

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

---

Институт Кибернетики  
Направление подготовки 15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение  
машиностроительных производств»  
Кафедра «Технология машиностроения и промышленная робототехника»

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Тема работы

Исследование триботехнических характеристик аддитивно полученных конструкционных  
материалов при динамических режимах нагружения узлов трения

УДК\_621.891:620.22.531.4

Студент

| Группа | ФИО                      | Подпись | Дата |
|--------|--------------------------|---------|------|
| 8НМ51  | Пугачёва Анна Евгеньевна |         |      |

Руководитель

| Должность         | ФИО             | Ученая степень,<br>звание | Подпись | Дата |
|-------------------|-----------------|---------------------------|---------|------|
| Доцент каф. ТМСПР | Буханченко С.Е. | к.т.н.                    |         |      |

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

| Должность                  | ФИО         | Ученая степень,<br>звание | Подпись | Дата |
|----------------------------|-------------|---------------------------|---------|------|
| Доцент каф.<br>менеджмента | Спицын В.В. | к.э.н.                    |         |      |

По разделу «Социальная ответственность»

| Должность       | ФИО               | Ученая степень,<br>звание | Подпись | Дата |
|-----------------|-------------------|---------------------------|---------|------|
| Доцент каф. ЭБЖ | Пустовойтова М.И. | к.х.н.                    |         |      |

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

| Зав. кафедрой | ФИО          | Ученая степень,<br>звание | Подпись | Дата |
|---------------|--------------|---------------------------|---------|------|
| ТМСПР         | Вильнин А.Д. | -                         |         |      |

Томск – 2017г.

## ЗАПЛАНИРОВАННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Из планируемых результатов обучения наиболее ярко проиллюстрированы:

| Код результата                             | Результат обучения                                                                                                                                                                                                                                                       | Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон                                                                                                      |
|--------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b><i>Профессиональные компетенции</i></b> |                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                               |
| P1                                         | Применять <i>глубокие</i> естественно-научные, математические и инженерные <i>знания</i> для создания <i>нового</i> технологического оборудования и его эксплуатации.                                                                                                    | Требования ФГОС ВО (ПК-19, 20) <sup>1</sup> , Критерий 5 АИОР (п. 1.1), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>   |
| P3                                         | Ставить и решать <i>инновационные</i> задачи <i>инженерного анализа</i> , связанные с созданием технологических машин и их эксплуатацией, с использованием производственных испытаний, системного анализа, моделирования объектов и процессов машиностроения             | Требования ФГОС ВО (ПК-16, ОК-2, 3), Критерий 5 АИОР (пп. 1.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>           |
| P5                                         | Проводить теоретические и экспериментальные <i>исследования</i> при создании современных высокоэффективных машин, технологий производства изделий, материалов, nano технологий.                                                                                          | Требования ФГОС ВО (ПК-21, 24, ОК-4, 6), Критерий 5 АИОР (п. 1.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>        |
| 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 (ПК-6, 17, 18, ОК-10), Критерий 5 АИОР (пп. 1.6, 2.3), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> |
| P10                                        | Демонстрировать <i>глубокие знания</i> <i>социальных, этических и культурных аспектов</i> инновационной инженерной деятельности, компетентность в вопросах <i>устойчивого развития</i>                                                                                   | Требования ФГОС ВО (ПК-22, ОК-7), Критерий 5 АИОР (пп. 2.4, 2.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>         |
| P11                                        | <i>Самостоятельно учиться</i> и непрерывно <i>повышать квалификацию</i> в течение всего периода профессиональной деятельности                                                                                                                                            | Требования ФГОС ВО (ОК-1, 5), Критерий 5 АИОР (2.6), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>                      |

<sup>1</sup> Указаны коды компетенций по ФГОС ВО (направление 15.04.05 – Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств),

