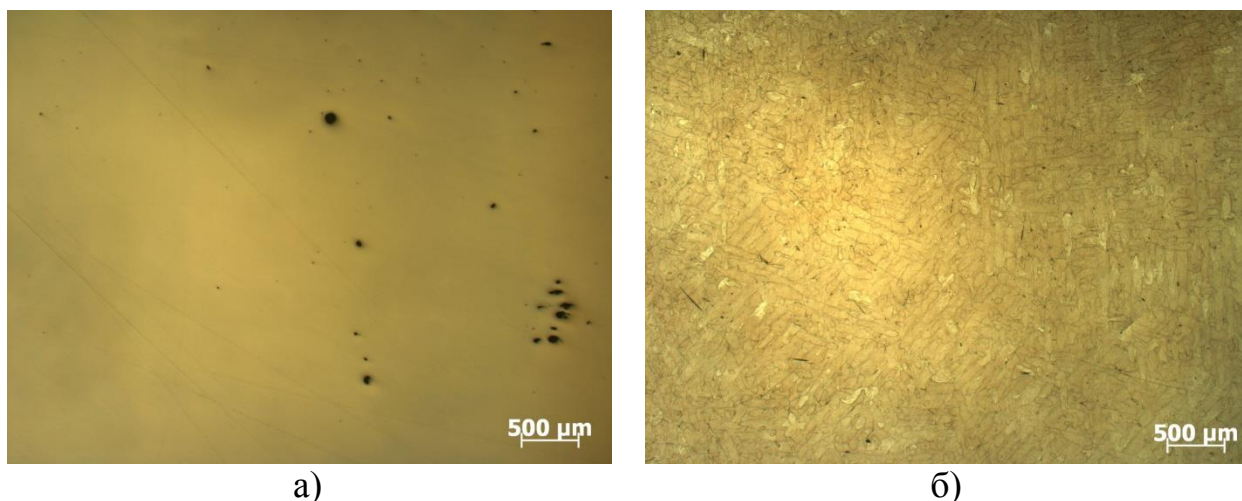


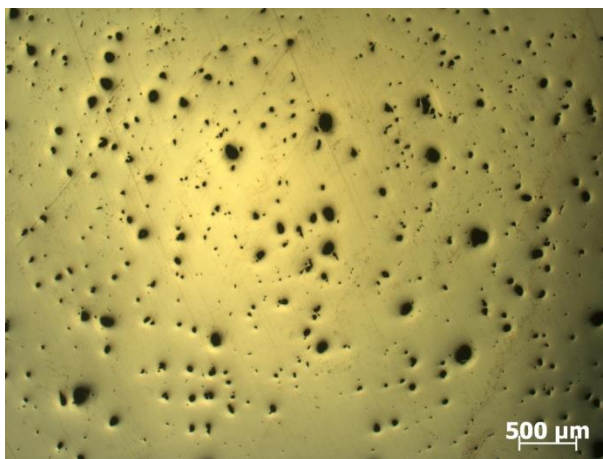
Рисунок 28. Пористость (а) и структура образца материала (б) EOS Nickel Alloy HX (*продольное сечение*)



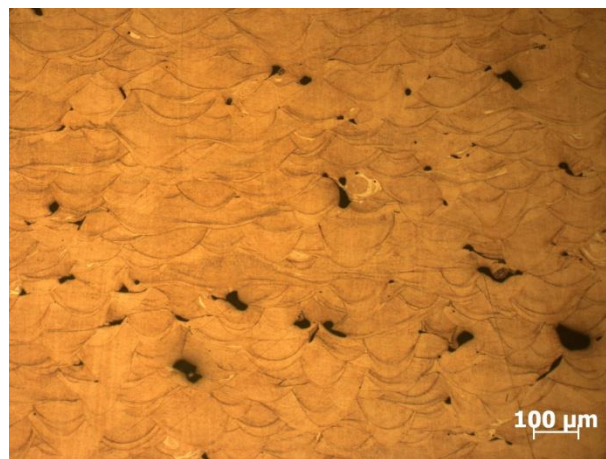
Рисунок 29. Структура образца при четырехкратном увеличении

На Рисунке 28 и Рисунке 29 рассмотрена структура сплава EOS Nickel Alloy HX в плоскости, расположенной параллельно относительно направления выращивания образца. Ванны расплава имеют продольную вытянутую форму. Недотравленные участки говорят о высокой интенсивности энергии при сплавлении.

Пористость в данном направлении небольшая, имеются во основном поры первого типа.



а)



б)

Рисунок 30. Пористость (а) и структура образца материала (б) EOS Nickel Alloy HX (*поперечное сечение*)

У рассматриваемого образца в поперечном сечении наблюдается большая пористость. При большем увеличении наблюдается большое количество как пор первого типа, так и пор второго типа. Поры второго типа наблюдаются на границах ванн расплава. В данном случае плавящийся материал не сплавляется с уже ранее полученным спеченным слоем материала. Такие дефекты могут возникать, к примеру, в случае, когда идет неравномерное распределение толщины наносимого материала. Также возможно попадание неметаллических включений в зону расплава.

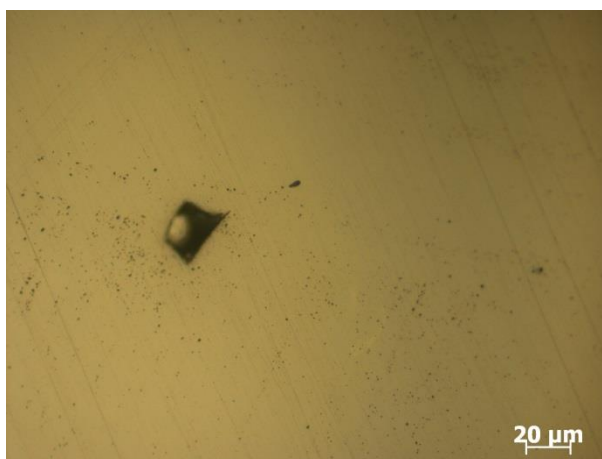


Рисунок 31. Пора второго типа с непроплавленной частицей материала

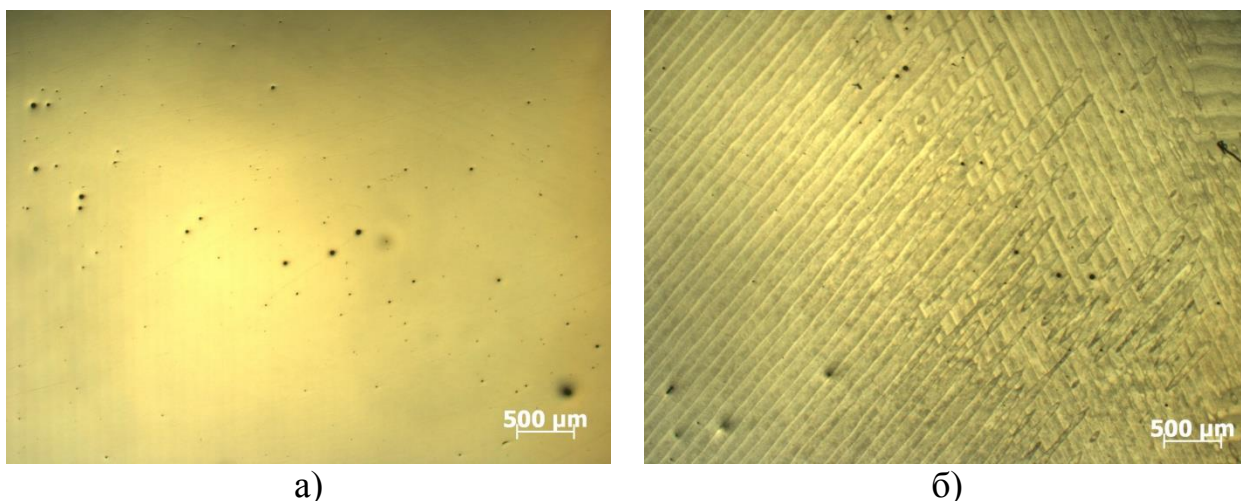


Рисунок 32. Пористость (а) и структура образца материала (б) EOS NickelAlloy IN718 (*продольное сечение*)

Рассматриваемый на Рисунке 32 образец из материала EOS NickelAlloy IN718, как и образец из материала EOS Nickel Alloy HX, имеет вытянутую форму ванны расплава.

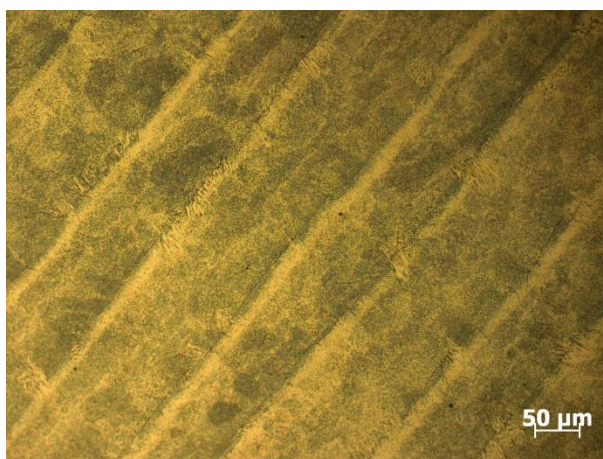


Рисунок 33. Структура образца материала EOS NickelAlloy IN718 в четырехкратном увеличении

Вторая группа – образцы, полученные при помощи традиционных технологий (а именно, тонкое точение) с использованием сплава ВТ6. Структура сплава представлена на Рисунке 34.

Рисунок 34. Структура образца материала ВТ6

3. Расчеты и аналитика

В данной работе фигурирует пара трения «вал-колодки». Для того чтобы понять, какие зоны колодки нуждаются в модификации, необходимо пронаблюдать, как изнашивается колодка без изменения свойств детали по поверхности и объему. Затем, используя полученные результаты, можно пронаблюдать износ колодки, изготовленной с помощью аддитивных технологий с измененными свойствами. Для этого необходимо составить математическую модель процесса трения колодки о контртело.

Математическая модель – это формализованное описание системы (операции) при помощи абстракций, например, в виде совокупности математических соотношений или схемы алгоритма, которое обеспечивает имитацию работы систем или устройств на уровне, достаточно близком к их реальному поведению, получаемому при натурных испытаниях систем или устройств [17].

В целом можно провести следующую классификацию методов математического моделирования:

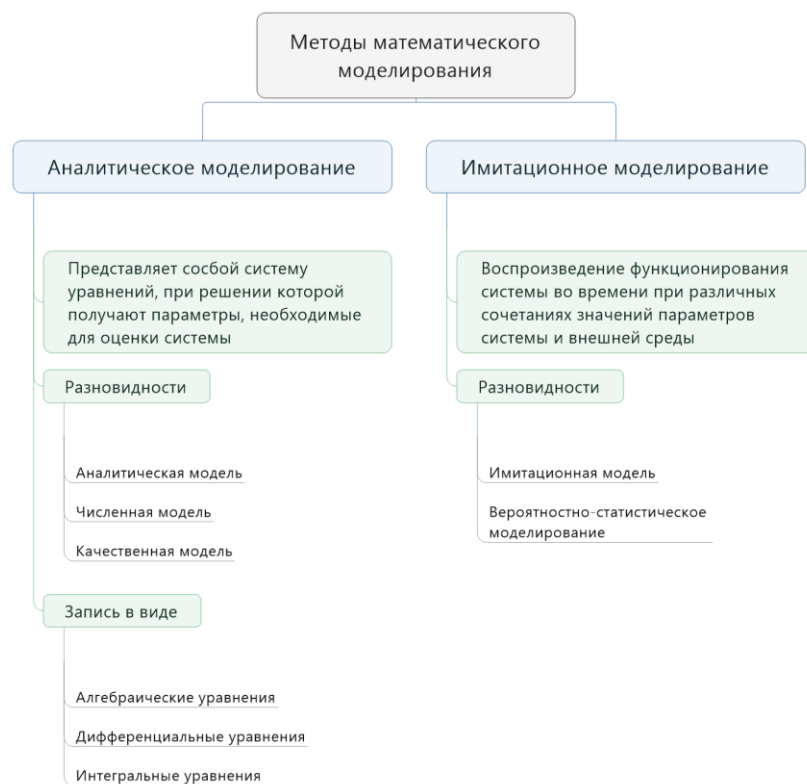


Рисунок 36. Классификация методов математического моделирования

На практике при расчетах используются различные методы, как аналитические, так и численные. Первые базируются на математических методах решения задач, обычно сложных и трудоемких, и зачастую ограничены достаточно простыми геометрическими формами тел и схем нагружения; численные методы (например, метод конечных элементов), наоборот, не ограничены ни формой тел, ни способом приложения нагрузки, что с повсеместной распространенностью мощной вычислительной техники способствует их распространению в инженерной среде [18].

При ведении расчетов очень часто нужно знать то, как развивается, например, процесс деформации конструкции с продолжающимся по времени внешним воздействием. И для расчетов подобного рода задач подходит именно численные методы.

Для данной работы можно представить следующим образом этапы математического моделирования, где необходимо рассмотреть:

- реализацию законов нагружения, в частности, законов силового, скоростного и теплового нагружения;
- изменение параметров решаемой контактной задачи (тепловые поля, деформация, напряжения, перемещения, усталостное изнашивание).

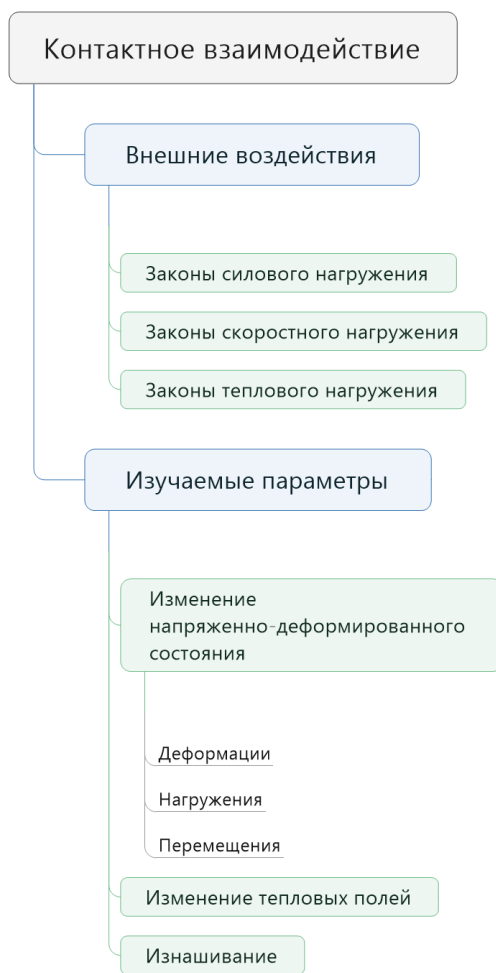


Рисунок 37. Цели и задачи математического моделирования в данной работе

В данной работе были использованы программные комплексы ANSYS и Siemens NX. Данные программные продукты предназначены для проведения компьютерного инженерного анализа проектируемых изделий и систем с помощью МКЭ.

3.1. Исходные данные

Из ранее проведенных экспериментов [20] была получена схема неравномерности износа трибосопряжения.

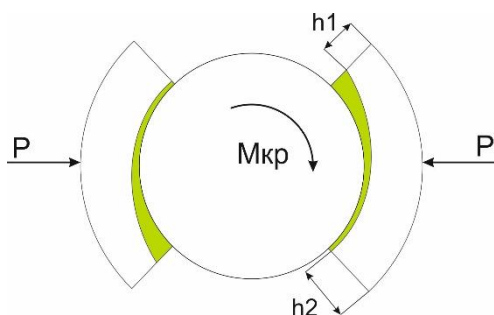


Рисунок 38. Схема неравномерности износа трибосопряжений в узле трения

Испытание пар трения проходило при следующих условиях, которые в дальнейшем понадобятся при моделировании пары трения «колодки-вал» в программном комплексе ANSYS:

- режим скоростного нагружения постоянный при частоте вращения 500 об/мин;
- скорость скольжения – 1,3 м/с;
- режим силового нагружения – переменный;
- изменение удельной нагрузки от 0 до 750 Н/см²;
- длительность испытания – 3 часа;
- силы, действующие на колодки – 1 кН;
- момент трения $M_{тр} = 5 \text{ Н/м}$;
- коэффициент трения $\mu_{тр} = 0,01 \dots 0,05$

Также для процесса моделирования необходимы свойства материалов, из которых в дальнейшем будут изготовлены колодки и контртело.

- Для контртела – сталь 38Х2МЮА;
- Для колодок – EOS Aluminium AlSi10Mg, EOS Titanium Ti6Al4V, EOS Nickel Alloy HX, EOS NickelAlloy IN718.

В процессе моделирования для колодок на данном этапе будет взят материал EOS Aluminium AlSi10Mg, так как при ранее проведенном эксперименте также фигурировали колодки из данного материала.

Как ранее было отмечено, при моделировании различных объектов в как в ANSYS, так и в Siemens NX используется метод конечных элементов [19]. Метод конечных элементов (МКЭ) относится к вариационно-разностным методам и имеет в своей основе представление исходной области со сложной формой границ в виде совокупности простых подобластей (конечных элементов) [18].

3.2. Моделирование пары трения «вал-колодки»

На начальном этапе необходимо было построить модель пары трения со следующими габаритами (Таблица 2) и область износа колодки в соответствии с полученными экспериментальными данными.

Таблица 3. Габариты элементов пары трения

Контртело	
Внешний радиус	25 мм
Внутренний радиус	12 мм
Высота кольца	10 мм
Колодки	
Длина колодки	16 мм
Ширина колодки	6 мм
Высота колодки	7 мм
Область износа	1 мм

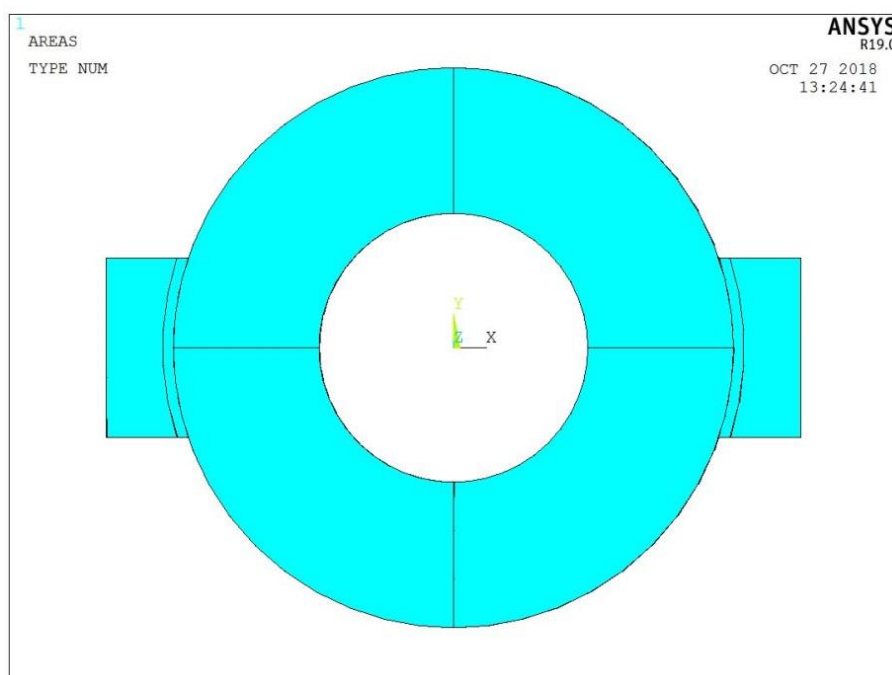


Рисунок 39. Модель пары трения в ANSYS

Построение физической модели чаще всего предполагает идеализацию конструкции, ее свойств, а также внешних воздействий, оказываемых на конструкцию в силу ограниченности вычислительных мощностей ЭВМ. В данном случае узел трения был упрощен, толщина элементов пары трения на начальных этапах составляет 1 мм, что значительно упрощает и ускоряет расчет.

Также вначале необходимо задать типы конечных элементов, с помощью которых в дальнейшем идет построение расчетной сетки. В данном случае задавались типы элементов SHELL и SOLID. Элемент типа SHELL задается при построении оболочечных элементов, а элемент типа SOLID – для твердотельных.

Создание модели велось следующим образом: вначале была построена оболочечная модель пары трения в плоскости XOY с использованием типа элементов SHELL. Затем для создания твердотельной модели оболочечная модель вытягивалась на высоту с помощью команды Extrude. Модель вытягивается таким образом, что у нее сохраняется структура сетки для оболочечных элементов, а с помощью элемента SOLID идет разбиение модели по объему. В результате была получена модель с расчетной сеткой. Причем некоторые области модели, а именно кольцо и часть колодки, имеют неструктурированную сетку. Такая сетка была задана потому, что данные области меньше всего участвуют в процессе износа материала, и высокая точность расчета в данных областях не требуется. Соответственно, назначение неструктурированной сетки для данных областей позволяет значительно экономить на времени расчета.

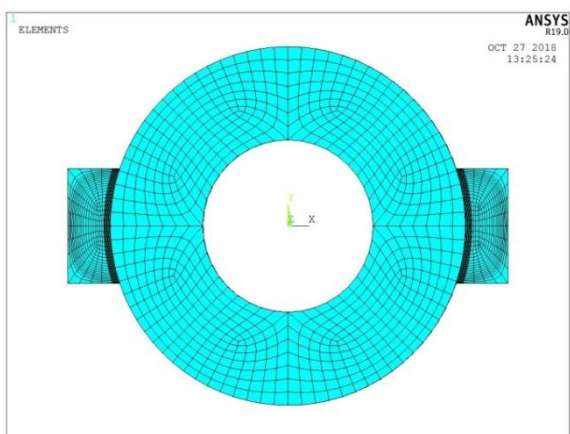


Рисунок 40. Первоначальная КЭ-сетка

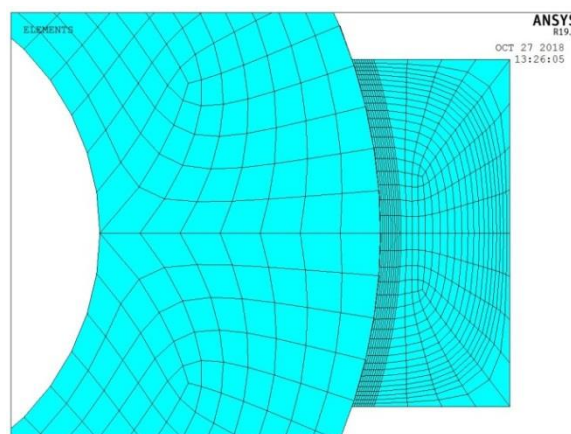


Рисунок 43. Структурированная сетка области износа

Для зоны износа была задана структурированная сетка, так как в этой области важна точность полученного результата. Также было проведено уменьшение толщины структурированной сетки ближе к краям, так как

важно получить точные значения в области входа и выхода колодки в зону контакта. Также для уменьшения погрешности измерений и увеличения точности на краю кольца было задано разбиение сетки на более мелкие элементы.