## Форма задания на выполнение выпускной квалификационной работы

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

Институт кибернетики  
Направление подготовки (специальность) Конструкторско-технологическое обеспечение  
машиностроительных производств  
Кафедра ТМСПР

УТВЕРЖДАЮ:  
Зав. кафедрой  
\_\_\_\_\_ Вильнин А.Д.  
(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

### ЗАДАНИЕ на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

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

Студенту:

| Группа | ФИО                      |
|--------|--------------------------|
| 8НМ51  | Пугачёва Анна Евгеньевна |

Тема работы:

|                                                                                                                                                |                      |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| «Исследование триботехнических характеристик аддитивно полученных конструкционных материалов при динамических режимах нагружения узлов трения» |                      |
| Утверждена приказом директора (дата, номер)                                                                                                    | №699/с от 04.02.2016 |

|                                          |            |
|------------------------------------------|------------|
| Срок сдачи студентом выполненной работы: | 10.06.2017 |
|------------------------------------------|------------|

### ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Исходные данные к работе</b><br><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> | <ol style="list-style-type: none"><li>1. Провести аналитический обзор технологий и характеристик аддитивно полученных конструкционных материалов;</li><li>2. Исследование микроструктуры аддитивно полученных конструкционных материалов;</li><li>3. Анализ математических моделей изнашивания различных конструкционных материалов;</li><li>4. Построение математической модели изнашивания аддитивно полученных конструкционных материалов;</li><li>5. Испытание аддитивно полученных конструкционных материалов на различных</li></ol> |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | <p>режимах нагружения на АТК;</p> <p>6. Изучить основные факторы, влияющие на человека и окружающую среду в процессе работы с ПЭВМ и шлифовальным цехом;</p> <p>7. Провести анализ и расчет параметров ресурсоэффективности и ресурсосбережения;</p>                                             |
| <p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b> <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></p> | <p>1. Патентный обзор;</p> <p>2. Объект и методы исследования;</p> <p>3. Расчет и аналитика;</p> <p>4. Результаты проведенного исследования</p> <p>5. Социальная ответственность;</p> <p>6. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение;</p> <p>7. Заключение по работе.</p> |
| <p><b>Перечень графического материала</b><br/><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | <p>1. В электронной форме на диске CD-R: пояснительная записка.</p>                                                                                                                                                                                                                              |
| <p><b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b><br/><i>(с указанием разделов)</i></p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| <b>Раздел</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | <b>Консультант</b>                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Исследовательская часть                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Буханченко Сергей Евгеньевич, доцент каф. ТМСПР                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Технологическая часть                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Егоров Юрий Петрович, зав. лабораторией каф. МТМ                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Спицын Владислав Владимирович, доцент каф. Менеджмента                                                                                                                                                                                                                                           |
| Социальная ответственность                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Пустовойтова Марина Игоревна, доцент каф. ЭБЖ                                                                                                                                                                                                                                                    |

|                                                                                                 |            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b> | 13.10.2016 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|

**Задание выдал руководитель:**

| Должность                  | ФИО                          | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|----------------------------|------------------------------|------------------------|---------|------|
| Заведующий кафедрой АРМ ИК | Буханченко Сергей Евгеньевич | к.т.н                  |         |      |

**Задание принял к исполнению студент:**

| Группа | ФИО                      | Подпись | Дата |
|--------|--------------------------|---------|------|
| 8НМ51  | Пугачёва Анна Евгеньевна |         |      |

## Реферат

Выпускная квалификационная работа содержит пояснительную записку, содержащую 128 страниц, включает 40 рисунков, 40 таблиц, одно приложение и диск CD-R.

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

Объектом изучения являются аддитивно полученные конструкционные материалы.

Цель работы: исследование триботехнических характеристик аддитивно полученных конструкционных материалов при динамических режимах нагружения узлов трения.

В процессе выпускной квалификационной работы были рассмотрены свойства аддитивно полученных конструкционных материалов и были сделаны выводы о возможности применения данных материалов в различных узлах трения. Выпускная квалификационная работа выполнена в текстовом редакторе Microsoft Word 2010. При создании электронных моделей использовался программный продукт SolidWorks 2016, испытания проводились при помощи программных пакетов КОИ-1 (кафедра МТМ, ИФВТ, ТПУ) и приложение TriBoss для АТК.

В результате исследования были изучены основные характеристики аддитивно полученных конструкционных материалов и были сделаны выводы о дальнейшей работе с материалами.

## Нормативные ссылки и определения

1. ГОСТ 12.3.002-75. Система стандартов безопасности труда. Процессы производственные. Общие требования безопасности
2. ГОСТ 12.1.004—91. Пожарная безопасность. Общие требования
3. ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны
4. ГОСТ 12.2.032-78 «Система стандартов безопасности труда. Рабочее место при выполнении работ сидя.

АТ – аддитивные технологии.

АТК – автоматизированный триботехнический комплекс.

*ТНВД* – топливный насос высокого давления.

EOS – фирма-производитель порошков для спекания.

ДВС – двигатель внутреннего сгорания.

ГРМ – газораспределительный механизм.

## Оглавление

|                                                                                                                             |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Реферат .....                                                                                                               | 5   |
| Нормативные ссылки и определения .....                                                                                      | 6   |
| Введение.....                                                                                                               | 8   |
| 1. Обзор литературы .....                                                                                                   | 9   |
| 1.1. Обзор аддитивных технологий .....                                                                                      | 9   |
| 1.2 Обзор металлических 3d материалов, используемых в аддитивном производстве и их применение .....                         | 14  |
| 1.3 Законы нагружения в узлах трения .....                                                                                  | 24  |
| 2. Объект и метод исследования .....                                                                                        | 29  |
| 3. Расчеты и аналитика .....                                                                                                | 29  |
| 3.1 Описание математической модели изнашивания аддитивно полученных конструкционных материалов .....                        | 29  |
| 3.1 Моделирование изнашивания .....                                                                                         | 34  |
| 3.2 Модель отслаивания при усталостном напряжении .....                                                                     | 35  |
| 3.3 Скорость поверхностного износа .....                                                                                    | 36  |
| 3.4 Расчёт коэффициентов для уравнения .....                                                                                | 38  |
| 3.5 Описание технологии выращивания конструкционных материалов, используемой нами при подготовке испытываемых образцов..... | 41  |
| 3.6 Исследуемые материалы .....                                                                                             | 46  |
| 3.7 Исследование пористости аддитивно полученных материалов .....                                                           | 47  |
| 3.8 Исследование микроструктуры аддитивно полученных материалов .....                                                       | 53  |
| 3.9 Методика работы с динамическими испытаниями.....                                                                        | 57  |
| 3.10 Описание АТК.....                                                                                                      | 62  |
| Исследование динамических режимов нагружения .....                                                                          | 70  |
| 3.11 Испытания образцов на АТК .....                                                                                        | 72  |
| 4 Результаты проведенного исследования.....                                                                                 | 76  |
| 4. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ<br>78                                                    |     |
| 6. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ .....                                                                                         | 94  |
| Заключение .....                                                                                                            | 106 |
| Список публикаций студента.....                                                                                             | 107 |
| Список использованных источников .....                                                                                      | 108 |
| Приложение А .....                                                                                                          | 110 |

## Введение

В современном машиностроении большое значение имеет продолжительность срока службы изделия, особенно в тех областях, в которых выдвинуты высокие требования к деталям, их материалам и свойствам, а замена на новую деталь невозможна или трудноосуществима. Поэтому важно продлить время работы детали до катастрофического износа и обеспечить плавность работы узла без биений и вибраций этим и обусловлена актуальность работы.

Объектом исследования являются аддитивные технологии. Предметами исследования являются аддитивно полученные конструкционные материалы

Таким образом, в данной работе рассмотрены способы применения аддитивно полученных материалов и в частности – их применение в узлах трения с этим и связана практическая значимость работы.