Для упрощения модели число элементов, заданных по оси OZ, было равно 1, высота самого элемента была равна 1 мм, то есть толщине элементов контактной пары. Это было сделано для упрощения и сокращения времени расчетов.

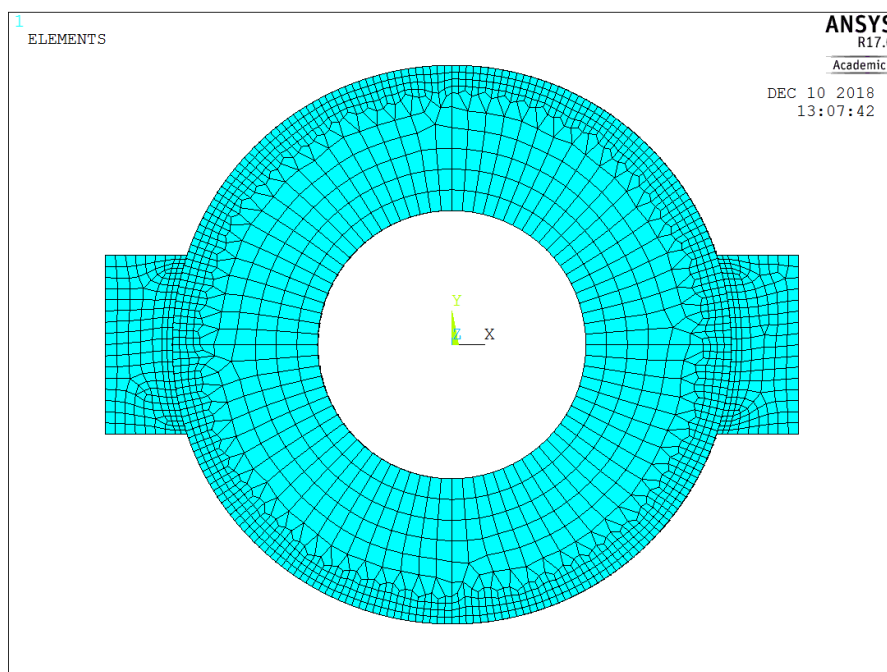


Рисунок 41. Полученная КЭ-сетка

3.3. Контактное взаимодействие. Изменение напряженно-деформированного состояния

При моделировании напряженно-деформированного состояния необходимо задать материалы для элементов пары трения. Для контртела был задан материал «сталь», для колодок – «алюминий», для которых были указаны соответствующие модуль упругости и коэффициент Пуассона (для стали: модуль упругости (E) – 202 ГПа, коэффициент Пуассона – 0,33, силумина: модуль упругости (E) – 70 ГПа, коэффициент Пуассона – 0,27).

Далее нужно наложить на элементы пары трения ограничения по степеням свободы. Для контртела было задано вращение относительно оси

OZ, для колодок задавались перемещения вдоль оси OX. После было задано контактное взаимодействие элементов пары трения, было задано вращение диска с учетом угла поворота, коэффициент трения, равный 0,05. Также к колодкам были приложены силы (на обе колодки прикладывалась сила, равная 1 кН).

Для задания вращения на весь диск и равномерного приложения сил на колодки для данных элементов пары трения были созданы пилотные узлы. Пилотный узел может быть одним из узлов на целевом элементе или узлом в любом произвольном месте. Расположение пилотного узла важно только тогда, когда требуется вращение или момент нагрузки.

Затем задавались условия решения модели. Решение задавалось в два этапа. Первый шаг решения – решение стационарной задачи, когда идет установление контакта колодки и контртела, ведется оказание нагрузок на колодки. Второй шаг – решение нестационарной задачи, когда начинается вращение контртела относительно колодки.

Для вращения был задан угол поворота диска относительно колодки – $d\varphi = 1/N$, где $N = 10$ – число шагов решения, то есть за 1 шаг решения диск поворачивается относительно колодки на угол $0,1^\circ$.

На рисунке 36 показано решение при повороте контртела на 1° в силу того, что решение нестационарной задачи требует больших вычислительных мощностей ПК и производится продолжительное время. Для демонстрации картины напряжения и перемещений на рисунках 37 и 38 приведено решение данной задачи с помощью программного продукта Siemens NX.

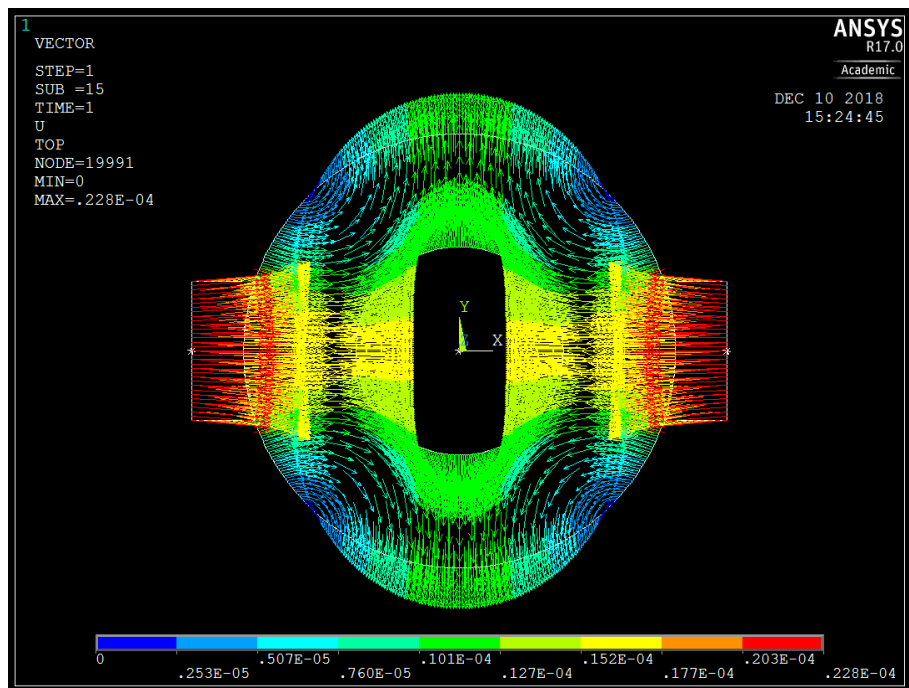


Рисунок 42. Установление контакта и приложение сил к колодкам

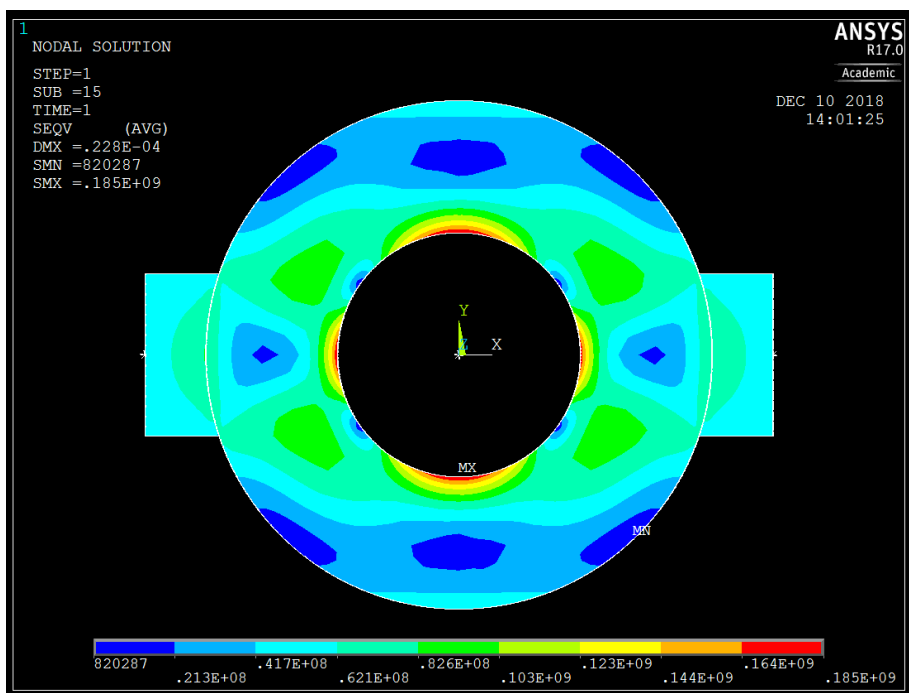


Рисунок 43. Решение стационарной задачи

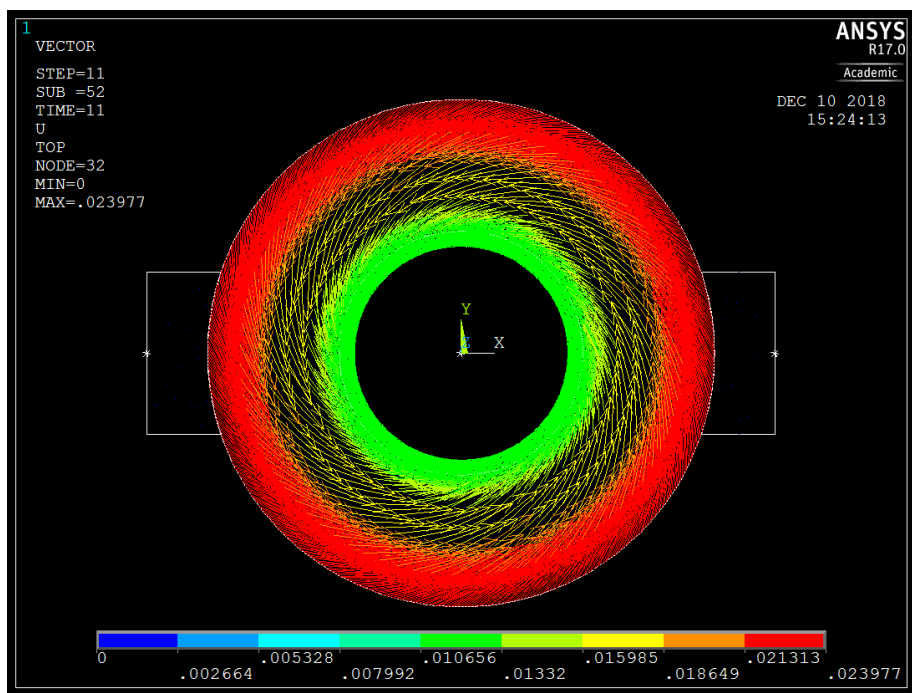


Рисунок 44. Вращение диска относительно колодок при решении нестационарной задачи

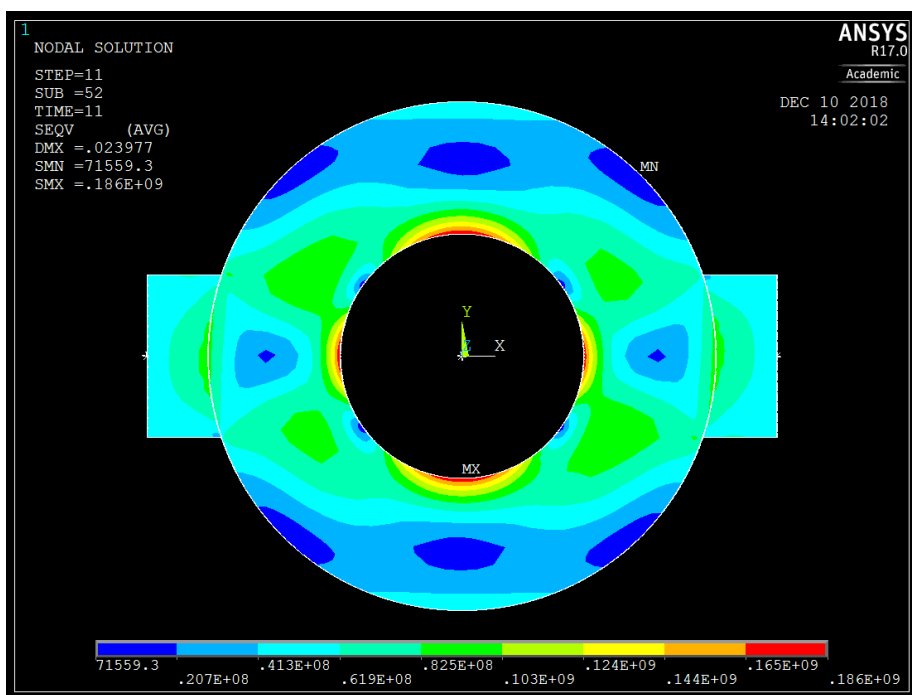


Рисунок 45. Решение нестационарной задачи

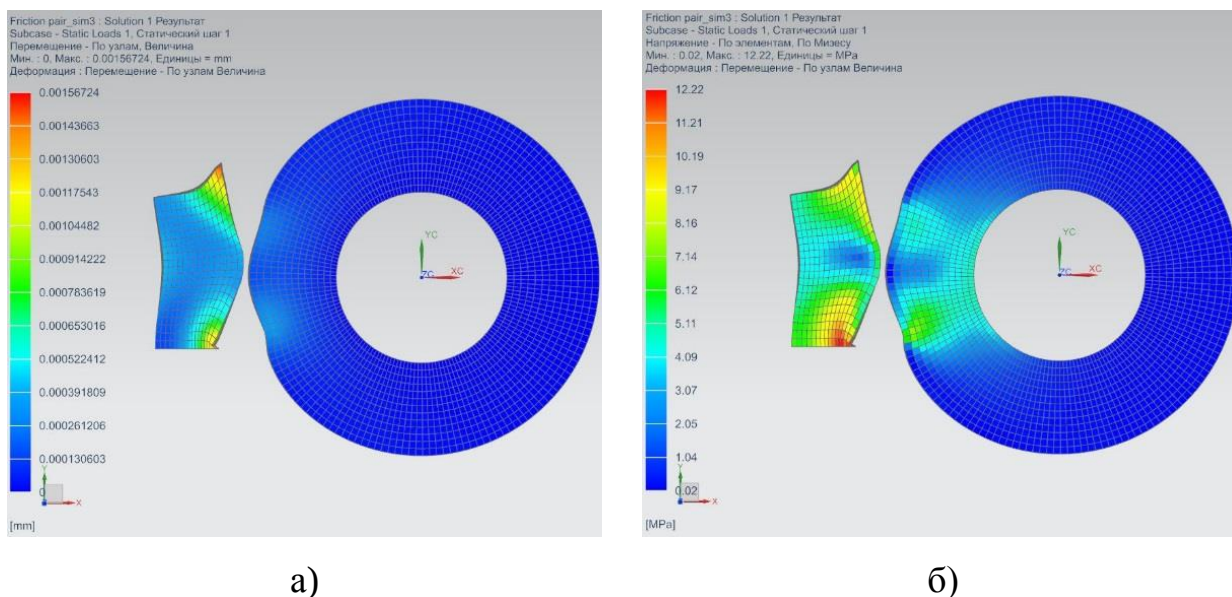


Рисунок 46. Результат моделирования: а) – по параметру «Перемещение», б) – по параметру «Напряжение»

3.4. Изменение тепловых полей

При решении тепловых задач важными являются три вида переноса тепла: теплопроводность (conduction), конвекция (convection) и теплоизлучение (radiation). В рамках данной работы для решения тепловой задачи будут использоваться только два первых параметра.

Теплопроводность – это внутренний обмен энергией между одним телом, находящимся в идеальном контакте с другим, или от одной части тела к другой за счет градиента температур. Тепловой поток для теплопроводности определяется законом теплопроводности Фурье:

$$q = -\lambda \cdot \text{grad}(T),$$

где λ – коэффициент теплопроводности, $\text{grad}(T)$ – градиент температур.

Конвекция – это обмен энергией между телом и окружающей текучей средой (жидкость или газ). Тепловой поток для конвекции определяется по закону Ньютона – Рихмана:

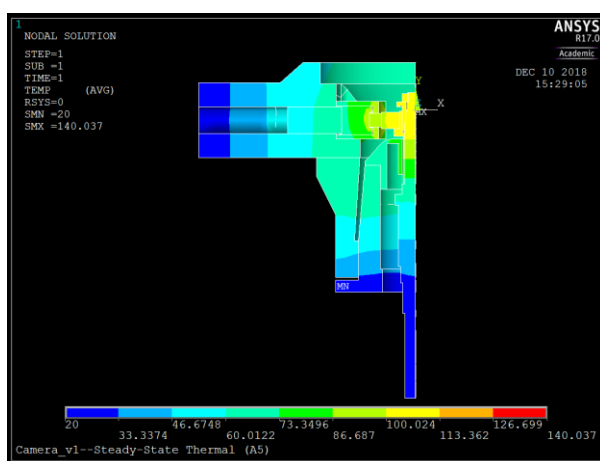
$$q = \alpha \cdot (T_S - T_B),$$

где α – коэффициент теплоотдачи, T_S – температура поверхности тела, T_B – температура окружающей среды.

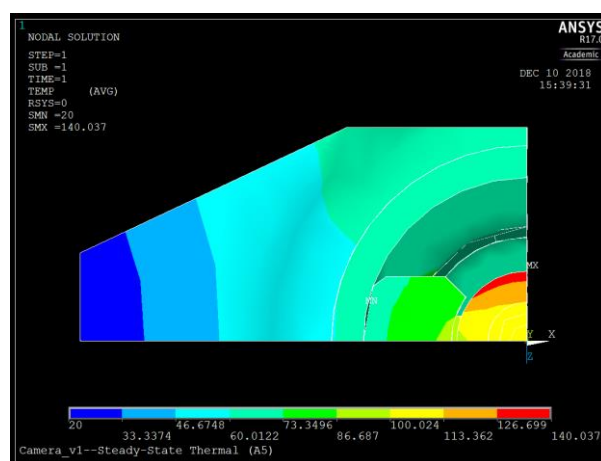
По первому закону термодинамики количество теплоты, полученное системой, идет на изменение ее внутренней энергии и совершение работы против внешних сил.

При решении тепловой задачи необходимо было задать тепловой поток и конвекцию. Для задания теплового потока были построены специальные контактные элементы, находящиеся на криволинейной поверхности колодок и на внешней поверхности диска. Также была задана конвекция на внешней и внутренней поверхностях диска, а также на прямых поверхностях колодки.

Еще необходимо было задать правильные условия теплообмена, так как без учета того, что моделируемые элементы контактной пары находятся в камере трения со смазочной средой и другими ее элементами, получаются тепловые характеристики, не соответствующие реальности. Для этого в ANSYS Workbench была смоделирована полноценная камера трения, для которой был задан теплообмен, примерно соответствующий реальному в камере трения АТК. На рисунках 39 и 40 можно пронаблюдать распределение температур при выходе решения модели на стационарный режим, когда диск вращается с постоянной скоростью, а масло в камере трения нагрето до температуры 80°C.



а)



б)

Рисунок 47. Теплообмен камеры трения: а) – вид спереди, б) – вид сверху

Затем необходимо было связать тепловую задачу с ранее решаемой задачей напряженно-деформируемого состояния.

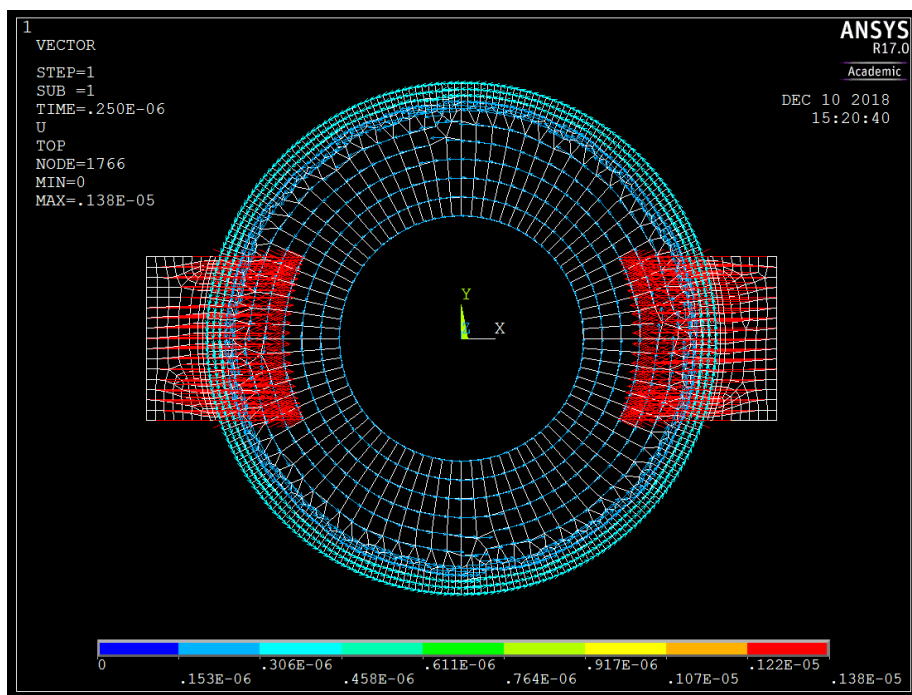


Рисунок 48. Стационарный расчет при наложении нагрузок на колодки

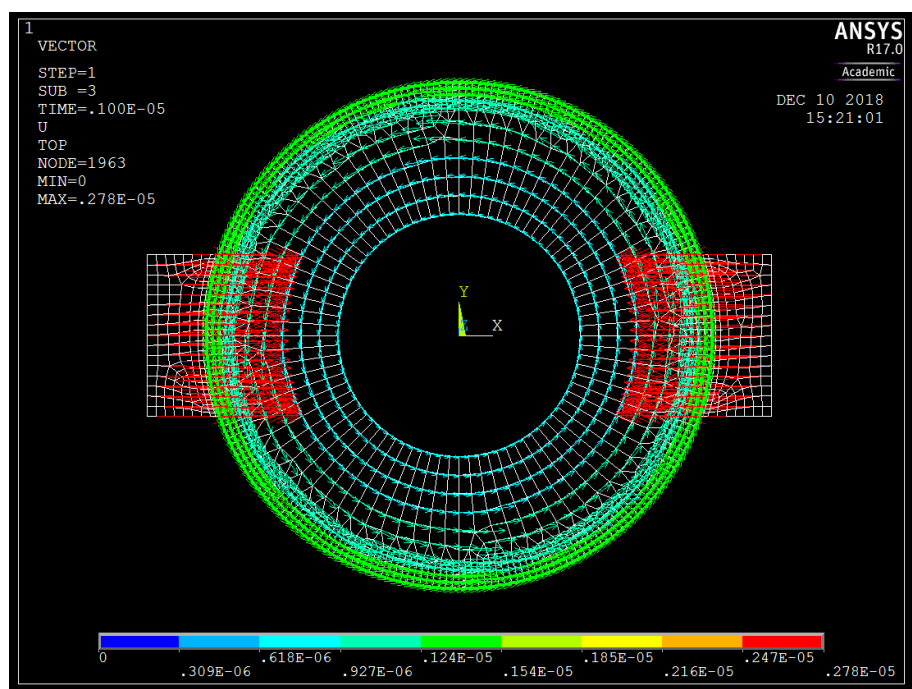


Рисунок 49. Приложение нагрузок на колодки и вращение диска при решении стационарной задачи

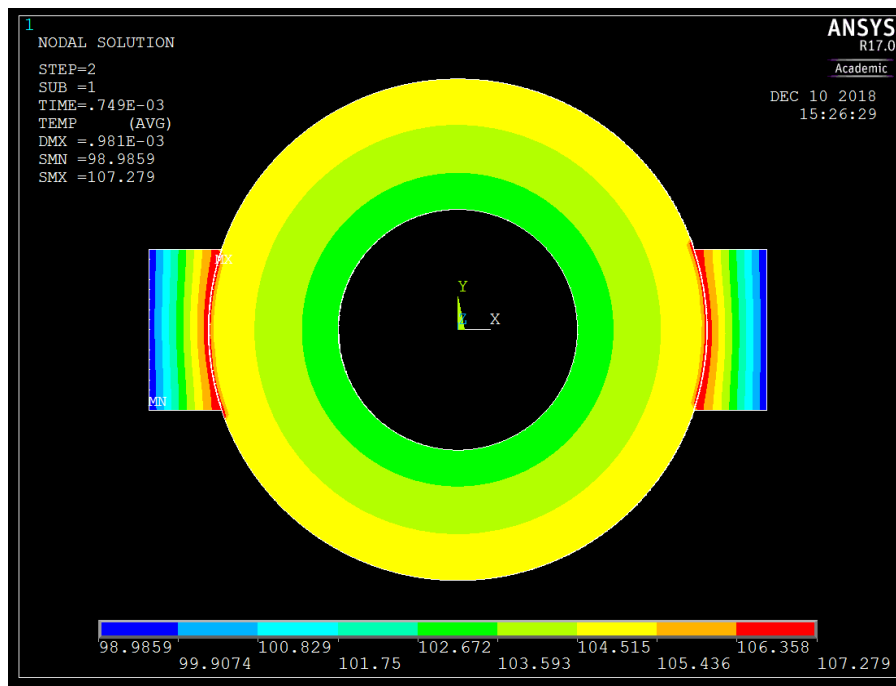


Рисунок 50. Первый шаг решения тепловой нестационарной задачи

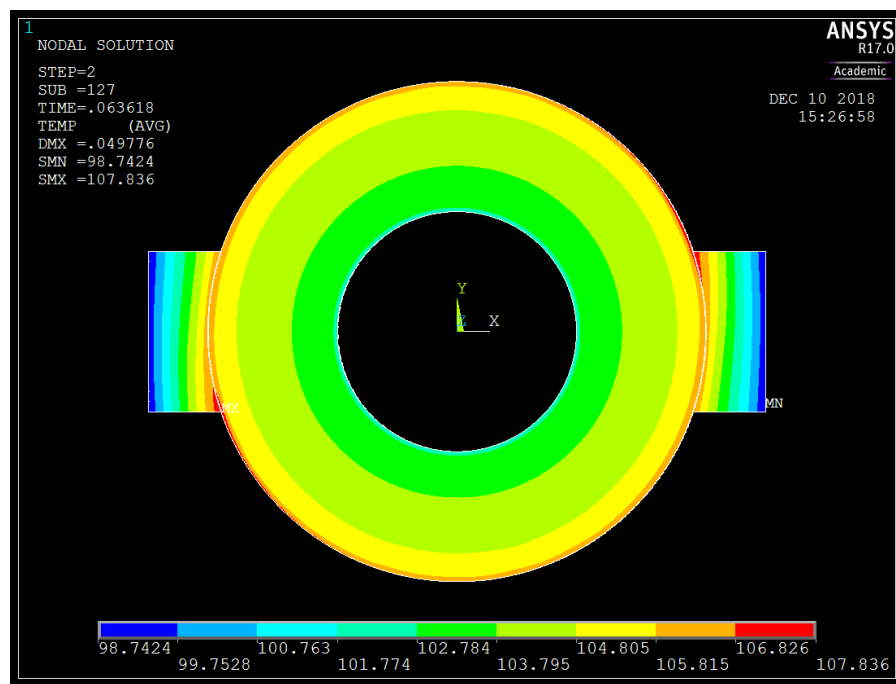
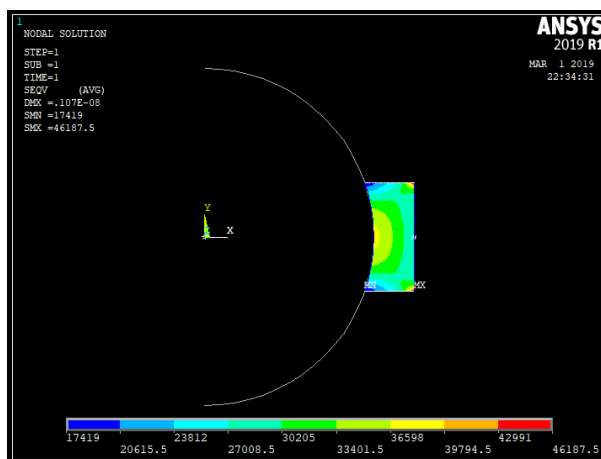
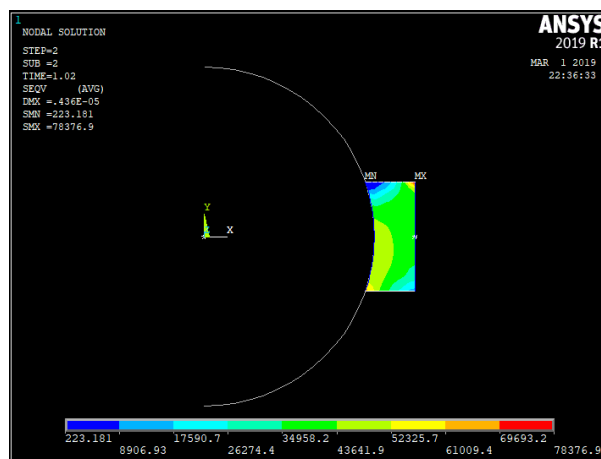


Рисунок 51. Распределение температур при решении нестационарной задачи

Также было произведено моделирование износа пары трения.



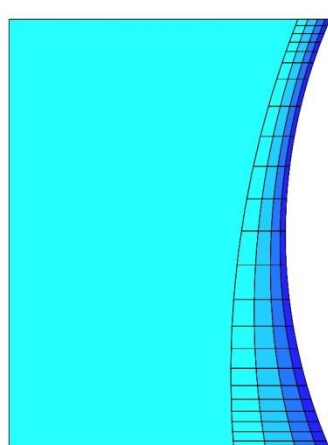
а)



б)

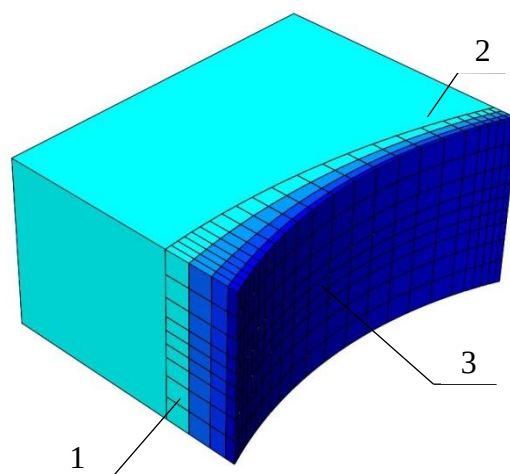
Рисунок 52. Износ пары трения: а) – начало расчета, б) – конец расчета

Полученные данные демонстрируют, что результат симуляции в целом схож с результатами ранее проведенных экспериментов [14]. На основе проведенного математического моделирования были созданы концепты объемной модификации поверхностных слоев элемента пары трения (колодки).



- 1 – место врезания колодки в контртело
- 2 – место выхода колодки из зоны трения
- 3 – поверхность контакта

а)



б)

Рисунок 53. Модифицированная структура элемента пары трения (колодки) в одной плоскости скольжения (задание градиента свойств по глубине по мере удаленности от поверхности контакта): а – вид спереди; б – изометрическое изображение.

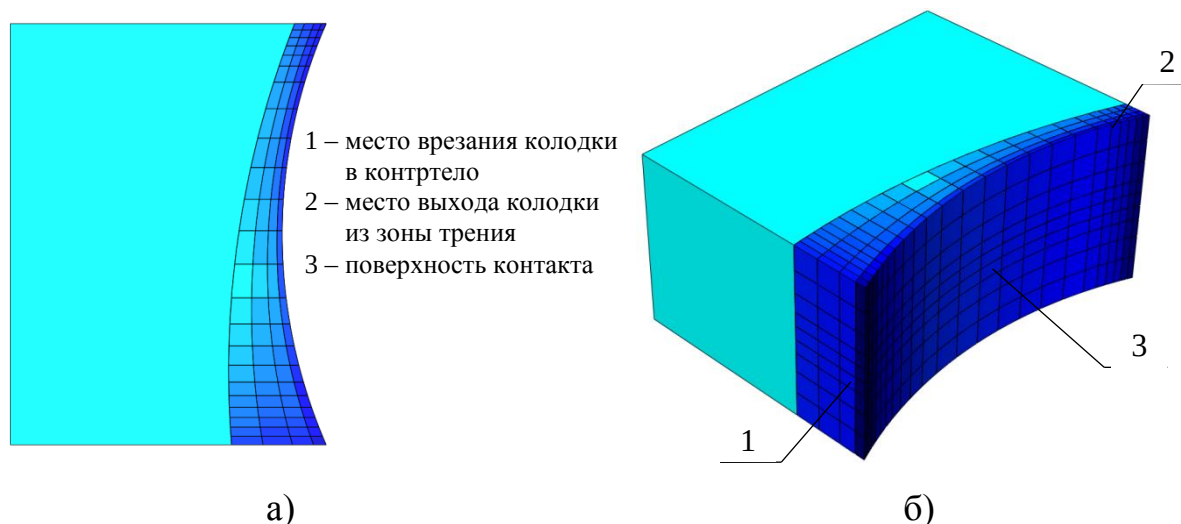


Рисунок 54. Модифицированная структура элемента пары трения (колодки) в двух взаимно перпендикулярных плоскостях (задание градиента свойств по глубине и по удаленности от края колодки): а – вид спереди; б – изометрическое изображение.

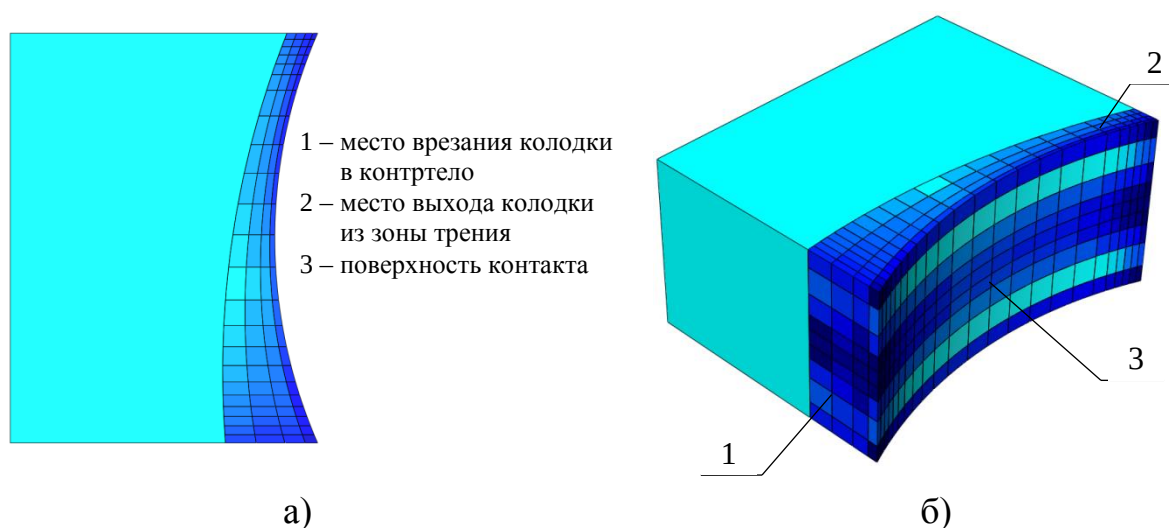


Рисунок 55. Модифицированная структура элемента пары трения (колодки) в трех взаимно перпендикулярных плоскостях (задание градиента свойств по глубине и по удаленности от взаимно перпендикулярных краев колодки): а – вид спереди;
б – изометрическое изображение.

Для получения более точных выходных данных необходимо уточнение модели, например, задание более точных параметров для исследуемых материалов.

Это также относится к проблеме износа элементов пары трения. При получении более точной модели, описывающей процесс трения трибоузла «колодка – вал», можно будет судить о форме износа, о его величине. Исходя из этого, необходимо рассмотреть возможность формирования и изменения структуры колодки при ее изготовлении различными способами (формирование различной плотности по осям x , y , z , физико-механические свойства).

4. Результаты проведенного исследования

Было проведено изучение равномерности износа образца (колодки) из материала EOS Aluminium AlSi10Mg после проведения триботехнических испытаний на автоматизированном триботехническом комплексе, разработанном на кафедре «Автоматизация и роботизация в машиностроении» Института кибернетики Томского политехнического университета [20]. При изучении измерялись габариты колодки.

На колодке, на входе в контакт с роликом, на внутренней криволинейной поверхности, имеются в большом количестве темные пятна после испытаний, которые были взяты за метку, с которой велось измерение. Измерения проводились на модифицированном микроскопе МБС-9.

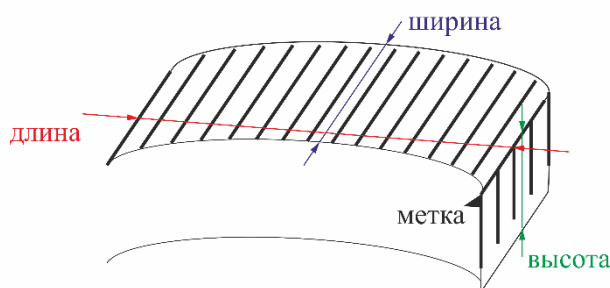


Рисунок 56. Измерение габаритов образца



Рисунок 57. Измерение ширины колодки на модернизированном микроскопе МБС-9

В ходе измерения были получены следующие величины ширины колодки, изображенные в таблице 4 и на графике (Рисунок 36).

Таблица 4. Результаты измерений ширины колодки на модернизированном микроскопе МБС-9

Длина колодки (l)	Измерение 1 (a_1)	Измерение 2 (a_2)	Измерение 3 (a_3)	Измерение 4 (a_4)	Ср. значение ($\bar{x}$)
0	4,66	4,622	4,859	4,819	4,74
1	4,658	4,599	4,939	4,939	4,78375
2	4,819	4,74	4,938	4,939	4,859
3	4,737	4,719	4,918	4,918	4,823
4	4,818	4,84	4,918	4,961	4,88425
5	4,797	4,82	4,957	5	4,8935
6	4,776	4,94	4,977	4,98	4,91825
7	4,736	4,738	4,999	5,06	4,88325
8	4,977	4,876	4,958	5,04	4,96275
9	4,899	4,756	5,017	5,019	4,92275
10	4,849	4,978	5,059	5,037	4,98075
11	4,987	4,837	5,118	5,117	5,01475
12	4,868	4,844	5,16	5,157	5,00725
13	4,946	4,904	5,119	5,118	5,02175
14	4,828	4,782	5,098	5,099	4,95175
15	4,979	4,781	5,1	5,118	4,9945
15,75	4,921	4,94	5,039	4,997	4,97425

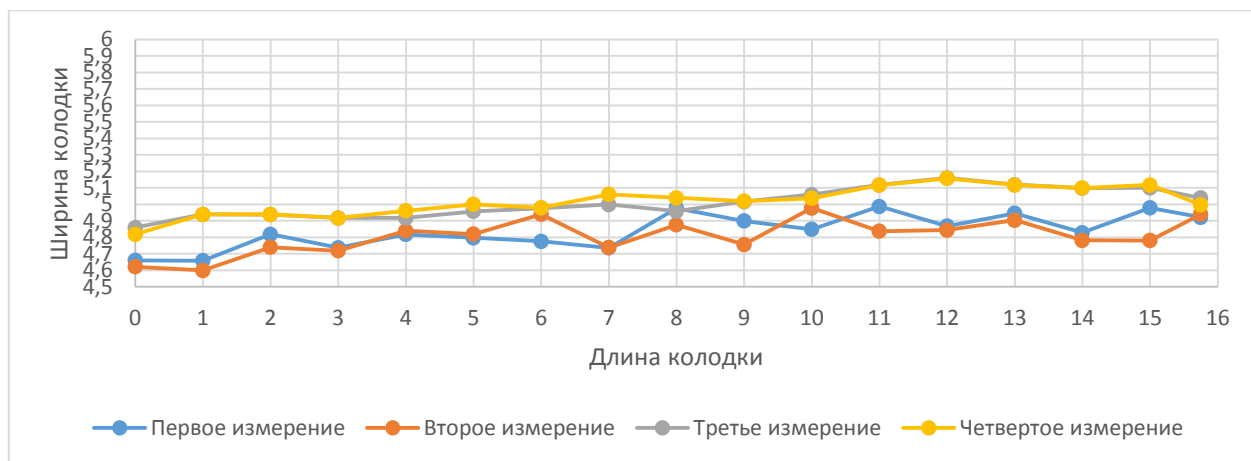


Рисунок 58. График линейного износа колодки



Рисунок 59. График среднего линейного износа колодки

Из графика среднего линейного износа колодки видно, что имеется неравномерность износа, как по всей длине колодки, так и внутри измеряющейся длины.

5. Финансовый менеджмент

1. Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности

1.1. Потенциальные потребители результатов исследования

Для анализа потенциальных потребителей результатов исследования необходимо выделить целевой рынок. Данная научно-исследовательская работа, направленная на разработку методики перераспределения износа конструкционных материалов в парах трения, может быть предназначена, прежде всего, для коммерческих организаций, где критерием сегментирования рынка могут быть такие параметры, как месторасположение, отрасль, выпускаемая продукция, размер организации и т.д.

К потенциальным потребителям могут относиться следующие коммерческие организации:

- производители оборудования для аддитивного производства (АП);
- производители порошковых материалов для АП;
- производители технических систем, где есть узлы трения;
- производители смазочных материалов;
- производители присадок к смазочным материалам;
- производители стандартных конструкционных материалов,

изготовленным традиционным способом.

1.2. SWOT-анализ

SWOT-анализ – это комплексный анализ научно-исследовательского проекта, который позволяет выявить сильные и слабые стороны проекта, а также ситуации, которые несут в себе возможности, то есть предпочтительные ситуации в настоящем и будущем, которые могут положительно сказаться на проекте, или угрозы, имеющие разрушительный характер в отношении проекта.

Таблица 5. Матрица SWOT

	Сильные стороны	Слабые стороны
	Внутренняя среда	Внешняя среда
Внутренняя среда	С1. Повышение износостойкости изделий. С2. Большой потенциал для оптимизации конструкции трибосопряжения и внедрения генеративного дизайна. С3. Облегчение конструкции при использовании более легких и прочных материалов. С4. Создание деталей сложных геометрических форм и конфигураций. С5. Пока еще небольшая конкуренция на, прежде всего, российском рынке. С6. Востребованность исследований (переход в Индустрию 4.0). С7. Возможность получения финансирования для научно-исследовательских проектов. С8. Экологичность технологии. С9. Меньшая ресурсозатратность в сравнении с традиционным производством.	Сл1. Неотлаженный технологический процесс. Сл2. Конкуренция со стороны зарубежных компаний – в России АП менее развито. Сл3. Зависимость от импортного оборудования и материалов. Сл4. Дорогое производство. Сл5. Отсутствие необходимого оборудования в ТПУ или его недоступность.
	Возможности	Угрозы
Внешняя среда	В1. Возможность быстрого роста и развития. В2. Взаимодействие с поставщиками материалов, оборудования и ПО для АП. В3. Взаимодействие с производителями трибоузлов, смазочных материалов, присадок. В4. Возможность реализации программы по импортозамещению. В5. Использование	У1. Отсутствие потребности в разработке. У2. Введение ограничений на ввоз импортной продукции на территорию РФ. У3. Нестабильное финансирование научно-исследовательских проектов. У4. Увеличение конкуренции при проведении научных исследований.

	инновационной инфраструктуры ТПУ. В6. Взаимодействие с научными сотрудниками и научными группами из других университетов, в том числе и зарубежных.	
--	--	--

Второй этап состоит в выявлении соответствия сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта внешним условиям окружающей среды. В рамках данного этапа необходимо построить интерактивные матрицы проекта.