Основная цель магистерской диссертации – исследование триботехнических характеристик аддитивно полученных конструкционных материалов при динамических режимах нагружения узлов трения.

В результате выполнения работы решались следующие задачи:

- анализ технологий и характеристик аддитивно полученных конструкционных материалов;
- исследование микроструктуры аддитивно полученных конструкционных материалов;
- анализ математические модели изнашивания различных конструкционных материалов;
- разработка математической модели изнашивания аддитивно полученных конструкционных материалов;
- испытание аддитивно полученных конструкционных материалов на различных режимах нагружения на АТК;
- обзор вопросов, связанных с производственной и экологической безопасностью;

– расчет ресурсоэффективности и ресурсосбережения данного вида изделий.

## 1. Обзор литературы

### 1.1. Обзор аддитивных технологий

При выпуске новой продукции важными факторами являются, сокращение времени и стоимости разработки изделий и подготовки производства. Этого можно добиться не только использованием новых разработок и материалов в традиционных технологических циклах, но обнаружением ошибок на более ранних стадиях выпуска продукции.

АТ является вторым звеном в технологической цепочке выпуска продукции: вначале объект проектируется в трехмерных CAD/CAM/CAE системах. Однако только виртуального моделирования с помощью таких систем обычно недостаточно. Необходимо создание реального трехмерного прототипа, причем желательно из материала, близкого по свойствам к конструкционному.

Кроме того, при решении некоторых задач, например, при выпуске малых серий продукции или при изготовлении единичных, индивидуальных экземпляров продукции, невыгодно использовать традиционные способы производства. Именно поэтому в составе современных производственных систем используются АТ. Эти технологии позволяют быстро, в течении нескольких часов, используя только данные трехмерных CAD/CAM/CAE систем без оснастки получить реальный объект с высокой точностью и качеством поверхности. В дальнейшем эти детали можно использовать в качестве прототипов для отработки дизайна, проверки собираемости, мастер - моделей для дальнейших технологий или в качестве конечного, готового изделия.

Разработка и внедрение аддитивных технологий в высокотехнологические производства является сегодня одной из основных парадигм технического перевооружения современной промышленности. В основе аддитивных технологий лежат результаты фундаментальных

исследований в области лазерно-информационных технологий, физической химии, материаловедения, компьютерного моделирования. Количество только научных публикаций по тематике АТ выросло за последние два года более чем на порядок. АТ, базирующиеся на различных процессах изготовления изделий путем “добавления” материала (в отличие от традиционных технологий механообработки, основанных на его удалении), позволяют проводить с высокой (вплоть до 100 нм) точностью разработку, изготовление и восстановление уникальных изделий из металлов, сплавов, керамик и полимеров, а также их композитов посредством прямого послойного синтеза, обеспечивая при этом существенную (до 90%) экономию дорогостоящих материалов. В свою очередь, расширение спектра и повышение эффективности применений АТ требуют разработки новых материалов (специальных металлических и неметаллических порошков, волокон, гидрогелей и т.д.) и физико-химических процессов, лежащих в основе конкретных АТ.

Рассмотрим разновидности материалов для 3d печати (таблица 1).

Таблица 1 - Техники печати и их описание

| Техника                                                      | Материалы                                         | Основные параметры                                                                                                                          | Требования к материалам                                                                                                                                                                                                                                                         |
|--------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Стереолитография<br>(STL — sterolithography)                 | Фотополимеры в жидком состоянии.                  | Отверждение путём сканирования лазерным лучом;<br>Толщина слоя печати 0,1-0,2 мм;<br>Примерная область печати 500x500x600 мм;               | От густоты фотополимера зависит скорость полимеризации. Чем гуще смола, тем хуже её гидромеханические свойства. Чем мощнее введенный в смолу фотоинициатор, тем меньшая время тратится. Чем мощнее лазер, тем меньше срок жизни смолы, так как она подвержена фоновой засветке. |
| Отверждение на твёрдом основании (SGC — Solid Ground Curing) | Фотополимеры в жидком состоянии.                  | Отверждение на твёрдом основании путём экспонирования ультрафиолетовой лампой.<br>Способ является разновидностью масочной стереолитографии. | От густоты фотополимера зависит скорость полимеризации. Чем гуще смола, тем хуже её гидромеханические свойства. Чем мощнее введенный в смолу фотоинициатор, тем меньшая время тратится. Чем мощнее лазер, тем меньше срок жизни смолы, так как она подвержена фоновой засветке. |
| Нанесение термопластов (FDM — Fused Deposition Modeling)     | Нити термопласта (воск или поликарбонаты и т.д.). | Технология для единичного производства                                                                                                      | Нанесение через тонкие сопла, подразумевает, что у термопласта должна быть большая текучесть и средняя вязкость — чтобы материал легко проходил сквозь сопла, но не растекался перед запеканием.                                                                                |
| Распыление термопластов (BPM — Ballistic Particle            | Нити термопласта (воск или поликарбонаты          | Нанесение капель полимера, который на специальную платформу, которая слой за слоем опускается,                                              | Высокая температура плавления материала. Возможны дефекты при неподходящей подложки                                                                                                                                                                                             |

| Техника                                                             | Материалы                                          | Основные параметры                                                                                                                                                                          | Требования к материалам                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|---------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Manufacturing)                                                      | и т.д.).                                           | одновременно с формированием сечения модели.                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Лазерное спекание порошков (SLS — Selective Laser Sintering)        | Порошок полимера, керамика или металла.            | Лазер на диоксиде углерода. Существует площадка, на которой модель опускается при нанесении и каждого нового слоя. Толщина слоя 0,1-0,15 мм                                                 | Применяются различные материалы: литейный воск, термопластичные полимеры, стекло, керамика и металлы (в виде частиц, покрытых полимером), к каждому виду материала выдвигаются свои требования, но в целом, порошки должны быть мелкодисперсными и примерно одинаковыми по размеру должны быть частицы. |
| Моделирование при помощи склейки (LOM — Laminated Object Modeling)  | Любой материал (листовой).                         | Луч лазера раскраивает листовой материал, а затем нагреваемые валки склеивают слои друг с другом.                                                                                           | Требования к материалу представляются в зависимости от самого материала.                                                                                                                                                                                                                                |
| Технология многосопельного моделирования (MJM - Multi Jet Modeling) | Восковые, фотополимерные и пластические материалы. | Нанесение слоя жидкого полимера на специальную платформу, которая слой за слоем опускается, одновременно с формированием сечения модели посредством лазера или ультрафиолетового излучения. | Для 3D печати на используется материал VisiJet- акриловый фотополимер, восковая структура, при помощи которой формируются конструкции поддержки. Материал поддержки должен быть легкоплавким.                                                                                                           |

| Техника | Материалы | Основные параметры                  | Требования к материалам |
|---------|-----------|-------------------------------------|-------------------------|
|         |           | Количество сопел от 96 до 448 штук. |                         |

## 1.2 Обзор металлических 3d материалов, используемых в аддитивном производстве и их применение

К порошкам для аддитивных технологий предъявляется ряд определенных требований. В первую очередь, это обеспечение сферичности, строго определенного гранулометрического состава, пониженного содержания газовых примесей – кислорода и азота. На данный момент предприятия авиационной отрасли закупают и используют порошки сплавов зарубежного производства, при этом имеется острая потребность в металлических порошках отечественных сплавов. Серийного производства порошковых материалов для данных технологий в России нет, поэтому рассмотрим заграничные аналоги, используемые в данной работе.

***EOS CobaltChrome MP1*** - жаропрочный сплав на кобальто-хромово-молибденовой основе для производственных и биомедицинских целей.