Таблица 6. Интерактивная матрица для сильных сторон и возможностей

		Сильные стороны								
Возможности		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
	B1	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	B2	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	B3	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	B4	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	B5	+	+	-	-	0	+	+	+	+
	B6	+	0	+	+	+	+	+	+	+

Таблица 7. Интерактивная матрица для слабых сторон и возможностей

		Слабые стороны				
Возможности		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4	Сл5
	B1	-	-	-	-	0
	B2	+	0	+	+	+
	B3	+	0	+	+	+
	B4	-	+	-	-	+
	B5	+	+	+	+	-
	B6	+	-	+	0	+

Таблица 8. Интерактивная матрица для сильных сторон и угроз

		Сильные стороны								
Угрозы		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
	У1	-	-	-	+	-	0	+	-	-
	У2	0	0	+	0	+	+	0	0	-
	У3	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	У4	+	+	+	+	+	+	+	+	+

Таблица 9. Интерактивная матрица для слабых сторон и угроз

Слабые стороны		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4	Сл5
Угрозы	У1	+	-	0	+	-
	У2	0	+	+	0	+
	У3	+	+	+	+	+
	У4	+	+	+	+	+

Таблица 10. Итоговая матрица SWOT-анализа

	Сильные стороны	Слабые стороны
	С1. Повышение износостойкости изделий. С2. Большой потенциал для оптимизации конструкции трибосопряжения и внедрения генеративного дизайна. С3. Облегчение конструкции при использовании более легких и прочных материалов. С4. Создание деталей сложных геометрических форм и конфигураций. С5. Пока еще небольшая конкуренция на, прежде всего, российском рынке. С6. Востребованность исследований (переход в Индустрию 4.0). С7. Возможность получения финансирования для научно-исследовательских проектов. С8. Экологичность технологии. С9. Меньшая ресурсозатратность в сравнении с традиционным производством.	Сл1. Неотлаженный технологический процесс. Сл2. Конкуренция со стороны зарубежных компаний – в России АП менее развито. Сл3. Зависимость от импортного оборудования и материалов. Сл4. Дорогое производство. Сл5. Отсутствие необходимого оборудования в ТПУ или его недоступность.
Возможности	Направления развития	Сдерживающие факторы
В1. Возможность быстрого роста и развития.	В целом можно сказать о том, что на данном этапе рынок 3D-технологий находится в начале	К сдерживающим факторам можно отнести, прежде

В2. Взаимодействие с поставщиками материалов, оборудования и ПО для АП. В3. Взаимодействие с производителями трибоузлов, смазочных материалов, присадок. В4. Возможность реализации программы по импортозамещению. В5. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ. В6. Взаимодействие с научными сотрудниками и научными группами из других университетов, в том числе и зарубежных.	подъема. Сейчас имеются большие перспективы по изучению новых технологий, изучению основных параметров АТ, влияющих на качество получаемых изделий, их усовершенствованию, внедрению в производство, выходу на рынок. Современные тенденции развития машиностроения направлены на оптимизацию конструкций изделий, повышение износостойкости, облегчение конструкций, экономию используемых материалов, экологичность технологического процесса. Данные разработки направлены на усовершенствование технологии получения деталей АП и удовлетворение потребностей современного машиностроения.	всего, недоступность необходимого оборудования и материалов как таковых, либо надлежащего качества на базе ТПУ, вследствие чего необходимо обращение к другим поставщикам, либо в другие научные центры. Также в связи с увеличившейся конкуренцией меньше возможностей выхода на рынок.
Угрозы	Угрозы развития	Уязвимости
У1. Отсутствие потребности в разработке. У2. Введение ограничений на ввоз импортной продукции на территорию РФ. У3. Нестабильное финансирование научно-исследовательских проектов. У4. Увеличение конкуренции при проведении научных исследований.	Основные угрозы для данного научно-исследовательского проекта – нестабильное финансирование проектов и возросшая конкуренция в рамках исследований АТ, которая наблюдается как в мире в целом, так и в России в частности, учитывая рост публикаций и патентов в сфере изучения АТ [13].	Здесь также можно выделить конкуренцию и уязвимость проекта, связанного, прежде всего, с процессом становления АП в России, зависимостью от иностранных компаний, отсутствием надлежащего оборудования в ТПУ и нестабильностью

		финансирования.
--	--	-----------------

2. Планирование научно-исследовательских работ

2.1. Структура работ в рамках научного исследования

Планирование комплекса научно-исследовательских работ осуществляется в порядке:

- определение структуры работ в рамках ВКР;
- определение количества исполнителей для каждой из работ;
- установление примерного времени продолжительности работ;
- построение графика проведения научных исследований.

В реализации данного проекта участвовало два основных исполнителя – руководитель (Р) и студент-дипломник (СД). Также в проекте участвовали субподрядчики (С), привлекаемые на договорных началах для выполнения отдельных работ проекта, и консультанты (К). В данном разделе была составлена таблица, отражающая примерный порядок этапов выполнения выбранного научного исследования, а также распределения исполнителей по видам работ.

Таблица 11. Перечень этапов, работ и распределение обязанностей между участниками проекта

Основные этапы	№ раб.	Содержание работы	Должность исполнителя	Загрузка, %
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Р	100
Выбор направления исследования	2	Изучение материалов по теме	СД	100
	3	Патентное исследование	СД	100
	4	Календарное планирование работ	Р/СД	50/50
Теоретические и экспериментальные исследования	5	Исследование механических свойств аддитивно полученных и	СД/К	70/30

		традиционных материалов до триботехнических испытаний		
	6	Разработка математической модели	К/СД/Р	60/30/10
	7	Проведение триботехнических испытаний и анализ результатов	СД/Р	50/50
	8	Исследование механических свойств аддитивно полученных и традиционных материалов после триботехнических испытаний	СД/К	85/15
	9	Создание КД для образца с переменными свойствами	СД/К	50/50
	10	Печать образца с переменными свойствами на 3D-принтере	С	100
	11	Исследование механических свойств образца до триботехнических испытаний	СД/К	85/15
	12	Проведение триботехнических испытаний и анализ результатов	СД/Р	50/50
	13	Исследование механических свойств образца после триботехнических испытаний	СД/К	85/15
Проведение ОКР				
Оформление отчета	14	Составление пояснительной записки	СД	100

2.2. Определение трудоемкости выполнения работ

Для построения диаграммы Ганта необходимо перевести длительность каждого из этапов работ из рабочих дней в календарные дни. Для этого необходимо рассчитать коэффициент календарности по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} = \frac{365}{365 - 118} = 1,48 ,$$

где $T_{\text{кал}}$ – количество календарных дней в году, $T_{\text{вых}}$ – количество выходных дней в году, $T_{\text{пр}}$ – количество праздничных дней в году.

Трудовые затраты в большинстве случаях образуют основную часть стоимости разработки, поэтому важным моментом является определение трудоемкости работ каждого из участников научного исследования.

В данном разделе рассчитана трудоемкость для каждого члена рабочей группы. Трудоемкость работ можно оценить экспертным путем в человеко-днях. Следует понимать, что такая оценка носит вероятностный характер и не предусматривает некоторые факторы, влияющие на процесс работы того или иного участника. Ожидаемое значение трудоемкости $t_{\text{ож}i}$ рассчитывается по формуле:

$$t_{\text{ож}i} = \frac{3t_{\text{mini}} + 2t_{\text{max}i}}{5} , \text{ где}$$

$t_{\text{ож}i}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы чел.-дн.;

t_{mini} – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;

$t_{\text{max}i}$ – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

$$t_{\text{ож}1} = \frac{3t_{\text{min}1} + 2t_{\text{max}1}}{5} = \frac{3 \cdot 1 + 2 \cdot 3}{5} = 1,8 \text{ чел. – дней.}$$

Вычислив ожидаемую трудоемкость работ, необходимо определить продолжительность каждой работы в рабочих днях T_p с учетом параллельности выполнения работы несколькими исполнителями.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожi}}{ч_i}, \text{ где}$$

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

$t_{ожi}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы чел.-дн.;

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

$$T_{p1} = \frac{t_{ож1}}{ч_1} = \frac{1,8}{1} = 1,8$$

Длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни по формуле:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}},$$

где T_{ki} – продолжительность выполнения i -й работы в календарных днях;

T_{pi} – продолжительность выполнения i -й работы в рабочих днях.

$$T_{k1} = T_{p1} \cdot k_{\text{кал}} = 1,8 \cdot 1,48 \approx 3$$

Таблица 12. Временные показатели проведения научного исследования

№ раб.	Исполнители	Трудоемкость работ			Длительность работ в рабочих днях T_{pi}	Длительность работ в календарных днях T_{ki}
		$t_{\min}$, чел. – дни	$t_{\max}$, чел. – дни	$t_{\text{ож}}$, чел. – дни		
1	Р	1	3	1,8	1,8	3
2	СД	7	10	8,2	8,2	12
3	СД	14	21	16,8	16,8	25
4	Р/СД	1	3	1,8	0,9	1
5	СД/К	7	14	9,8	9,8	15

6	К/СД/Р	61	68	63,8	63,8	95
7	СД/Р	7	14	9,8	9,8	15
8	СД/К	7	14	9,8	9,8	15
9	СД/К	1	3	1,8	0,9	1
10	С	3	5	3,8	3,8	6
11	СД/К	7	14	9,8	9,8	15
12	СД/Р	7	14	9,8	9,8	15
13	СД/К	7	14	9,8	9,8	15
14	СД	14	18	15,6	15,6	23
Итого						256

На основе полученных данных был построен план-график работ. График строится по длительности исполнения работ в рамках научно-исследовательского проекта с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени дипломирования.

Таблица 13 – Календарный план-график проведения ВКР

[illegible]

3. Бюджет научно-технического исследования

В процессе формирования бюджета НТИ используется следующая группировка затрат по статьям:

- материальные затраты НТИ;
- затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ;
- основная заработная плата исполнителей проекта;
- дополнительная заработная плата исполнителей проекта;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- контрагентные расходы.

3.1. Расчет материальных затрат НТИ

Данный пункт включает в себя стоимость материалов и услуг, используемых при разработке проекта.

Таблица 14. Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы
Печать образцов из сплава EOS Titanium Ti6Al4V	шт	4	672	2688
Печать образцов из сплава EOS Nickel Alloy HX	шт	4	672	2688
Печать образцов из сплава EOS Nickel Alloy IN718	шт	4	672	2688
Печать образцов из сплава EOS Aluminium AlSi10Mg	шт	4	384	1536
Печать образцов с	шт	4	672	2688

переменной структурой				
Изготовление испытательных образцов (колодок)	шт	20	300	6000
Изготовление колец из сплава 38Х2МЮА	шт	10	500	5000
Смазочная среда (масло промышленное И40)	мл	3000	270	270
Испытания на АТК ИК ТПУ	ч	30	46	1370
Исследование микроструктур образцов	ч	6	29	174
Итого:				25102

3.2. Расчет затрат на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ

В данном пункте учитываются затраты, связанные с приобретением специального оборудования (приборов, контрольно-измерительной аппаратуры, стендов, устройств и механизмов), необходимого для проведения работ по данному проекту, а также затраты, связанные с использованием уже имеющегося в организации оборудования.

Таблица 15. Расчет бюджета затрат на приобретение спецоборудования для научных работ

Наименование	Количество	Цена единицы оборудования	Стоимость
Универсальный переносной твердомер	1	78900	78900

NOVOTEST T-УДЗ			
Прибор для измерения профиля поверхности PosiTector SPG	1	67288	67288

При эксплуатации оборудования необходимо учитывать его износ и его обесценивание со временем. Этот учет происходит за счет амортизации, то есть процесса периодического переноса начальной стоимости основного средства или нематериального актива на производственные коммерческие или общехозяйственные расходы – в зависимости от того, как этот актив используется [17].

Для расчета амортизации в данной работе используется такой способ как линейный (равномерный), так как он наиболее универсальный и подходит для бухгалтерского и налогового учета. Формула линейного расчета амортизации выглядит следующим образом:

$$A_{\Gamma} = PC_{oc} \cdot N_a,$$

где A_{Γ} – амортизация за год, PC_{oc} – первоначальная стоимость основного средства, N_a – норма амортизационных отчислений.

В свою очередь N_a находится по формуле:

$$N_a = 1/n \cdot 100\%,$$

где n – срок полезного использования (СПИ), который можно узнать по паспорту объекта или по классификатору (Постановление Правительства РФ от 07.07.2016 №640). Для выбранного оборудования СПИ = 5 лет.

Расчет для твердомера NOVOTEST T-УДЗ:

$$N_a = 1/5 \cdot 100\% = 20\%$$

$$A_{\Gamma} = 78900 \cdot 20\% = 15780 \text{ руб.}$$

Таблица 16. Расчет амортизации для твердомера NOVOTEST T-УДЗ

Период	Амортизационные начисления за год	Амортизационные накопления за год	Остаточная стоимость
1	15780	15780	63120
2	15780	31560	47340
3	15780	47340	31560
4	15780	63120	15780
5	15780	78900	0

Расчет для профилометра PosiTector SPG

$$N_a = 1/5 \cdot 100\% = 20\%$$

$$A_r = 67288 \cdot 20\% = 13457,6 \text{ руб.}$$

Таблица 17. Расчет амортизации для профилометра PosiTector SPG

Период	Амортизационные начисления за год	Амортизационные накопления за год	Остаточная стоимость
1	13457,6	13457,6	53830,4
2	13457,6	26915,2	40372,8
3	13457,6	40372,8	26915,2
4	13457,6	53830,4	13457,6
5	13457,6	67288	0

В бюджет проекта будут внесены амортизационные накопления за год, соответственно, так как приборы будут эксплуатироваться первый год, то будут учтены амортизационные накопления за год для твердомера – 15780 руб. и амортизационные накопления за год для профилометра – 13457,6 руб.

В общей сложности затраты на специальное оборудование равны 29237,6 руб.

3.3. Основная заработная плата исполнителей проекта

Основная заработная плата руководителя рассчитывается на основании отраслевой оплаты труда. Отраслевая система оплаты труда в ТПУ предполагает следующий состав заработной платы:

1) оклад – определяется предприятием. В ТПУ оклады распределены в соответствии с занимаемыми должностями;

2) стимулирующие выплаты – устанавливаются руководителем подразделений за эффективный труд, выполнение дополнительных обязанностей и т.д.

3) иные выплаты; районный коэффициент.

Таблица 18 – Расчет основной заработной платы

Исполнитель	Тарифная заработная плата	Районный коэффициент	Месячный должностной оклад работника	Среднедневная заработная плата	Продолжительность работ	Заработная плата основная
Руководитель	26300	1,3	34190	1139	12	13668
Студент	1906	1,3	-	-	-	2477,8
Итого:						16145,8

3.4. Дополнительная заработная плата исполнителей проекта

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.).

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$З_{\text{допР}} = k_{\text{доп}} \cdot З_{\text{осн}},$$

где $k_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,15).

$$З_{\text{допР}} = 0,15 \cdot 13668 = 2050 \text{ рублей.}$$

3.5. Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

В данной статье расходов отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

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

где $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

В соответствии с положением ст.58.2 закона №212-ФЗ установлены следующие тарифы страховых взносов: ПФР - 0,22 (22%), ФСС РФ – 0,029 (2,9%), ФФОМС – 0,051 (5,1%).

Таблица 19 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата	Дополнительная заработная плата
Руководитель проекта	13668	2050
Студент-дипломник	2477,8	–
Коэффициент отчисления во внебюджетные фонды, %	27,1	27,1
Итого:	3704	555

3.6. Контрагентные расходы

Контрагентные расходы включают затраты, связанные с выполнением каких-либо работ сторонними организациями:

Работы и услуги производственного характера, выполняемые сторонними предприятиями и организациями. К работам и услугам производственного характера относятся:

- выполнение отдельных операций по изготовлению продукции, обработке сырья и материалов;
- контроль за соблюдением установленных регламентов технологических и производственных процессов;
- ремонт основных производственных средств;
- проверка и аттестация измерительных приборов и оборудования, другие работы (услуги) в области метрологии и прочее;
- транспортные услуги сторонних организаций по перевозкам грузов внутри организации (перемещение сырья, материалов, инструментов, деталей, заготовок, других видов грузов с базисного (центрального) склада в цеха (отделения) и доставка готовой продукции на склады хранения, до станции (порта, пристани) отправления;
- работы, выполняемые другими учреждениями, предприятиями и организациями (в т.ч. находящимися на самостоятельном балансе опытными предприятиями по контрагентским договорам на создание научно-технической продукции, головным исполнителем которых является данная научная организация);

Расчет величины этой группы расходов зависит от планируемого объема работ и определяется их условий договоров с контрагентами или субподрядчиками.

В таблице 16 представлены исполнители операций по изготовлению образцов (колодок) для испытания в автоматизированном триботехническом комплексе (АТК).

Таблица 20. Сторонние исполнители

№ п/п	Профессия	Количество деталей	Количество работников	Разряд рабочего
1	Оператор установки лазерного спекания		1	-
2	Токарь		1	2

Заказ на изготовление образцов выполнялся в НИ ТПУ и в фирме «АБ Универсал». Оклад оператора установки лазерного спекания был принят равным 20000 рублей.

На выполнение работ по изготовлению деталей сепаратора отводится 3 дня. Это время необходимое на подготовку оборудования, его наладки и на изготовление колодок и их доработку.

Основная зарплата токаря:

$$З_{\text{дн.1,2}} = \frac{20000 \cdot 11}{223} = 986 \text{ руб.}$$

$$З_{\text{осн.1}} = 986 \cdot 2 = 1972 \text{ руб.}$$

Основная зарплата оператора установки лазерного спекания:

$$З_{\text{осн.}} = 986 \cdot 3 = 2952 \text{ руб.}$$

Зарплата токаря:

$$З_{\text{зп1}} = 1972 + 1972 \cdot 0,12 = 2208 \text{ руб.}$$

Зарплата оператора установки лазерного спекания:

$$З_{\text{зп2}} = 2952 + 2952 \cdot 0,12 = 3306 \text{ руб.}$$

Отчисления для токаря:

$$З_{\text{внеб.1}} = 0,3 \cdot (1972 + 1972 \cdot 0,12) = 662 \text{ руб.}$$

Отчисления для оператора установки лазерного спекания:

$$З_{\text{внеб.2}} = 0,3 \cdot (2952 + 2952 \cdot 0,12) = 991 \text{ руб.}$$

Таблица 21. Оплата труда сторонних исполнителей

Исполнитель	Заработная плата, руб.
Оператор установки лазерного спекания	3306
Токарь	2208
Отчисления во внебюджетные фонды	1653
Итого:	7167

3.7. Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

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 22. Расчет бюджета затрат НТИ

Наименование статьи	Сумма, руб.
Материальные затраты	25102
Затраты на специальное оборудование	29237,6
Затраты по основной заработной плате исполнителей проекта	16145,8
Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей проекта	2050
Отчисления во внебюджетные фонды	4259
Контрагентные расходы	7167
Бюджет затрат НТИ	83961,4

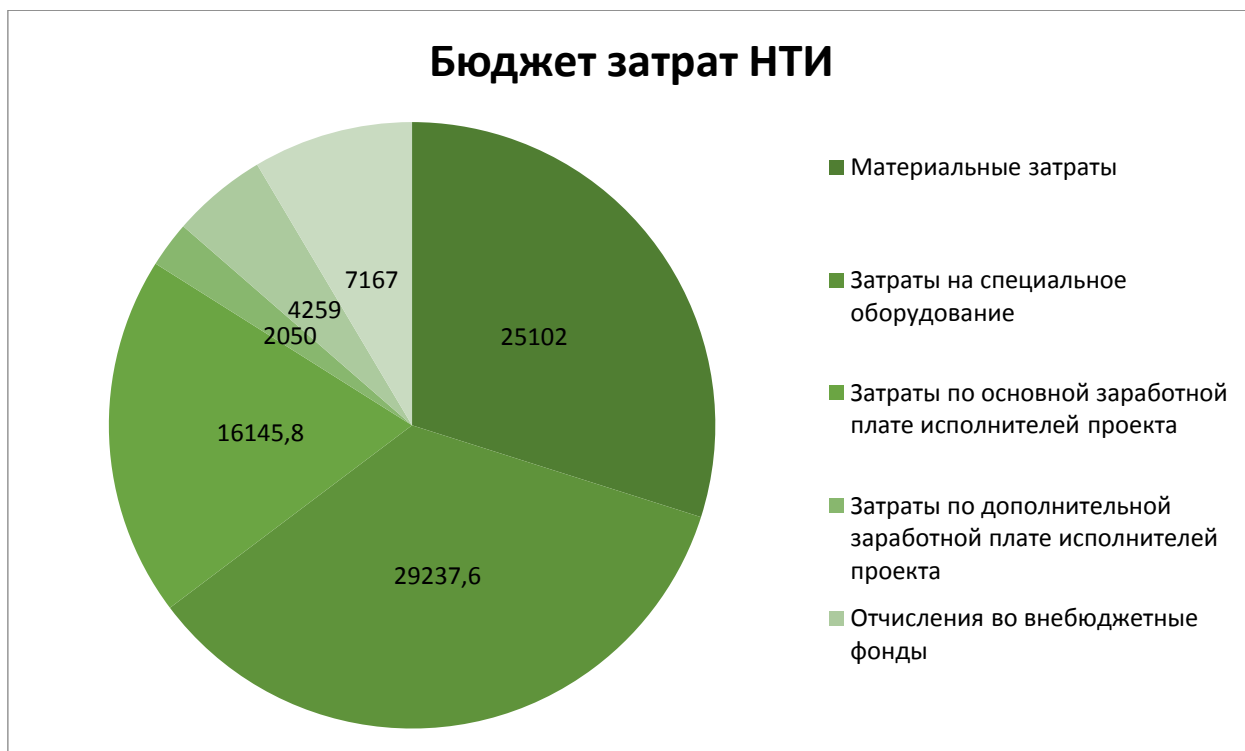


Рисунок 60. Диаграмма бюджета затрат НТИ

Исходя из проведенного расчета бюджета НТИ, представленного на диаграмме, видно, что большую часть расходов занимают материальные затраты и затраты на специальное оборудование.

6. Социальная ответственность

Целью данной магистерской диссертации является лабораторное исследование элементов пары трения «вал - колодки», изготовленных при помощи традиционных (субтрактивных) и аддитивных технологий с типовой и переменной структурой. Исследования включают в себя следующие этапы (Рисунок 1):

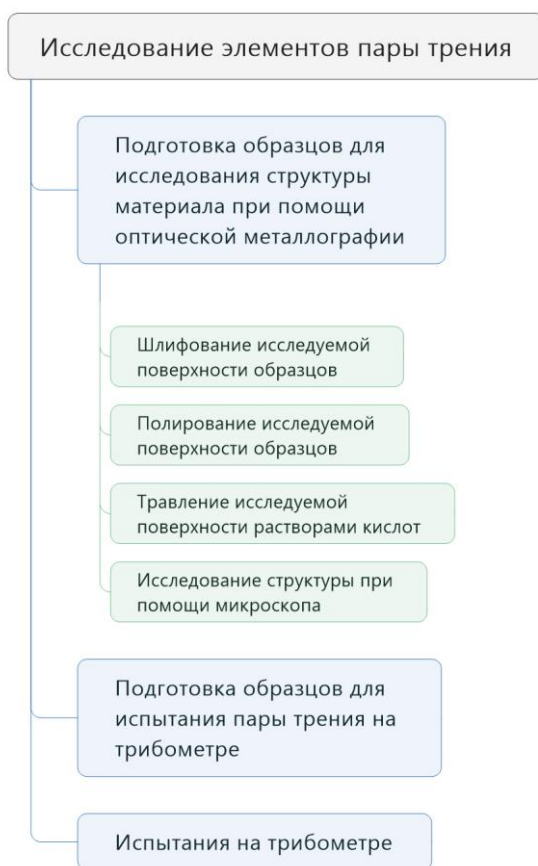


Рисунок 57. Этапы лабораторного исследования элементов пары трения «вал – колодки», изготовленных различными технологиями

В дальнейшем данные исследования позволят разработать методику формирования переменной объемной структуры элементов трибосопряжения для перераспределения физико-механических свойств поверхностных слоев пар трения и компенсации неравномерности износа при их эксплуатации.

Проблема увеличения срока службы трибосопряжений в целом и проблема неравномерности износа трибосопряжений в частности являются одними из наиболее актуальных в триботехнике. Подавляющее большинство узлов трения эксплуатируется в условиях динамического нагружения. В процессе изнашивания эксплуатируемая машина теряет свои первоначальные рабочие свойства (увеличение температуры узлов, вибраций, шумов), что приводит не только к ухудшению качества выпускаемой продукции, но и повышенной опасности эксплуатации машины.

Испытание аддитивно полученных образцов было проведено в учебных лабораториях Томского политехнического университета отделения материаловедения. Данные лаборатории соответствуют необходимым гигиеническим нормам, для выполнения работ было выдано необходимое для исследований оборудования и средства индивидуальной защиты.

6.1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

В данном подразделе рассматриваются факторы, позволяющие провести оценку условий труда непосредственно для данной исследовательской работы.

В соответствии с Трудовым кодексом РФ от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 01.04.2019) проведение лабораторных исследований по количеству затрачиваемого времени не должно превышать более восьми часов в день (пятидневная рабочая неделя). На рабочем месте должны обеспечиваться нормальные показатели микроклимата, освещенности рабочей зоны и т.д.

Подготовка образцов для металлографических исследований проводится в состоянии стоя у шлифовального и полировального станков, поэтому должны соблюдаться соответствующие нормы (СП 5160-89).

Должны соблюдаться эргономические параметры рабочего места при работе сидя (ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ), так как триботехнические испытания предполагается выполнять именно в этом положении. Необходимо учитывать и то, что при лабораторных испытаниях идет взаимодействия человека с управлением установки (ПК), соответственно должны учитываться гигиенические нормы (СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03) и эргономические требования (ГОСТ 22614-77).

6.2. Производственная безопасность

В данном подразделе будут рассмотрены вредные и опасные факторы, которые могут возникнуть при изготовлении исследуемых образцов, подготовке образцов к исследованиям структуры материалов, подготовке образцов к испытаниям на трибометре, испытании на трибометре.

Таблица 23. Вредные и опасные факторы при проведении лабораторных исследований

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ		Нормативные документы
	Исследование структуры материалов	Испытания на трение	
Вредные факторы			
1. Отклонения показателей микроклимата	+	+	СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений
2. Недостаточная освещенность рабочей зоны	+	+	СП 52.13330.2016. Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95*
3. Использование вредных веществ	+	+	ГОСТ 12.1.007-76 ССБТ. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности. ГОСТ 12.4.011-89 ССБТ. Средства защиты работающих. Общие требования и классификация.

			ГН 2.2.5.3532-18 Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны. ГН 2.2.5.2308 – 07. Ориентировочно безопасный уровень воздействия (ОБУВ) вредных веществ в воздухе рабочей зоны. ТР ТС 019/2011. О безопасности средств индивидуальной защиты. ГОСТ 3885-73. Реактивы и особо чистые вещества. Правила приемки, отбор проб, фасовка, упаковка, маркировка, транспортирование и хранение (с Изменениями N 1, 2, 3, 4, 5).
4. Подвижные режущие, колющие, обдирающие, части твердых объектов (шероховатость на поверхностях заготовок, режущий инструмент и т.д.)	+		ГОСТ 12.2.003-91 ССБТ. Оборудование производственное. Общие требования безопасности. ГОСТ 12.2.061-81 ССБТ. Оборудование производственное. Общие требования безопасности к рабочим местам. ГОСТ 12.4.011-89 ССБТ. Средства защиты работающих. Общие требования и классификация. ГОСТ Р 52588-2011 Инструмент абразивный. Требования безопасности (с поправками). ГОСТ 12.3.028-82* ССБТ. Процессы обработки абразивным и эльборовым инструментом. Требования безопасности. МУ 2.2.8.000-94 Методические указания по охране труда при осуществлении контроля загрязнения атмосферного воздуха для системы Госкомэкологии России
5. Повышенная температура поверхностей оборудования и материалов	+	+	ГОСТ 12.1.004-91 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожарная безопасность. Общие требования (с Изменением N 1). ПОТ Р М-005-97 Межотраслевые правила по охране труда при термической обработке металлов. ГОСТ 12.4.011-89 ССБТ. Средства защиты работающих. Общие требования и классификация.
6. Превышение уровня шума		+	ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности. СП 51.13330.2011. Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003.

			СН 2.2.4/2.1.8.562–96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки.
7. Повышенный уровень вибрации		+	СН 2.2.4/2.1.8.566–96. Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий.
Опасные факторы			
8. Повышенное значение напряжения в электрической цепи (незащищенные контакты)	+	+	ГОСТ 12.1.030-81 ССБТ. Электробезопасность. Защитное заземление, зануление. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов.
9. Пожаро- и взрывоопасность	+	+	ГОСТ 12.1.004-91 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожарная безопасность. Общие требования (с Изменением N 1).
10. Разрыв шлифовального круга	+		ГОСТ 12.3.028-82* ССБТ. Процессы обработки абразивным и эльборовым инструментом. Требования безопасности

6.3. Микроклимат

Для организации комфортной трудовой деятельности человека необходимо соблюдать следующие показатели микроклимата в производственных помещениях, согласно СанПиН 2.2.4.548–96:

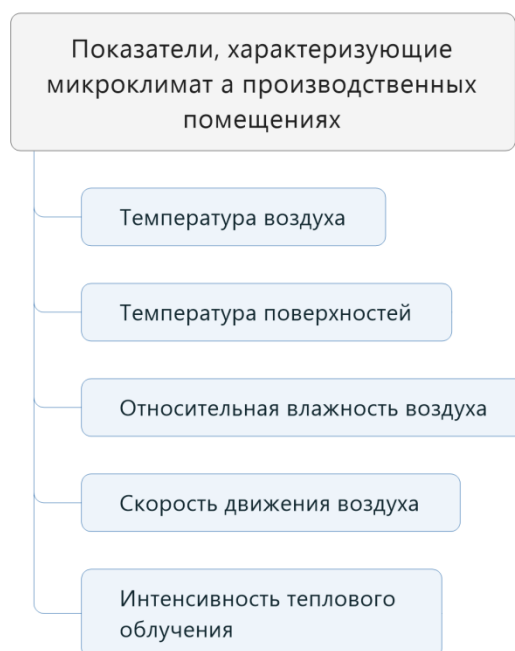


Рисунок 61. Показатели микроклимата в производственных помещениях

Также по СанПиН 2.2.4.548–96 определяются разные категории работы, которые характеризуются интенсивностью энергозатрат человеческого организма во время проведения работ. Для данного исследования была определена категория работ IIa (СанПиН 2.2.4.548–96, Приложение 1). Для выбранной категории определены следующие показатели микроклимата в производственных помещениях.

Таблица 24. Оптимальные и допустимые показатели микроклимата в производственных помещениях для категории работ IIa

Показатели	Оптимальная		Допустимая	
	Холодный период года	Теплый период года	Холодный период года	Теплый период года
Температура, С°	19 – 21	20 – 22	17 – 23	18 – 27
Относительная влажность, %	60 – 40	60 – 40	15 – 75	15 – 75
Температура поверхностей, С°	18 – 22	19 – 23	16 – 24	17 – 28
Скорость	0,2	0,2	0,3	0,4

движения воздуха, м/с				
--------------------------	--	--	--	--

Для комфортной работы в производственном помещении должны быть система естественной вентиляции или кондиционер, система центрального отопления для обеспечения оптимальных показателей микроклимата в холодный и теплый периоды года, использование СИЗ, регламент рабочего времени и т.д. При проведении лабораторных исследований показатели микроклимата в производственных помещениях были соблюдены согласно СанПиН 2.2.4.548–96.

6.4. Недостаточная освещенность рабочей зоны

Согласно СП 52.13330.2011 для лабораторных исследований соответствует I – III разряды зрительных работ, которые соответствуют таким характеристикам зрительной работы, как работы наивысшей точности, очень высокой точности и высокой точности. Для данных разрядов выбирается совмещенное освещение.

Аудитория имеет следующие параметры:

- Длина (В) – 6 м
- Ширина (А) – 5,5 м
- Высота (Н) – 3,5 м
- Уровень рабочей плоскости (d) – 1 м
- Свес светильника (m) – 0,5 м
- Коэффициенты отражения потолка (a) – 50 %; стен (b) – 30 %; пола (c) – 10 % – для производственных помещений с незначительными пылевыведениями
- Расстояние между светильниками ($h = H - d - m$) – 2 м
- Площадь помещения – 33 м²

Индекс помещения:

$$i = \frac{S}{(A+B) \cdot h} = \frac{33}{(6+5,5) \cdot 2} = 1,44$$

По индексу помещения и коэффициентам отражения находится коэффициент использования светового потока, для данного случая равный $x=45\%$. Количество светильников, применяемых в аудитории – $N=10$. Коэффициент минимальной освещенности был принят $z=1,1$. Нормируемая освещенность согласно СП 52.13330.2011 примерно равна $E_n=400$ лк, коэффициент запаса $k_z=1,6$.

Для требуемого освещения световой поток равен:

$$\Phi_{\text{л}} = \frac{E_n \cdot S \cdot k_z \cdot z}{N \cdot x} = \frac{400 \cdot 33 \cdot 1,6 \cdot 1,1}{10 \cdot 0,45} = 5163 \text{ лм}$$

Световой поток для одного светильника равен:

$$\Phi_{\text{л1}} = \frac{\Phi_{\text{л}}}{N} = \frac{5163}{10} = 516,3 \text{ лм}$$

Исходя из расчетов, была подобрана люминесцентная лампа типа OSRAM DULUX S 9W/840 G23 со значением светового потока, равного 600 лм.

6.5. Использование вредных веществ

Поступление вредных веществ в организм человека может протекать следующим образом (Рисунок 3). Чаще всего вредные вещества проникают через органы дыхания.

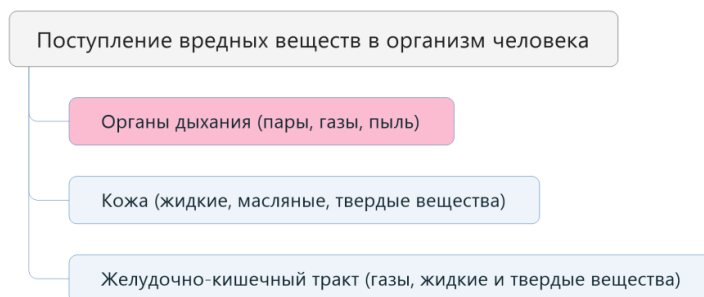


Рисунок 62. Пути поступления в организм человека вредных веществ

В данном случае в качестве вредных веществ, использующихся при работе, можно выделить порошковые материалы, из которых были напечатаны образцы. При подготовке образцов из порошковых материалов для исследования микроструктуры в процессе шлифования и полирования могут выделяться металлические частицы.

Вред несут различные химикаты, использующиеся при подготовке образцов при изучении их микроструктуры (различные травители). При данных исследованиях были использованы такие химические вещества, как спирт, растворы соляной и плавиковой кислот.

Для защиты от воздействия вредных веществ необходимо соблюдать гигиенические нормы по концентрации вредных веществ в воздухе рабочей зоны.

Таблица 25. Предельно-допустимые концентрации вредных веществ в воздухе рабочей зоны производственного помещения

Вещество	ПДК, мг/м³	Состояние	Класс опасности
Спирт	5	Пары	3
Фтористоводородная (плавиковая) кислота	0,5/0,1	Пары	1
Соляная кислота	5	Пары	3

Также к вредным веществам можно отнести различные смазки при проведении триботехнических испытаний. В качестве смазочных материалов могут использоваться в том числе и различные агрессивные среды.

При выполнении работ необходимо соблюдать гигиенические нормы по проветриванию помещений, в рабочей зоне должны присутствовать системы вытяжных вентиляций, работниками лаборатории должны использоваться СИЗ (респираторы, защитные очки, спец.одежда). При

шлифовании и полировании СИЗ должны иметь стойкость к истиранию, проколам, должны выдерживать разрывную нагрузку не менее 400 Н. Одежда рабочего должна быть чистой, аккуратно заправленной.

Работу с травителями необходимо проводить на специально оборудованном столе с защитным стеклом, системой вытяжной вентиляции. Травители в небольших количествах (до 2 – 3 л) нужно хранить в стеклянной таре с притертыми пробками в отдельных помещениях, оборудованных вентиляцией. Плавиковую кислоту нужно хранить в полиэтиленовых сосудах или парафинированных бутылках.

6.6. Подвижные режущие, колющие, обдирающие, части твердых объектов (шероховатость на поверхностях заготовок, режущий инструмент и т.д.)

В данном случае воздействие вредного фактора происходит при обработке образцов шлифовальном и полировальном оборудовании. При работе должны применяться следующие меры безопасности:

- использование рабочими СИЗ;
- ограждение абразивного инструмента и элементов его закрепления защитными кожухами;
- на оборудовании должны быть предусмотрены устройства для удаления абразивной пыли и отходов шлифования из зоны обработки;
- шлифовальные и заточные станки с горизонтальной осью вращения круга, предназначенные для обработки вручную и без подвода СОЖ, должны быть оснащены защитным экраном для глаз из бесосколочного материала толщиной не менее 3 мм;

- при невозможности использования стационарного защитного экрана должны применяться защитные очки или защитные козырьки, закрепленные на голове рабочего;

- на станках и устройствах, предназначенных для обточки шлифовальных кругов, должны быть установлены защитные приспособления, предохраняющие рабочего от разлетающихся частиц шлифовального круга и правящего инструмента.

6.7. Повышенная температура поверхностей оборудования и материалов

Данная проблема возникает в случае проведения шлифовально-полировальных операций, а также непосредственно в процессе испытания пары трения на триботехническом оборудовании. Необходимо применение следующих мер безопасности:

- использование естественной и искусственной вентиляции;
- использование материалов без вредного воздействия на организм работника;
- использование СИЗ при эксплуатации материалов с вредным воздействием;
- нормирование температур оборудования и оградительных устройств по техническому паспорту и СП 2.2.2.1327-03;
- соблюдение норм нагрева наружных поверхностей органов управления (из металла – 40°C, из материалов с низкой теплопроводностью – 50°C).

6.8. Превышение уровня шума

Источниками шума в рассматриваемой работе могут быть движение элементов электропередачи, процессы резания, работа гидравлических

систем, работа систем вентиляции, нефункциональные шумы при взаимном скольжении тел пары трения и т.д.

При выполнении шлифовально-полировальных работ необходимо обеспечивать следующие мероприятия по снижению уровня шума:

- устранение вибраций;
- предотвращение передачи вибраций;
- предотвращение турбулентности;
- предотвращение распространения звуковых волн
- использование СИЗ.

При проведении триботехнических испытаний система должна эксплуатироваться в соответствии с санитарными нормами СН2.2.4/2.1.8.562-96. Уровень шума в лабораторных условиях не должен превышать 80 дБА согласно ГОСТ 12.1.003–83.

Таблица 26. Предельно допустимые уровни звука и эквивалентные уровни звука на рабочих местах для трудовой деятельности разных категорий тяжести и напряженности

Категория напряженности трудового процесса	Категория тяжести трудового процесса				
	Легкая физическая нагрузка	Средняя физическая нагрузка	Тяжелый труд 1 степени	Тяжелый труд 2 степени	Тяжелый труд 3 степени
Легкая степень	80	80	75	75	75

Таблица 27. Предельно допустимые уровни звукового давления, уровни звука и эквивалентные уровни звука для основных наиболее типичных видов трудовой деятельности и рабочих мест

Вид трудовой деятельности, рабочее место	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц						
	31,5	63	125	250	500	1000	2000

Аудитория в учебном заведении	79	63	52	45	39	35	32
-------------------------------	----	----	----	----	----	----	----

При превышении уровня шума предпринимать следующие действия:

- применение СИЗ (наушники, беруши);
- отдых в обеденный перерыв в помещении с нормальным уровнем шума;
- проверка слуха у врача-отоларинголога раз в год или полгода (при очень высоком уровне шума).

6.9. Повышенный уровень вибрации

При эксплуатации различного оборудования при повышенном уровне вибрации возникают различного рода неполадки. Несбалансированность деталей может со временем оказать влияние на качество производимой машиной продукции, а в дальнейшем привести к поломке машины. Также высокий уровень вибрации очень негативно влияет на здоровье человека.

По способу передачи на человека выделяют локальную вибрацию, передающуюся через руки, и общую вибрацию, передающуюся через опорные поверхности на тело сидящего или стоящего человека. Первый тип передачи вибрации в данной работе характерен при шлифовании и полировании образцов вручную. Второй тип характерен как при подготовке образцов для металлографического исследования, так и при испытании образцов на трение.

В соответствии с СН 2.2.4/2.1.8.566–96 при лабораторных исследованиях присутствующие вибрации имеют категорию 3 типа б (технологическая вибрация на рабочих местах в помещениях лабораторий, конструкторских бюро и т.д.). Можно выделить следующие предельно допустимые значения вибрации:

Таблица 28. Предельно допустимые значения производственной локальной
вибрации

Среднегеометрические частоты октавных полос, Гц	ПДУ виброускорения		ПДУ виброскорости	
	м/с ²	дБ	м/с * 10 ⁻²	дБ
8	1,4	123	2,8	115
16	1,4	123	1,4	109
31,5	2,8	129	1,4	109
63	5,6	135	1,4	109
125	11,0	141	1,4	109
250	22,0	147	1,4	109
500	45,0	153	1,4	109
1000	89,0	159	1,4	109

Снижение воздействия вибрации на организм человека возможно следующим образом:

- применения виброизоляции вибрирующих машин относительно основания;
- использования дистанционного управления в технологических процессах;
- рекомендуются два регламентированных перерыва (для активного отдыха, проведения производственной гимнастики по специальному комплексу гидропроцедур): 20мин. – через 1 – 2ч. после начала смены и 30мин – через 2ч. после обеденного перерыва;
- производственные операции должны распределяться между работниками так, чтобы продолжительность непрерывного воздействия вибрации, включая микропаузы, не превышала 15 – 20мин.

6.10. Повышенное значение напряжения в электрической цепи (незащищенные контакты)

Во время проведения лабораторных исследований есть опасность получения травмы электрическим током. Допустимые значения напряжений и тока, которые может пропускать человек при частоте 50 Гц, равные 2 В и 0,3 А соответственно по ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ.

Таблица 29. Предельно-допустимые значения тока и напряжения в аварийной ситуации

Род тока	Нормируемая величина	Предельно-допустимые значения, не более, при воздействии t,с									
		0,08	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Переменный, 50 Гц	Напряжение, В	550	340	160	135	120	105	95	85	75	70
	Ток, А	650	400	190	160	140	125	100	90	75	65

Для предотвращения поражения электрическим током людей при косвенном прикосновении или при повреждении изоляции применяются следующие меры:

- защитное заземление;
- автоматическое отключение питания;
- уравнивание потенциалов;
- выравнивание потенциалов;
- двойная или усиленная изоляция;
- сверхнизкое (малое) напряжение;
- защитное электрическое разделение цепей;
- изолирующие (непроводящие) помещения, зоны, площадки.

6.11. Пожаро- и взрывоопасность

При проведении операций шлифования и полирования данный фактор может проявиться в случайном возгорании пыли при шлифовании сплавов с воспламеняющимися компонентами, например, сплавы на основе магния [20]. Также возможно возгорание текстильной пыли при полировании. Чтобы

не допустить этого, необходимо иметь систему вытяжной вентиляции, содержать рабочее место и систему вентиляции в чистоте, использовать СИЗ, применять устройства защиты производственного оборудования с горючими веществами от повреждений и аварий (отключающие, отсекающие и др. устройства).

При проведении триботехнических испытаний пары трения в камере трения могут присутствовать различные смазочные среды, в том числе и легковоспламеняющиеся. Внутри камеры трения образуются высокие температуры при нагреве смазочной среды и элементов пары трения. Для предотвращения опасной ситуации необходимо использовать специальные термоупорные стекла для изготовления смотрового окна камеры трения, системы циркуляции смазочной среды для ее охлаждения (как в реальных механизмах), устанавливать датчики, которые будут сигнализировать о перегреве системы, предусмотреть корректировку параметров испытания в ПО стенда, использовать СИЗ.

6.12. Разрыв шлифовального круга

Разрыв круга может причинить очень серьезную (в том числе и смертельную) травму персоналу, находящемуся поблизости, а также нанести существенный ущерб производственному помещению. Для предотвращения опасной ситуации необходимо применения следующих мер безопасности [20]:

- соблюдение правил транспортировки и хранения, так как на качество шлифовального круга может повлиять возникновение трещин в процессе транспортировки, а также температура и влажность помещения, где хранятся круги (воздействие на связующее вещество, нарушение балансировки и т.д.);
- проверка круга на трещины;

- проведение испытаний перед работой;
- балансировка круга;
- правильный монтаж шлифовального круга;
- эксплуатация шлифовального круга при скоростях соответствующих тем, что были заданы в документации производителем;
- использование неподвижно закрепленных опор для заготовки;
- установка прочных защитных ограждений.

7. Экологическая безопасность

При проведении лабораторных испытаний воздействие на окружающую среду оказывают такие источники, как непосредственно испытываемые наноразмерные материалы, изготовленные с помощью аддитивных технологий, вредные вещества (травители, смазочные материалы) и их утилизация.