*Основная информация:*

Из сплава EOS Cobalt Chrome MP1 производятся детали на кобальто-хромово-молибденовой основе. Этот класс сплавов характеризуется превосходными механическими свойствами (прочность, жёсткость и т. д.) коррозионной стойкостью и жаропрочностью. Такие сплавы широко используются в биомедицинских целях: для стоматологических и медицинских имплантатов, а также для высокотемпературных узлов, таких как авиадвигатели и прочее.

Свойства:

- высокая прочность, стойкость к коррозии и высоким температурам,
- механические свойства повышаются при повышении температуры до 500-600 ° C
- по химическому составу соответствует UNS R31538 с высоким содержанием углерода CoCrMo сплаву,
- без никеля (<0.1 % содержание никеля).

- соответствует механическим и химическим характеристикам по ISO 5832-4 и ASTM F75 для литых сплавов на кобальто-хромово-молибденовой основе (для имплантатов).

Применение:

- функциональные прототипы,
- производство деталей мелкой серии,
- машиностроение,
- медицинское производство.

*Таблица 2 - Химический состав EOS CobaltChrome MP1*

| Элемент       | Содержание, % |
|---------------|---------------|
| Co            | 60.5          |
| Cr            | 28            |
| W             | 9             |
| Si            | 1.5           |
| Mn, N, Nb, Fe | < 1           |

*Таблица 3 - Технические данные EOS CobaltChrome MP1*

| Характеристика                                                                                                                             | Значение                                   |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| Предел текучести, Re                                                                                                                       | 935 (Н/мм <sup>2</sup> )                   |
| Предел прочности на разрыв, Rm                                                                                                             | 1030 (Н/мм <sup>2</sup> )                  |
| Удлинение A                                                                                                                                | 10 %                                       |
| Модуль Юнга                                                                                                                                | 230 (кН/мм <sup>2</sup> )                  |
| Теплопроводность $\lambda$                                                                                                                 |                                            |
| Коэффициент термического расширения                                                                                                        | 14.1 x 10 <sup>-6</sup> (К <sup>-1</sup> ) |
| Температура плавления $\Delta$                                                                                                             | 1320 – 14200(С)                            |
| Плотность $\rho$                                                                                                                           | 8.6 (г/см <sup>3</sup> )                   |
| Прочность соединения металла с керамикой в соответствии с EN ISO 9693, 3-Pt.-испытание на изгиб (мин. 25 МПа в соответствии с EN ISO 9693) | 40 (Н/мм <sup>2</sup> )                    |
| Биосовместимость L 929-                                                                                                                    | Не замечено появление клеточных            |

|                                                         |                      |
|---------------------------------------------------------|----------------------|
| распространение в соответствии с<br>EN ISO 10993-5, -12 | токсичных субстанций |
|---------------------------------------------------------|----------------------|

Из материала подобного этому производят различные протезы. Самый распространённый неблагородный сплав, который применяется в стоматологии. Обладает положительными свойствами: очень легко-текучий, что позволяет отливать тонкие модели, высокая твёрдость, высокая эластичность, отсутствие коррозии, хорошо паяется. (протезы).

***EOS Aluminium AlSi10Mg (силумин)*** – лёгкий металл для мотоспорта и аэрокосмических внутренних применений.

*Основная информация:*

AlSi10Mg это распространённый сплав для литейного производства, как правило, используется для литья тонкостенных или сложной геометрии изделий. Он обладает высокой прочностью, твердостью и высокими динамическими свойствами и, следовательно, также используется для деталей, подверженных ударным нагрузкам. Детали из сплава EOS Aluminium AlSi10Mg находят применение в деталях, где требуются сочетание хороших термических свойств и низкой массы. Такие детали могут подвергаться искровой эрозии, свариванию, микро дробеструйной обработке и нанесению покрытий.

*Свойства:*

- хорошие литейные свойства,
- высокие прочность и твёрдость,
- высокие динамические свойства.

*Применение:*

- функциональные прототипы,
- производство деталей мелкой серии,
- мотоспорт,
- автомобилестроение,
- внутренние части аэрокосмических аппаратов.

Таблица 4 - Химический состав EOS Aluminium AlSi10Mg

| Элемент | Содержание, % |
|---------|---------------|
| Al      | основа        |
| Si      | 9,0 - 11,0    |
| Mg      | 0,20 - 0,45   |
| Fe      | 0 - 0,55      |
| Mn      | 0 - 0,45      |
| O       | 0 - 0,20      |
| Ti      | 0 - 0,15      |
| Cu      | 0 - 0,10      |
| Zn      | 0 - 0,10      |
| C       | 0 - 0,05      |
| Ni      | 0 - 0,05      |
| Pb      | 0 - 0,05      |
| Sn      | 0 - 0,05      |

Таблица 5 - Технические данные EOS Aluminium AlSi10Mg

| Характеристика                 | Значение                                |
|--------------------------------|-----------------------------------------|
| Предел текучести, Re           | 170 - 220 (Н/мм <sup>2</sup> )          |
| Предел прочности на разрыв, Rm | 310 - 325 (Н/мм <sup>2</sup> )          |
| Удлинение A                    | 2 - 3 %                                 |
| Модуль Юнга                    | 75x10 <sup>3</sup> (Н/мм <sup>2</sup> ) |
| Теплопроводность $\lambda$     | 120 - 180 (Вт/м*К)                      |

Из материалов, подобного этому, к примеру, мелкодисперсный антифрикционный силумин, производят червячных, зубчатых колес и других деталей, работающих в условиях трения. В паре со сталью износостойкость «антифрикционного силумина» больше, а коэффициент трения и адгезионное схватывание меньше по сравнению с традиционной алюминиевой бронзой. (зубчатые и червячные колёса)

***EOS Titanium Ti6Al4V*** – металл для лёгкого машиностроения.

### Основная информация.

EOS Titanium Ti6Al4V это сплав широко известен как лёгкий сплав, характеризуется тем, что имеет высокие механические свойства, устойчив к коррозии и имеет низкий удельный вес. с химическим составом, в соответствии с ASTM F136-02a (ELI Grade 23) CL 41Ti ELI - порошок титанового сплава для аддитивного производства облегченных изделий как для аэрокосмической и автомобильной промышленности, так и для изготовления имплантов и компонентов для медицины.

#### *Свойства:*

- лёгкий вес с высокой удельной прочностью,
- устойчив к коррозии,
- детали, полученные лазерным спеканием отвечают требованиям ASTM F1472 (для Ti6Al4V) и ASTM F136 (для Ti6Al4V ELI) в отношении максимальной концентрации примесей.

- обладает очень высокой биoadгезией.

#### *Применение:*

- функциональные прототипы,
- производство деталей мелкой серии,
- мотоспорт,
- авиастроение,
- биомедицинские имплантаты.

Таблица 6 - Химический состав EOS Titanium Ti6Al4V

| Элемент | Содержание, % |
|---------|---------------|
| Ti      | остальное     |
| Al      | 5,5 - 6,5     |
| V       | 3,5 - 4,5     |
| Fe      | 0 - 0,25      |
| C       | 0 - 0,8       |
| O       | 0 - 0,13      |

|   |           |
|---|-----------|
| N | 0 - 0,05  |
| H | 0 - 0,012 |

Данный порошок титанового сплава используется для производства облегченных единичных изделий или небольших партий как для аэрокосмической и автомобильной промышленности, так и для изготовления имплантов и компонентов для медицины.

Примеры применения: компоненты с внутренней системой охлаждения, бионические изделия и костные протезы с биосовместимой структурой.