В процессе подготовки и испытаний образцов из наноразмерных материалов частицы материала отделяются, всплывают и остаются в воздухе, перемещаются воздушными потоками, в том числе и за пределы промышленных помещений, загрязняя атмосферу, частицы материала осаживаются, загрязняя литосферу, проникают в наземные и подземные воды, загрязняя гидросферу. Помимо этого частицы испытываемых материалов выносятся за пределы лаборатории работником на одежде и на коже.

В данных лабораторных испытаниях доля наноразмерного материала, загрязняющего окружающую среду, не превышает допустимых норм (предельно допустимые нормы концентрации регламентируются, согласно ГН 2.2.5.3532–18). Однако в целях снижения вредного воздействия данного источника загрязнения на окружающую среду необходимо рационально использовать материалы, электроэнергию и по возможности заменить

вредные технологические процессы на более экологичные. Например, утилизировать оставшиеся после подготовки образцов материалы посредством их повторного использования, переплавки, применять специальные системы вентиляции.

В процессе испытания на трение в смазочной среде также остаются частички испытуемого материала. Для более рационального использования сырья возможна переработка отработанных смазочных материалов, отделение частиц испытуемого материала от смазки, дальнейшая их переработка и повторное использование.

Что касается вредных веществ, то их негативное влияние на окружающую среду может проявляться в выделении в атмосферу вредных паров, а также сливе вредных веществ в канализацию, захоронении или сжигании с последующим отравлением гидросферы и литосферы.

Для предотвращения вредного воздействия данного фактора необходимо также проводить переработку используемых химических веществ, регенерацию как реагентов для травления, так и смазочных материалов для их повторного использования.

8. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Проводимые лабораторные испытания элементов пары трения «вал – колодка» могут инициировать следующие ЧС.

1. Возникновение пожара при подготовке образцов для металлографических исследований и проведении триботехнических испытаний. Данная ситуация может возникнуть при сильном нагреве и перегрузке оборудования, его неисправности, возгорания легковоспламеняющихся веществ (СОЖ, частиц испытываемых материалов) при эксплуатации оборудования, при неправильном хранении химических

веществ, а также при неисправности проводки оборудования или производственного помещения, поджоге, возникновении стихийных бедствий и т.д.

Организационные мероприятия по предотвращению ЧС:

- разработка правил, инструктажей о пожарной безопасности и их выполнение;
- организация инструктирования, обучение персонала;
- осуществление контроля за соблюдением установленного противопожарного режима персоналом;
- организация добровольных пожарных дружин;
- организация ежедневных проверок противопожарной безопасности после работы;
- разработка и утверждение плана эвакуации и порядка оповещения людей на случай возникновения пожара;
- организация соблюдения надежного противопожарного надзора за объектами;
- организация проверки пожарно-технического инвентаря.

Технические мероприятия по предотвращению ЧС:

- применение средства защитного зануления;
- применение искробезопасного оборудования;
- применение средств молниезащиты;
- наличие и исправность средств пожаротушения, дымовыведения, систем пожарных извещателей и систем автоматической пожарной сигнализации;
- применение средств коллективной и индивидуальной защиты;

- соблюдение техники безопасности при хранении и эксплуатации химических веществ.

2. Электрическое поражение током персонала. Возникновение данной ЧС возможно при плохой изоляции проводов эксплуатируемого оборудования, нарушения электропроводки производственного помещения, а также во время стихийных бедствий.

Организационные мероприятия по предотвращению ЧС:

- правильный подбор персонала;
- обучение персонала правилам безопасности при обслуживании электроустановок;
- контроль за правильностью устройства электропроводок и установкой электрооборудования в соответствии с ПУЭ;
- проведение осмотров, проверок и испытаний оборудования;
- контроль надежности СИЗ.

Технические мероприятия по предотвращению ЧС:

- применение устройств (предохранителей, отключающих реле и т. п.) защиты электроустановок и сетей от перегрузок, а также токов коротких замыканий;
- защита персонала от прикосновения к токоведущим частям оборудования (использование ограждений, размещение оборудования в отдельных зданиях, изоляция токоведущих частей оборудования);
- защита от поражения электрическим током при переходе напряжения на металлические корпуса установок;
- применение защитного заземления;
- зануление электроустановок в сетях с глухо-заземленной нейтралью;
- применение защитного отключения;

- выравнивание потенциалов оборудования и земли в местах нахождения людей;
- изоляция электроустановок и электродвигателей от корпусов рабочих машин;
- применение диэлектрических настилов и изолирующих площадок;
- применение СИЗ.

Заключение

В ходе работы над магистерской диссертацией была рассмотрена проблема износа элементов узлов трения в целом и неравномерности износа в частности. Были проанализированы те аспекты, которые влияют на износ и его интенсивность.

Также было рассмотрено аддитивное производство как способ устранения неравномерности износа элементов пары трения. Был произведен обзор видов аддитивных технологий, рассматривались принципы построения деталей, параметры, влияющие на качество изготавливаемых деталей при помощи аддитивных технологий.

Во время работы над магистерской диссертацией были исследованы и проанализированы микроструктуры перечня аддитивно полученных материалов. Также был исследован ранее испытанный на АТК образец (колодка) из материала EOS Aluminium AlSi10Mg, изготовленный при помощи SLS-печати. Исследование показало наличие неравномерности износа элемента пары трения.

Было проведено математическое моделирование исследуемой пары трения в программных комплексах ANSYS и частично в Siemens NX, результаты которого в целом соответствуют практическим результатам, которые были получены ранее. Однако в дальнейшем требуется более точная проработка математической модели.

Будут испытаны пары трения, где контртело изготовлено из материала Сталь 38Х2МЮА, а колодки были изготовлены из материалов EOS Titanium Ti6Al4V и ВТ6 для сравнения процесса изнашивания колодок, изготовленных при помощи АТ и традиционных технологий.

Дальнейшим вектором развития данной работы станет расширение спектра исследуемых материалов, а также изготовления и испытания образцов с измененной структурой, концепты которых были представлены ранее.

Список публикаций

1. Писаренко М.И., Буханченко С.Е. Исследование триботехнических характеристик аддитивно полученных конструкционных материалов при динамических режимах нагружения узлов трения // Машиноведение и инновации. Конференция молодых ученых и студентов (МИКМУС-2017) материалы конференции, 2018, с. 164-168

Список используемых источников

1. Денисова Н.Е., Шорин В.А., Гонтарь И.Н., Волчихина Н.И., Шорина Н.С. Триботехническое материаловедение и триботехнология: учеб. пособие/Под общей редакцией Н.Е.Денисовой. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2006.
2. ГОСТ Р 57558-2017/ISO/ASTM 52900:2015 Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 1. Термины и определения.
3. Основы трибологии (трение, износ, смазка): Учебник для технических вузов. 2-е изд. переработ. и доп. / А.В. Чичинадзе, Э.Д. Браун, Н.А. Буше и др.; Под общ. ред. А.В. Чичинадзе.
4. Трение, изнашивание и смазка: Справочник. В 2-х кн./Под ред. И.В. Крагельского, В.В. Алисина. – М.: Машиностроение, 1978 – Кн.1. 1978. 400 с.
5. Ковалев Д.С., Коваленко П.А., Оборин Л.А. Перспективы внедрения аддитивных технологий в промышленность // Актуальные проблемы авиации и космонавтики, Том 1, 2017.
6. Краснов А.А., Смоленцев Е.В. Аддитивное и субтрактивное производство // Международный научный журнал «Инновационная наука» №12-2/2016.
7. Спрукуль В.О., Говорина О.В. Внедрение аддитивных технологий // Актуальные проблемы авиации и космонавтики, Том 3, 2017.
8. Зленко М.А., Нагайцев М.В., Довбыш В.М. Аддитивные технологии в машиностроении // Пособие для инженеров, ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», Москва, 2015.

9. М. Д. Кривилев, Е. В. Харанжевский, Г. А. Гордеев, В. Е. Анкудинов, “Управление лазерным спеканием металлических порошковых смесей”, *УБС*, **31** (2010), 299–322.

10. Ю. А. Бурачевский, И. Ю. Бакеев, А. В. Миллер, Р. Г. Новгородов. Система управления и отображения информации электронно-лучевой установки // Доклады ТУСУРа, том 20, № 2, 2017.

11. И. Ю. Бакеев, Ю. А. Бурачевский, В. А. Бурдовицин, И. В. Осипов, А. Г. Рау, Г. В. Семенов. Установка электронно-лучевого выращивания металлических изделий // Доклады ТУСУРа, том 20, № 3, 2017.

12. Овчинников А. В., Олышанецкий В. Е., Джуган А. А. Применение несферических гидрированных и дегидрированных порошков титана для получения изделий в аддитивных технологиях // Вестник двигателестроения №1, 2015.

13. Олышанецкий В. Е. Возможность использования несферических титановых порошков для аддитивных технологий / В. Е. Олышанецкий, А. В. Овчинников, А. А. Джуган // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2016. – № 3. – С. 82 – 87.

14. Неруш С. В. Разработка и применение отечественных металлических порошков жаропрочных сплавов на никелевой основе для селективного лазерного сплавления // Презентация, 2015.

15. Попович А. А., Суфияров В. Ш., Борисов Е. В., Полозов И. А., Масайло Д. В., Григорьев А. В. АНИЗОТРОПИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ИЗДЕЛИЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ. Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2016; (3) :4-11.

- 16.Рынок 3D печати в России и мире (Аддитивное производство, АП/Additive Manufacturing, AM). [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://json.tv/ict_telecom_analytics_view/rynok-3d-pechati-v-rossii-i-mire-additivnoe-proizvodstvo-ap-additive-manufacturing-am-2018-g-20190117060056 – 08.05.2019.
- 17.Основные понятия математического моделирования. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://sernam.ru/book_mm.php?id=3 – 13.05.2019.
- 18.Боровков А. И., Зубов А. В. Конечно-элементное решение стационарных и нестационарных нелинейных задач теплопроводности гетерогенных анизотропных сред. – М.: ВИНТИ, N897-B94, 1994. – 44 с.
- 19.Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А. ANSYS в руках инженера: практическое руководство / Предисл. А.С. Шадского. Изд. стереотип. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2015. – 272 с.
- 20.Писаренко М.И., Буханченко С.Е. Исследование триботехнических характеристик аддитивно полученных конструкционных материалов при динамических режимах нагружения узлов трения // Машиноведение и инновации. Конференция молодых ученых и студентов (МИКМУС-2017) материалы конференции, 2018, с. 164-168.
- 21.Шлифование и полирование. Адаптированный текст третьего издания Энциклопедии безопасности и Гигиены труда. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://base.safework.ru/iloenc?print&nd=857200687&spack=110LogLength%3D0%26LogNumDoc%3D857200805%26listid%3D010000000100%26listpos%3D15%26lsz%3D43%26nd%3D857200805%26nh%3D1%26> – 25.04.2019.

Приложение А
(справочное)

Die Optimierung der Struktur von Strukturwerkstoffen zur Sicherstellung des kontrollierten Spannungs- und Deformationszustand von Elementen von Reibpaaren technischer Systeme

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8НМ71	Писаренко Маргарита Игоревна		

Консультант школы отделения (НОЦ) ОМ ИШНПТ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ	Буханченко С.Е.	к.т.н.		

Консультант – лингвист отделения (НОЦ) школы ОИЯ ШБИП:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ОИЯ	Щеголихина Юлия Викторовна	к.ф.н.		

Additive Fertigung als die Lösung des Problems des ungleichmäßigen Verschleißes von Reibpaaren

Tribologie/Verschleiß

Tribologie ist die Wissenschaft und die Anwendung der Prinzipien von Reibung, Verschleiß und Schmierung. Tribologie beinhaltet [1]:

- Reibung – der Widerstand zwischen zwei bewegten Körpern;
- Verschleiß – der Materialverlust durch Reibung;
- Schmierung – die Anwendung einer Flüssigkeit zur Minimierung von Reibung und Verschleiß.

Das sind keine Werkstoffeigenschaften. Sie sind Reaktionen eines spezifischen tribologischen Systems, das sich üblicherweise aus einem Lager, einer Welle und einem Schmierstoff zusammensetzt. Sie werden daher von vielen verschiedenen Faktoren beeinflusst. Das tribologische Subsystem in Abbildung 1 bietet einen Überblick über die häufigsten Faktoren, die sich auf Reibungs- und Verschleißwerte auswirken [2, 3, 4]:

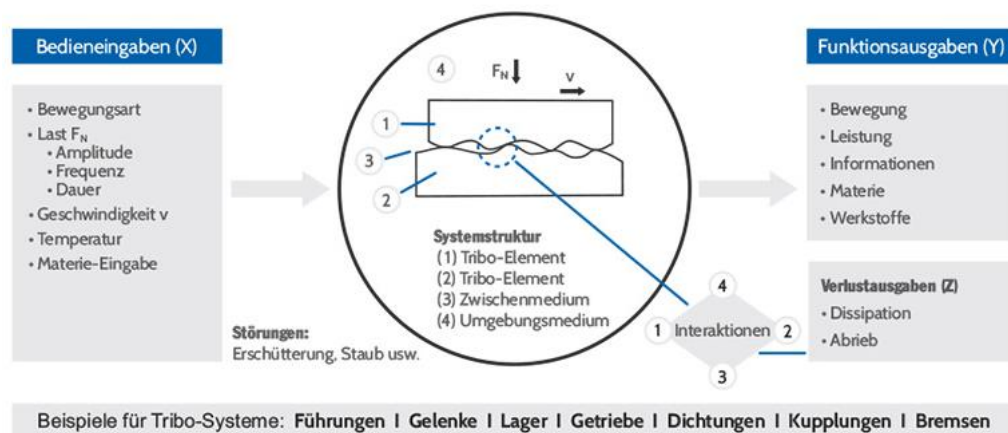


Abb.1. Funktion von Tribo-Systemen [5]

Grundkörper und Gegenkörper (Tribo-Elemente)		Grenzflächenmedium		Umgebungsmedium
Werkstoff- eigenschaften:	Geometrische Eigenschaften:	Aggregatzustand flüssig und gasförmig:	Aggregatzustand fest:	Aggregatzustand flüssig und gasförmig:
Härte Härteverhältnis Verformung Verhalten Adhäsionsneigung Zusammensetzung Werkstoffstruktur Oberflächenenergie und so weiter	Topographie Oberflächen- morphologie Traganteil Form Geometrische Abmessungen und so weiter	Typ (Schmierstoff, Gase, ...) Menge Zusammensetzung Feuchtigkeit Wassergehalt Viskosität Polarität Kompatibilität Molekularstruktur Verbrennungspunkt und so weiter	Typ (abrasive Teilchen, Verschleißpartikel, Festschmierstoff usw.) Zusammensetzung Materialaufbau Verformungsverhalten Härte Dispersion und so weiter	Typ (Schmierstoff, Gase, ...) Menge Zusammensetzung Feuchtigkeit Wassergehalt Viskosität Polarität Kompatibilität Molekularstruktur Verbrennungspunkt und so weiter

Abb.2. Struktur von Tribo-Systemen [5]

Dieses tribologische System umfasst das Beanspruchungskollektiv, die Systemstruktur sowie die Funktions- und Verlustausgaben. Das Beanspruchungskollektiv fasst physische und technische Belastungsparameter zusammen, u. a. Last, Gleitgeschwindigkeit und -dauer sowie die Bewegungs- und Temperaturbedingungen, die die Systemstruktur belasten. Die Systemstruktur hängt von den Eigenschaftsprofilen der Hauptbestandteile ab, zu denen Basis, Gegenkörper, Umgebungs- und Zwischenmedium zählen [5].

Belastung	Bewegungsart	Temperatur
Typ: Statisch Dynamisch Belastungswert: Hoch Niedrig Zeitabhängigkeit: Konstant Periodisch Unterbrechend Pulsierende Belastung Stoßbelastung	Typ: Gleitend Rollend Bohrrreibung Belastungswert: Hoch Niedrig Zeitabhängigkeit: Kontinuierlich Oszillierend Alternierend Periodisch Unterbrechend	Typ: Umgebungs- temperatur Reibungsbedingte Temperatur Externe Erwärmung Externe Kühlung Temperaturgradienten Blitztemperatur Zeitabhängigkeit: Konstant Periodisch Unregelmäßig Unterbrechend

Abb.3. Belastungskollektiv von Tribo-Systemen [5]

Verschleiß ist der fortschreitende Materialverlust aus der Oberfläche eines festen Körpers (Grundkörper), hervorgerufen durch tribologische Beanspruchungen, d.h. Kontakt- und Relativbewegung eines festen, flüssigen oder gasförmigen Gegenkörpers [1].

Reibungsmechanismen	Verschleißmechanismen	Verschleißerscheinungsformen
I. Adhäsion und Scheren adhäsiver Bindungen	I. Adhäsion	Z.B.: Fresser, Löcher, Kuppen, Schuppen, Materialübertrag
II. Plastische Deformation	II. Abrasion	Kratzer, Riefen, Mulden, Wellen
III. Furchung	III. Oberflächenzerrüttung	Risse, Grübchen
IV. Elastische Hysterese und Dämpfung	IV. Tribochemische Reaktion	Reaktionsprodukte (Partikel, Schichten)

Abb.4. Reibungsmechanismen [6] und typische Verschleißerscheinungsformen [9].

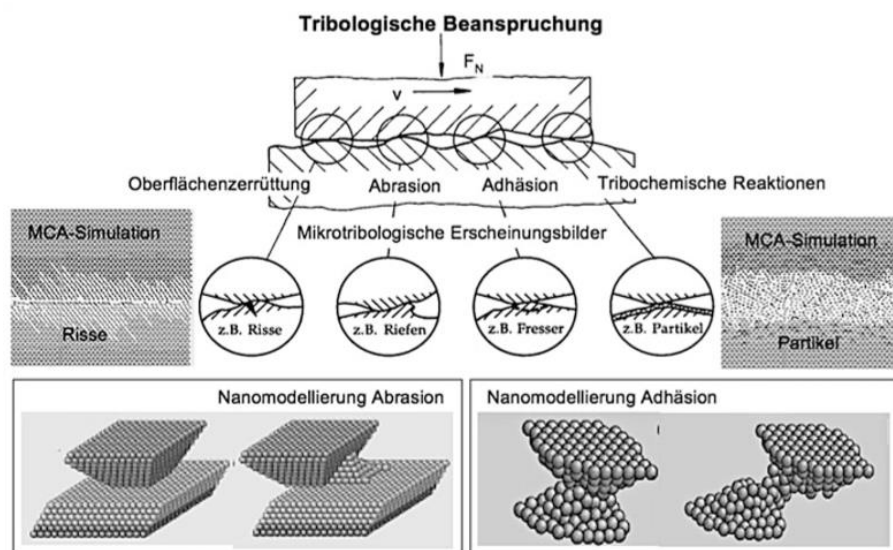


Abb.5. Verschleißmechanismen [2]

In der Technik wird das Verschleißgebiet in Abhängigkeit von der Struktur destribologischen Systems und der Kinematik der tribologischen Beanspruchung nach Verschleißarten gegliedert [2].



Abb.6. Einflussgrößen

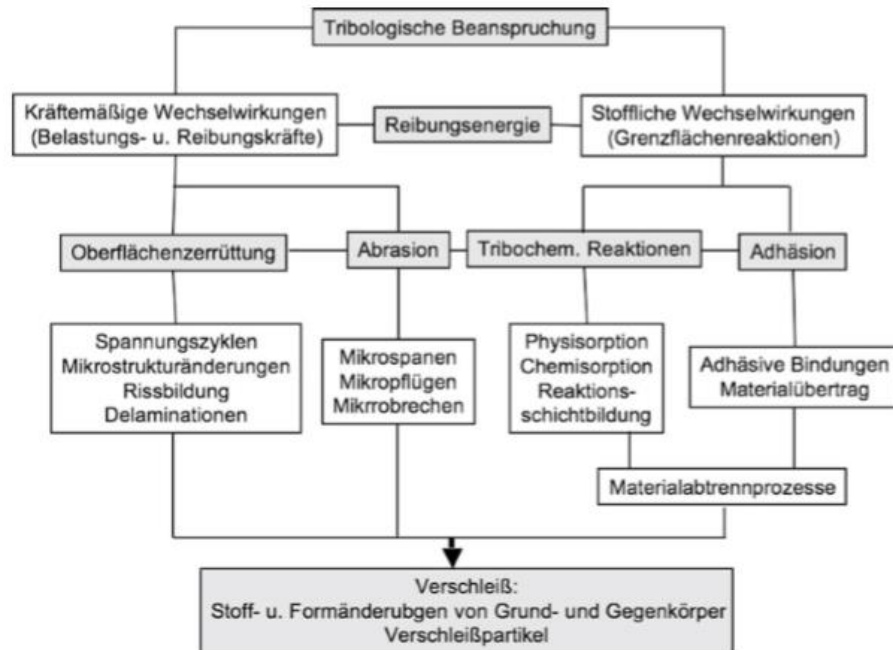


Abb.7. Verschleißmechanismen: Übersicht über Stoff- und Formänderungsprozesse unter tribologischer Beanspruchung

Die messtechnische oder zahlenmäßige Kennzeichnung des Verschleißes und der Resultate von Verschleißvorgängen erfolgt im wesentlichen durch die folgenden zwei Begriffsarten [2]:

- Verschleißmessgrößen kennzeichnen durch Maßzahlen die Änderung der Gestalt oder der Masse eines Körpers durch Verschleiß.
- Verschleißerscheinungsformen beschreiben die sich durch Verschleiß ergebenden Veränderungen der Oberflächen tribologisch beanspruchter Werkstoffe oder Bauteile (chemische Zusammensetzung, Mikrostruktur usw.) sowie die Art und Form von anfallenden Verschleißpartikeln.

Maßzahlen für den Verschleiß können als Verschleißbeträge in unterschiedlichen messtechnischen Dimensionen angegeben werden, wie anhand des vereinfachten Beispiels von Abb. 5 illustriert wird. Reziprokwerte der Verschleißbeträge heißen „Verschleißwiderstände“ [2].

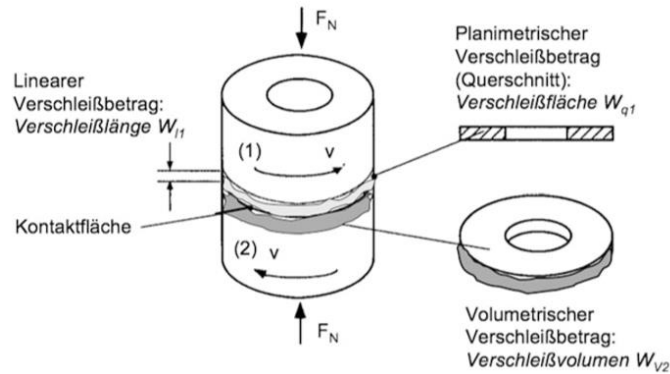


Abb.8. Verschleiß-Messgrößen, illustriert für das Beispiel eines tribologischen Systems bestehend aus zwei rotierenden Zylindern (1), (2); F_N Kraft normal zur Kontaktfläche, v Gleitgeschwindigkeit [2]

Neben diesen „direkten“ Verschleißmessgrößen werden noch die folgenden „indirekten“ Verschleißmessgrößen unterschieden, bei denen der Verschleiß in Relation zu einer Bezugsgröße gesetzt wird und die auch als „Verschleißraten“ bezeichnet werden [2]:

- Verschleißgeschwindigkeit, mit der Zeit (d.h. der effektiven Beanspruchungsdauer während des Verschleißvorgangs) als Bezugsgröße;
- Verschleiß-Weg-Verhältnis oder Verschleißintensität, mit dem Weg als Bezugsgröße;
- Verschleiß-Durchsatz-Verhältnis, mit dem Durchsatz als Bezugsgröße.

Wegen der Systembezogenheit des Verschleißes müssen zur eindeutigen Kennzeichnung des Ergebnisses eines Verschleißvorganges die Verschleißdaten von beiden Kontaktpartnern und ggf. auch die Verschleißdaten des gesamten Systems jeweils einzeln angegeben werden. Somit sind zu unterscheiden [2]:

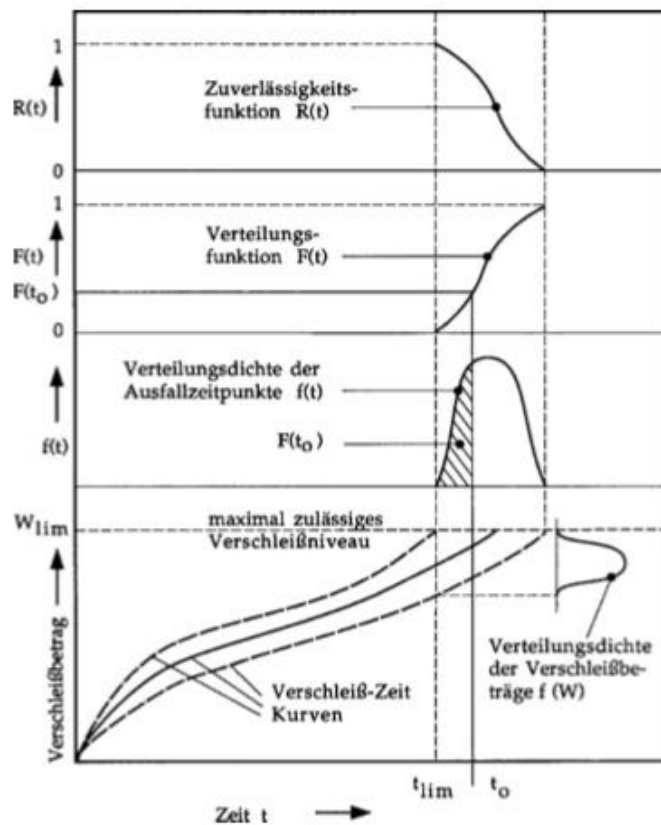
- Komponentenverschleiß, d.h. die einzelnen Verschleißmessgrößen von Grundkörper und Gegenkörper;
- Systemverschleiß, d.h. die Summe der Verschleißmessgrößen von Grundkörper + Gegenkörper.

Infolge der Komplexität des Verschleißes ist es im allgemeinen nichtmöglich, Verschleißkenngrößen theoretisch zu berechnen; sie müssen vielmehr mit geeigneten Mess- und Prüftechniken experimentell bestimmt und in aussagefähiger Form dargestellt werden.

Der Verschleiß von Werkstoffen führt zu Materialschädigungen und kann in tribotechnischen Systemen infolge verschleißbedingter Stoff- und Formänderungen von Bauteilen zu einem Ausfall des gesamten technischen Systems führen, wenn gewisse Bauteil- oder Funktionstoleranzen überschritten werden. Damit ist in technischen Anwendungen der Verschleiß ein wichtiger Einflussfaktor auf die Zuverlässigkeit technischer Systeme [8].

Theoretische Methoden zur Zuverlässigkeitsanalyse In der Technik ist die Zuverlässigkeit die Eigenschaft einer Betrachtungseinheit, funktionstüchtig zu bleiben. Sie wird allgemein definiert als die Wahrscheinlichkeit, dass ein technisches Bauteil oder System seine bestimmungsgemäße Funktion für eine bestimmte Zeitperiode unter den gegebenen Funktions- und Beanspruchungsbedingungen ausfallfrei, d.h. ohne Versagen, ausführt [2].

Zur Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Verschleiß und Zuverlässigkeit soll die typische Zeitabhängigkeit des Verschleißes betrachtet werden. Der typische Zeitablauf eines Verschleißvorganges ist häufig durch drei charakteristische Phasen gekennzeichnet.



I. Einlaufverschleiß mit im Allgemeinen abnehmender Verschleißgeschwindigkeit

II. Verschleiß im Beharrungszustand mit im Allgemeinen konstanter Verschleißgeschwindigkeit

III. Progressiver Verschleißverlauf mit im Allgemeinen zunehmender Verschleißgeschwindigkeit.

Abb.9. Verschleiß-Zeit-Kurven und Kennzeichnung der Zusammenhänge zwischen Verschleiß und Zuverlässigkeit durch die Zuverlässigkeitsfunktion $R.t/$, die Verteilungsfunktion $F.t/$ und die Verteilungsdichte der Ausfallzeitpunkte $f(t)$ [2]

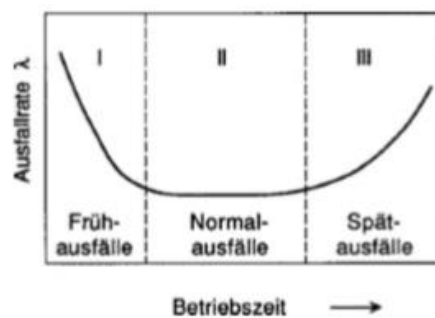


Abb.10. Ausfallrate in Abhängigkeit von der Betriebszeit

Keine der oben genannten Verteilungsfunktionen besitzt diese „Badewannen“-Charakteristik, jedoch können ausreichende Näherungen durch Auswahl einzelner Versagensdichtefunktionen für die Teilbereiche der drei Regime gewählt werden. Das Regime (I.) beschreibt das Gebiet der „Frühausfälle“. Dieses Gebiet mit abnehmender Versagensrate kann zum Beispiel bei tribologischen Systemen durch ein erfolgreiches Einlaufverhalten beeinflusst werden. Das Gebiet (II.) mit konstanter Versagensrate ist im allgemeinen der Bereich der üblichen Betriebsbedingungen. Ein Versagen tritt hier im allgemeinen als eine Konsequenz statistisch voneinander unabhängiger Faktoren auf. Das Regime (III.) mit zeitlich zunehmender Verschleißrate kann aus der Schadensakkumulation wirkender Verschleißmechanismen resultieren. Daher ist dieser Bereich besonders charakteristisch für das verschleißbedingte Versagen tribotechnischer Systeme.

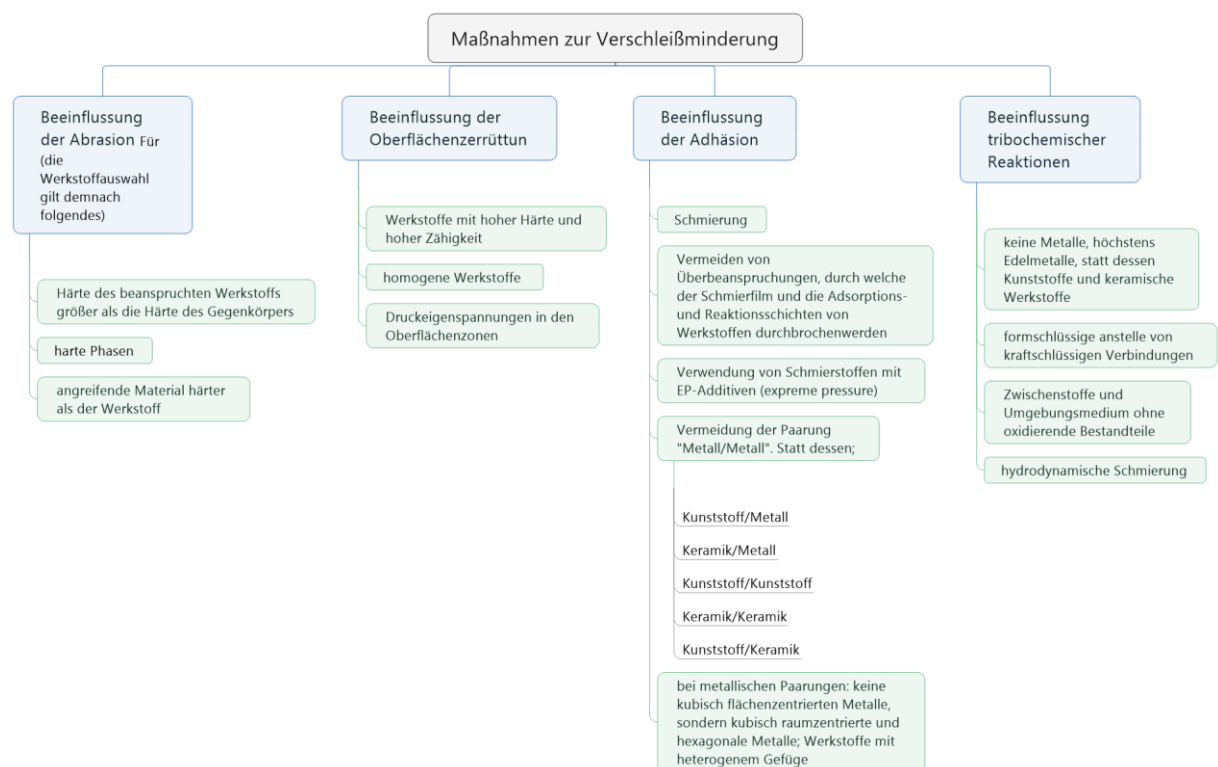


Abb.11. Verschleißbeeinflussende Maßnahmen

Die möglichen Maßnahmen zur Beeinflussung und Verminderung des Verschleißes können – in Ergänzung der speziellen Möglichkeiten zur Beeinflussung der Verschleißmechanismen – übersichtsmäßig wie folgt zusammengefasst werden:

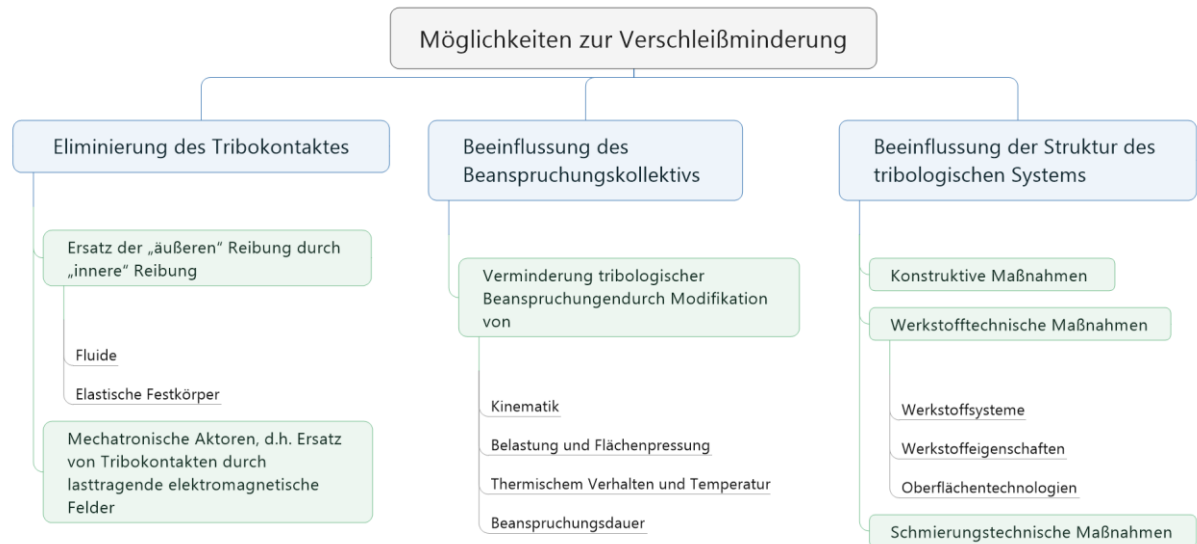


Abb.11. Möglichkeiten zur Verschleißminderung

Additive Fertigung

Die Additive Fertigung bezeichnet einen Prozess, bei dem auf der Basis von digitalen 3D-Konstruktionsdaten durch das Ablagern von Material schichtweise ein Bauteil aufgebaut wird. Immer häufiger wird der Begriff „3D-Druck“ als Synonym für die Additive Fertigung verwendet. Additive Fertigung beschreibt jedoch besser, dass es sich hier um ein professionelles Produktionsverfahren handelt, das sich deutlich von konventionellen, abtragenden Fertigungsverfahren unterscheidet. Anstatt zum Beispiel ein Werkstück aus einem festen Block herauszufräsen, baut die Additive Fertigung Bauteile Schicht für Schicht aus Werkstoffen auf, die als feines Pulver vorliegen. Als Materialien sind unterschiedliche Metalle, Kunststoffe und Verbundwerkstoffe verfügbar [9].

Diese Fertigungsmethode findet unter anderem im Rapid Prototyping Verwendung – dem Bau von Anschauungs- und Funktionsprototypen. Produktentwicklung und Markteinführung lassen sich dadurch entscheidend verkürzen. Mittlerweile hält die Additive Fertigung zunehmend Einzug in die Serienfertigung. Sie eröffnet großen OEM-Herstellern aus unterschiedlichsten Industriezweigen die Möglichkeit, sich am Markt zu differenzieren – im Hinblick auf neue Kundennutzen, Kostenreduktionspotenziale oder zum Erreichen von Nachhaltigkeitszielen [9].

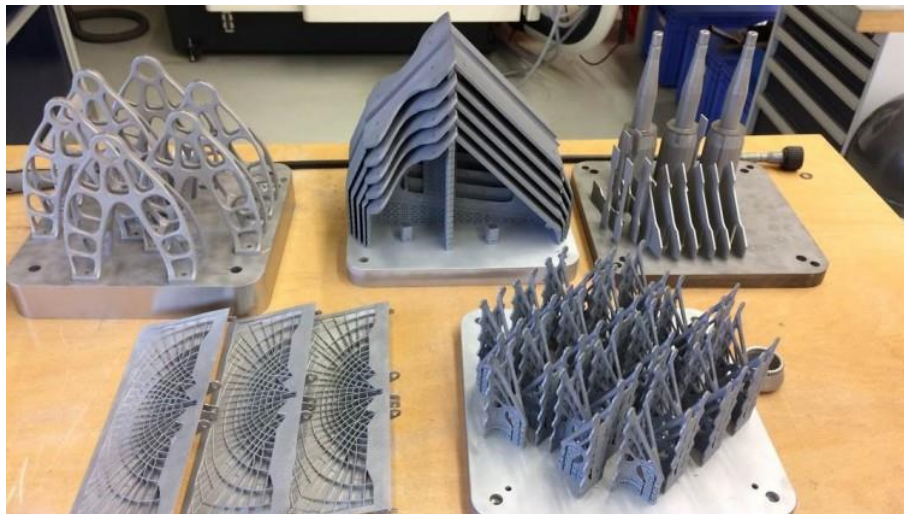


Abb.12. Flugzeugteile aus dem 3D-Drucker (Frank Grotelüschen) [10]

Der Prozess des Additive Manufacturing (AM) beginnt mit einem (virtuellen) dreidimensionalen CAD-Datensatz, der das herzustellende Teil wiedergibt. In der Engineeringphase wird der Datensatz typischerweise mittels 3D-CAD Konstruktion (CAD), durch Scannen oder durch bildgebende Verfahren wie Computer-Tomografie (CT-Scanning) erzeugt [11].

Unabhängig davon wie der 3D-Datensatz erzeugt wurde, wird er im ersten Schritt mittels Rechner und spezieller Software in Scheiben oder Schichten zerteilt. Als Ergebnis wird ein Satz konturierter virtueller Schichten gleichmäßiger Dicke

gewonnen. Der Datensatz besteht aus den Konturdaten (x-y), der Schichtdicke (dz) und der Schichtennummer (oder Z-Koordinate) jeder Schicht [11].

Schicht um Schicht wächst so das physische Modell vom Boden bis zur Spitze (von unten nach oben), bis das Teil fertiggestellt ist. Diese grundsätzlichen Schritte, Prozesskette genannt, sind für alle aktuell erhältlichen AM-Maschinen gleich. Die Maschinen unterscheiden sich lediglich in der Art der Erzeugung jeder einzelnen Schicht und in der Weise, wie benachbarte Schichten verbunden werden, um das Teil zu formen [11].

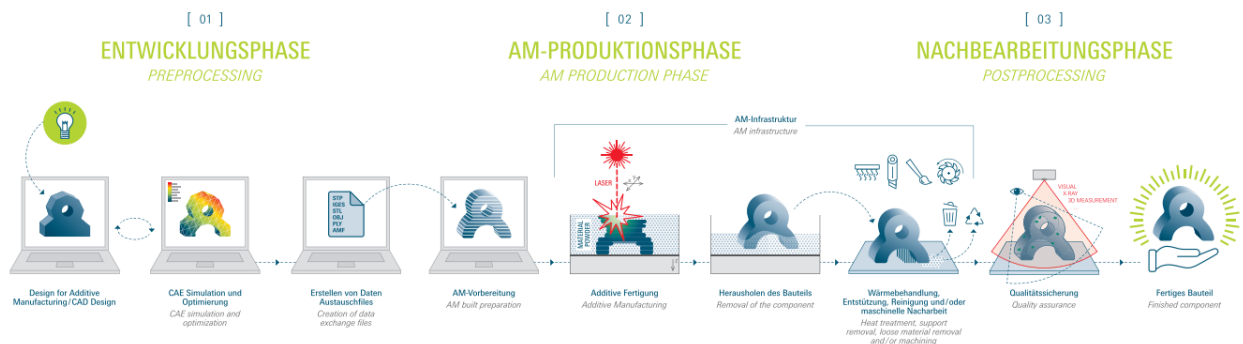


Abb.13. Additive Fertigungsprozess [13]

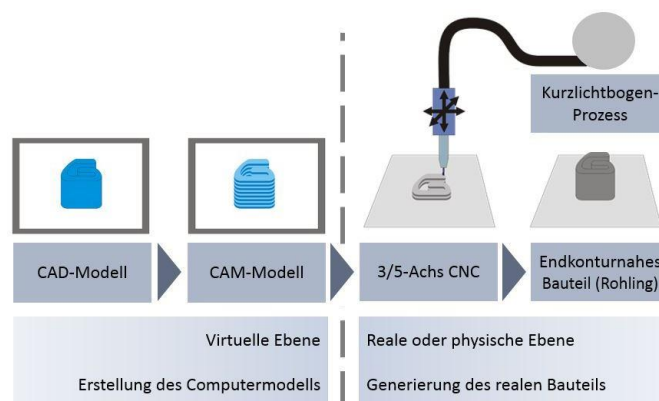


Abb.13. Umwandlung eines 3D-Modells in einen druckbaren Gegenstand [14]

Auf dem Markt ist eine große Vielfalt von Maschinen für additive Herstellungsverfahren verfügbar [11].

Bezeichnung		
Personal Printer	Professional Printer	Production Printer
Auch bezeichnet als:		
Personal Fabrikator/Fabber Personal Fabber	Office Drucker/Printer	Shop Floor Drucker/Printer
3D-Drucker/ Personal 3D-Drucker	Professionell 3D-Drucker	Produktions 3D-Drucker
Anwendung		
Halbprofessionelle oder private Nutzung im Privatbüro	Kommerzielle Nutzung im Büro oder in der Werkstatt	Industrielle Nutzung in der Produktion oder im Dienst- leistungsbereich
Anwendungsebene		
Rapid Prototyping Anschauungsmodelle	Rapid Prototyping	Rapid Manufacturing
Solid Imaging Concept Modeling	Funktionsprototypen	Direkte Bauteilherstellung
Urm Modelle für nachgeschaltete Rapid Prototypingprozesse	Urm Modelle für nachgeschaltete Rapid Prototypingprozesse	Rapid Manufacturing/ Direkte Werkzeugherstellung

Abb.14. Maschinenklassen für Additive Manufacturing

Abb.15 illustriert die additive Fertigung von Metallen, die für diese Arbeit sehr aktuell ist.

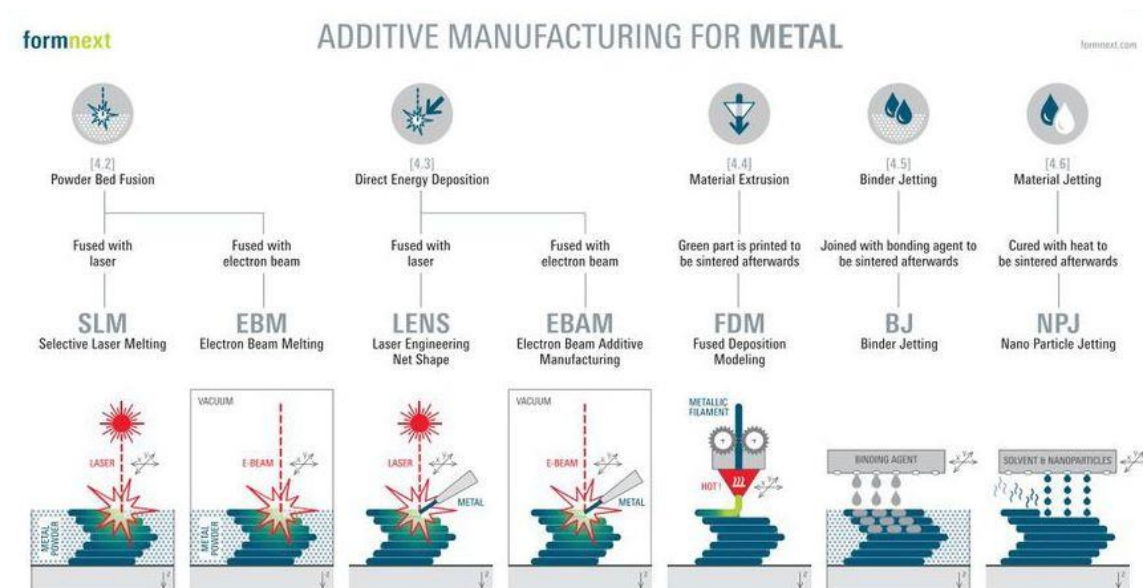


Abb.15. Additive Fertigung von Metallen

Es gibt Vor- und Nachteile der additiven Fertigung [12]:



Abb.16. Vor- und Nachteile der additiven Fertigung

Additive Technologien können sich je nach Prinzip der Bildung einer Druckschicht unterscheiden:

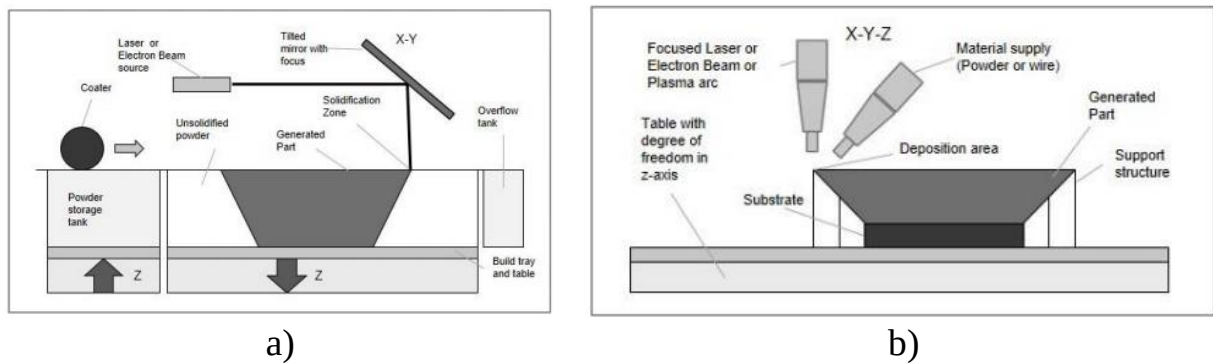


Abb.17. Prinzipien der Bildung einer Druckschicht (a – bed deposition, b – direct deposition)

Auf dem Markt existieren zahlreiche 3D-Drucktechnologien, die diverse Materialien verwenden. Verschiedene Hersteller verwenden für ähnliche 3D-

Drucktechnologien oftmals unterschiedliche Bezeichnungen.

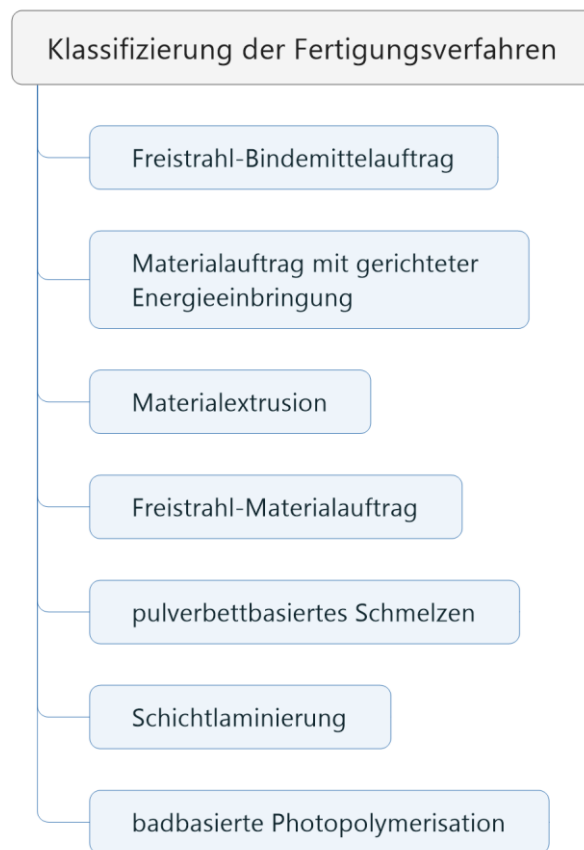


Abb.18. Klassifizierung der Fertigungsverfahren [16]

Es gibt etablierte additive Fertigungsverfahren [17] und weitere Fertigungsverfahren [17, 18, 19, 20, 21]:

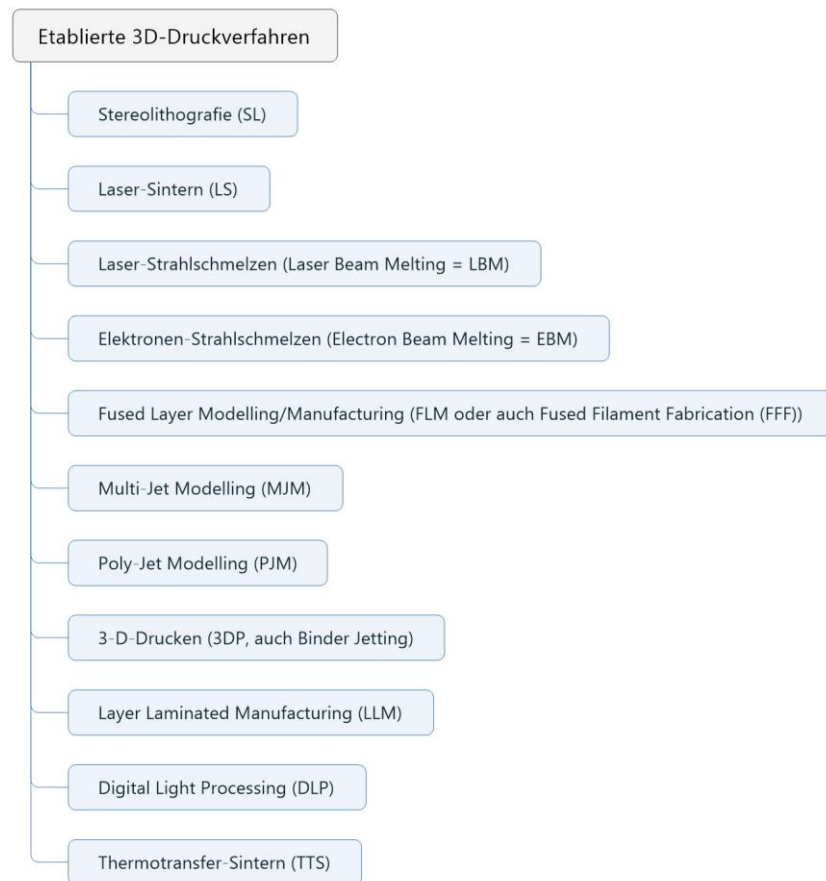


Abb.19. Etablierte additive Fertigungsverfahren

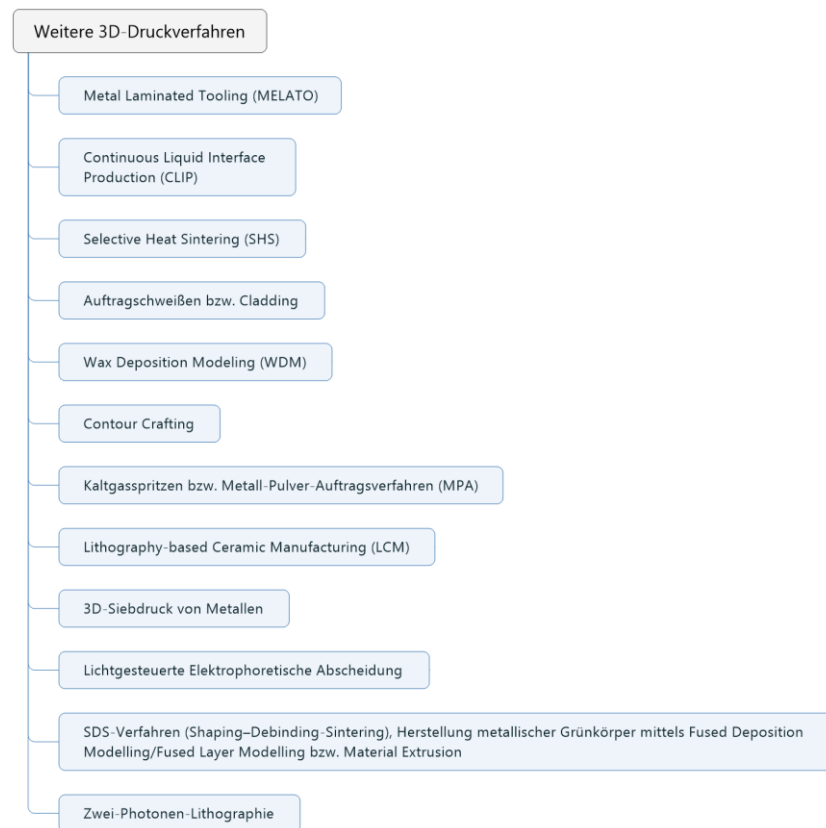


Abb.20. Weitere additive Fertigungsverfahren

Meist arbeiten 3D-Druckmaschinen nur mit einem Werkstoff oder einer Werkstoffmischung und einem Druckverfahren. Versuchsweise wurden schon kombinierte Druckverfahren erprobt [22].

Es gibt auch die Hybridmaschinen, die 3D-Druckverfahren mit anderen Verfahren kombinieren [23, 24]. Es gibt einen Vorteil, dass das Werkstück nur einmal in der Maschine eingespannt/befestigt werden muss, obwohl es mit mehreren Werkzeugen bearbeitet wird. Jede Übergabe an ein anderes Spannwerkzeug kann mit dem Risiko verbunden sein, dass die geforderte Genauigkeit bzw. die zulässigen Toleranzen nicht mehr eingehalten werden.

Für diese Arbeit sind am wichtigsten die Fertigungsverfahren, wie EBM (Elektronenstrahlschmelzen) und SLS/LS (Laserstrahlschmelzen, auch selektives Laserstrahlschmelzen genannt).

Additive Fertigungsverfahren sind ausgesprochen spezifisch. Je nach Anwendungen benötigt man unterschiedliche Pulver, Drucker und Verfahren. Alle Variablen gilt es sorgfältig aufeinander abzustimmen. Nur so erhalten die Bauteile die gewünschten Eigenschaften und der Prozess verlässliche Ergebnisse. Und nur so kann der Prozess kosteneffizient und schnell modelliert werden [25].

Für einen zuverlässigen, additiven Fertigungsverfahren ist die Bedeutung der Metallpulverqualität wesentlich. Hauptmerkmale hierbei sind [26, 27].

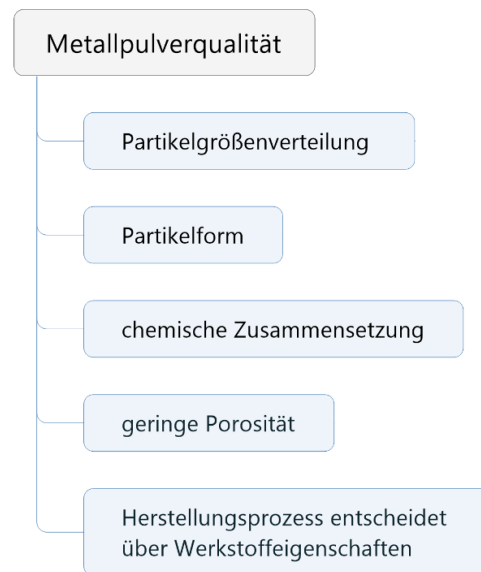


Abb.21. Metallpulverqualität

Selektiven Laserschmelzens wirken sich die Parameter des Prozesses auf den damit erzeugten Werkstoff aus. Das kann zum Beispiel die Pulverherstellung oder die Belichtungsstrategie beim Aufschmelzen des Pulvers betreffen. Aktuell beschäftigt sich das Fraunhofer LBF mit Fragestellungen rund um die Auswirkungen und die Beeinflussung des zyklischen Werkstoffverhaltens durch Parameter des Selektiven Laserschmelzens sowie deren Berücksichtigung im Rahmen einer numerischen Beanspruchungsanalyse zur Abschätzung der Lebensdauer von zyklisch beanspruchten Bauteilen [28].

Erste Versuchsergebnisse an Proben mit polierter und im Fertigungszustand belassener Oberfläche gaben den Darmstädter Wissenschaftlern Aufschluss über die komplexen Auswirkungen des Selektiven Laserschmelzens auf die Werkstoff- und Bauteileigenschaften. Erwartungsgemäß hat die Oberflächengüte einen entscheidenden Einfluss auf die Lebensdauer. Die raue, additiv gefertigte Oberfläche stellt einen potentiellen Versagensort unter zyklischer Beanspruchung dar, insbesondere, wenn verfahrensbedingte Stützstrukturen zur Fertigung überhängender Bauteilgeometrien erforderlich sind. Neben der Bauteiloberfläche zeigen sich innere Unregelmäßigkeiten wie Poren nicht nur im Kernwerkstoff als versagensrelevant, sondern vermehrt im Randbereich von additiv gefertigten Strukturen [28].

Die Versuchsergebnisse des Fraunhofer LBF unterstreichen, dass sich die Beanspruchungshöhe und die Baurichtung auf die zyklische Streckgrenze der additiv gefertigten Aluminiumlegierung AlSi10Mg auswirken. Es zeigt sich eine Richtungsabhängigkeit dieser Eigenschaft, die sich jedoch durch eine geführte Wärmebehandlung kompensieren lässt [28].

Aufbauend auf den experimentellen Erkenntnissen unternahm das Fraunhofer LBF erste konzeptionelle Schritte zur Optimierung eines Bemessungskonzeptes für zyklisch beanspruchte Bauteile und Strukturen, um deren spezifische Werkstoffeigenschaften bewerten und zutreffend beschreiben zu können. Dabei berücksichtigen die Darmstädter Wissenschaftler maßgebliche Einflussgrößen, wie innere Unregelmäßigkeiten, die Oberflächenbeschaffenheit, die Anisotropie der Mikrostruktur oder Eigenspannungszustände, die sich auf die mechanischen und geometrischen Eigenschaften auswirken. Dabei gehen sie von bestehenden Bemessungsmethoden für metallische Bauteile aus, die bei dem

klassischen Fertigungsverfahrenen Gießen und Schweißen Anwendung finden, und diskutieren deren Übertragbarkeit auf additiv gefertigte Strukturen [28].

Literaturverzeichnis

1. Tribologie. [Electronic resource]. Pub. Date:
<https://www.autoform.com/de/glossar/tribologie/> – 06.06.2019.
2. Horst Czichos, Karl-Heinz Habig: Tribologie Handbuch: Tribometrie, Tribomaterialien, Tribotechnik, Vieweg+Teubner Verlag, 2010.
3. Theo Mang, Kirsten Bobzin, Thorsten Bartels: Industrial Tribology: Tribosystems, Friction, Wear and Surface Engineering, Lubrication, Wiley-VCH, 2011.
4. Theo Mang et al.: Encyclopedia of Lubricants and Lubrication, Springer Verlag, 2014.
5. Was ist Tribologie? [Electronic resource]. Pub. Date:
<https://www.ggbearings.com/de/unternehmen/tribologie> – 06.06.2019.
6. H. Czichos, K.-H. Habig: Tribologie-Handbuch, Reibung und Verschleiß; Systemanalyse, Prüftechnik, Werkstoffe und Konstruktionselemente. Vieweg-Verlag, Braunschweig, (1992). [7] DIN 50 323, Teil 1: Tribologie; Begriffe. Beuth Verlag, Berlin, (1988).
7. DIN 50 320: Verschleiß, Begriffe, Systemanalyse von Verschleißvorgängen, Gliederung des Verschleißgebietes. Beuth Verlag, Berlin, (1979).
8. Fleischer, G.; Gröger, H.; Thum, H.: Verschleiß und Zuverlässigkeit. Berlin: Verlag Technik 1980.
9. Additive Fertigung, Laser-Sintern und industrieller 3D Druck - Vorteile und Funktionsprinzipien [Electronic resource]. Pub. Date:
https://www.eos.info/additive_fertigung/fuer_technologie_interessierte –
07.06.2019

10. Autoteile aus Metallpulver. [Electronic resource]. Pub. Date: https://www.deutschlandfunk.de/3d-druck-im-grossen-stil-autoteile-aus-metallpulver.676.de.html?dram:article_id=383350 – 07.06.2019.
11. Grundbegriffe Additive Fertigung. [Electronic resource]. Pub. Date: <https://www.form-werkzeug.de/themen/fw-wiki/produktionsprozess/additive-fertigung/artikel/grundbegriffe-additive-fertigung-987175.html> – 07.06.2019.
12. 3D Druck. [Electronic resource]. Pub. Date: <https://netzkonstrukteur.de/fertigungstechnik/3d-druck/> – 07.06.2019.
13. Wissenswertes zur additiven Fertigung. [Electronic resource]. Pub. Date: <https://www.maschinenmarkt.ch/wissenswertes-zur-additiven-fertigung-a-781122/index3.html> – 07.06.2019.
14. Additive Fertigungsverfahren im Überblick. [Electronic resource]. Pub. Date: <https://www.maschinewerkzeug.de/maschinen/uebersicht/artikel/additive-fertigungsverfahren-im-ueberblick-7199127.html> – 07.06.2019.
15. GEFERTEC GMBH. [Electronic resource]. Pub. Date: <https://www.3dnetzwerk.com/gefertec-gmbh/> – 07.06.2019.
16. DIN EN ISO/ASTM 52900:2018
17. VDI 3405:2014-12 Additive Fertigungsverfahren - Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen – 08.06.2019.
18. https://www.hermle.de/cms/de/info_center/presse/fachpresse/getPrm/selection/130/ – 08.06.2019.
19. 3D-Druck in Überschallgeschwindigkeit. [Electronic resource]. Pub. Date: <https://www.maschinenmarkt.vogel.de/3d-druck-in-ueberschallgeschwindigkeit-a-679383/> – 08.06.2019.

20. Was ist Lithography-based Ceramic Manufacturing (LCM)? [Electronic resource]. Pub. Date: <https://www.3ddruckkeramik.de/was-ist-lcm/> – 08.06.2019.
21. 3D-Druck im SDS-Verfahren: Herstellung metallischer Grünkörper mittels FDM/Material Extrusion (ME). [Electronic resource]. Pub. Date: https://www.repromag-project.eu/fileadmin/cms/user_upload/PDF/4-REProMag_presentation_Maurath.pdf – 08.06.2019.
22. *Creative Machines Lab – Columbia University*. (WMV; 19,7 MB) Archiviert vom Original am 14. Juni 2007; abgerufen am 27. Juli 2017
23. Laserschmelzen und Fräsen kombinieren. [Electronic resource]. Pub. Date: <http://www.konstruktionspraxis.vogel.de/laserschmelzen-und-fraesen-kombinieren-a-473929/> – 08.06.2019.
24. Hybridmaschinen vereinen das Beste aus zwei Welten. [Electronic resource]. Pub. Date: <http://www.maschinenmarkt.vogel.de/themenkanale/produktion/spanendefertigung/maschinen/articles/479561/> – 08.06.2019.
25. Metallpulver für die additive Fertigung – kundenspezifische Legierungen. [Electronic resource]. Pub. Date: https://www.heraeus.com/de/group/products_and_solutions_group/additive_manufacturing/metalpowders/metalpowders.html – 08.06.2019.
26. Verdüsungstechnologie zur SLM-Metallpulverherstellung. [Electronic resource]. Pub. Date: <https://www.rosswag-engineering.de/metallpulver-3d-druck> – 08.06.2019.
27. 3D-Druck: 4 Kriterien für perfektes Pulver. [Electronic resource]. Pub. Date: <https://www.nc-fertigung.de/3d-druck-4-kriterien-fuer-perfektes-pulver> – 08.06.2019.

28. Bewertungsmethoden für Additive Fertigung. [Electronic resource].
Pub. Date: <https://www.addmag.de/bewertungsmethoden-fuer-additive-fertigung> –
08.06.2019.

Приложение Б

Таблица . Порошковые материалы и их обозначение, поставляемые различными компаниями – производителями АМ-машин

Фирма	Материал	Фирменное обозначение	Стандарты Европы	Стандарты США
Concept Laser	Нерж. сталь	CL 20ES	1.4404	316L
	Инструм. сталь (Cr>12%)	CL90RW	1.2083	
	Инструм. сталь	CL 91RW		
	Мартенситностареющая сталь	CL 50/60WS	DIN 1.2803 1.270	18% Ni Maraging 300, AISI H13
	Al-сплав AlSi12	CL 30AL	ISO AlSi12	AA 4047 ASTM A04130
	AlSi10Mg	CL 31AL	ISO 3522	A03600
	Ti6Al4V ELI	CL 40TI ELI		ASTM F136
	Ti6Al4V	CL 40TI	ISO 5832-3	ASTM F1472, AMS 4928, AMS 4967
	Никелевый сплав Inconel 718	CL 100NB	ISO 6208 UNS N07718	UNS N07718, AMS 5662, AMS 5664
	Сплав Co-Cr (remanium star)	CL 111 CoCr	DIN EN ISO 9693/DIN EN ISO 22674	ASTM F75
EOS	AlSi10Mg	AlSi10Mg	ISO 3522	A03600
	Сплав CoCrMo, биосовместимый	CobaltChrom e MP1	ISO 5832-4, ISO 5832-12, UNS R 31538	ASTM F75 ASTM F1537
	Мартенситностареющая сталь	MaragingSteel MS1	1.2709	18% Ni Maraging 300, AISI H13

	Мартенситноста- реющая сталь	MaragingSteel MS1	1.2709	18% Ni Maraging 300, AISI H13
	Инконель 625	NickelAlloy IN625	UNS N06625, DIN NiCr22Mo9Nb	UNS N06625, AMS 5666F, AMS 5599G
	Инконель 718	NickelAlloy IN718	ISO 6208, UNS N07718, DIN NiCr19Fe19Nb Mo3	UNS N07718, AMS 5662, AMS 5664
	Нерж. сталь	St. Steel GP1	1.4542	17-4 PH
	Нерж. сталь	St. Steel PH1	DIN 1.4540	UNS S15500
	Сплав Ti6Al4V	Titanium Ti64	ISO 5832-3	ASTM F1472
	Сплав Ti6Al4V ELI	Titanium Ti64 ELI	ISO 5832-3, UNS R56401	ASTM F136
3D Systems	Нерж. сталь	ST4404D	1.4404	316 L
	Мартенситноста- реющая сталь	ST2709B	1.2709	18% Ni Maraging 300, AISI H13
	Сплав Co-Cr	ST2724G	ISO 5832-4	