Таблица 7 - Технические данные EOS Titanium Ti6Al4V

| Характеристика                      | Значение                                 |
|-------------------------------------|------------------------------------------|
| Предел текучести, Re                | 900 - 1200 (Н/мм <sup>2</sup> )          |
| Предел прочности на разрыв, Rm      | 1100 - 1300 (Н/мм <sup>2</sup> )         |
| Удлинение A                         | 5 - 10 %                                 |
| Модуль Юнга                         | 110x10 <sup>3</sup> (Н/мм <sup>2</sup> ) |
| Теплопроводность $\lambda$          | 7 (Вт/м*К)                               |
| Коэффициент термического расширения | $9 \times 10^{-6}$ (К <sup>-1</sup> )    |

EOS Titanium Ti6Al4V из материала подобного этому производят протезы, так как имеют хорошую биосовместимость с организмом человека и в редких случаях вызывают аллергическую реакцию. Высокая биосовместимость обусловлена способностью титана в доли секунды образовывать на своей поверхности защитный оксидный слой. Благодаря которому он не корродирует и не отдаёт свободные ионы металла, которые способны вокруг имплантата или протеза вызывать патологические процессы.

***EOS StainlessSteel PH1*** – нержавеющая сталь для машиностроения и медицинской техники.

#### *Основная информация*

EOS StainlessSteel PH1 - это нержавеющая сталь. Химический состав соответствует 15-5 PH, DIN 1.4540 и UNS S15500. Этот вид стали, характеризуется отличными механическими свойствами, в особенности

осаждённый затвердевшем состоянии. Этот вид стали широко используется в различных медицинских, аэрокосмических и некоторых других инженерных целях, требующих высокой твёрдости и прочности.

*Свойства:*

- очень высокая прочность,
- твёрдость приблизительно равняется 45 HRC

*Применение:*

- функциональные прототипы,
- производство деталей мелкой серии,
- машиностроение,
- медицинские технологии.

Таблица 8 - Химический состав EOS StainlessSteel PH1

| Элемент | Содержание, % |
|---------|---------------|
| Fe      | 75            |
| Cr      | 14.48         |
| Ni      | 4.5           |
| Cu      | 3.5           |
| Mn      | ≤1            |
| Si      | ≤1            |
| Nb + Ta | 0.3           |
| C       | ≤0.07         |
| P       | ≤0.04         |
| S       | ≤0.03         |

Таблица 9 - Технические данные EOS StainlessSteel PH1

| Характеристика                     | Значение |
|------------------------------------|----------|
| Предельная прочность на растяжение | 1380 МПа |
| Модуль упругости                   | 200 ГПа  |
| Твердость по Викерсу               | 445      |

|                       |        |
|-----------------------|--------|
| Температура плавления | 1038°C |
|-----------------------|--------|

EOS Stainless Steel PH1 из материала подобного этому производят детали, обладающие высокой сопротивляемостью коррозии. В ее составе характерно содержание не менее 12% хрома, способствующего образованию на поверхности стойкой окисной пленки, предохраняющей сталь от окисления. Эта сталь хорошо сваривается и позволяет получать прочные, устойчивые к коррозии детали. Нержавеющая сталь в морском судостроении используется как заменитель цветных металлов и сплавов для изготовления облицовки гребных валов, лопаток турбин и т. п. (гребной вал, коленчатый вал).

***EOS NickelAlloy IN718*** – никелево - хромовый сплав для производства.

#### *Основная информация*

EOS NickelAlloy IN718 (инконель) это термоустойчивый сплав на основе никеля. Его состав соответствует UNS N07718, AMS 5662, AMS 5664, W.Nr 2.4668, DIN NiCr19Fe19NbMo3. Этот сплав имеет хорошими показателями на растяжение, усталость, ползучесть и ударную вязкость при температуре до 700°C. Материал обладает превосходной коррозионной стойкостью в различных агрессивных средах. Идеально подходит для применения в зонах повышенных температур, например, деталей газовых турбин, частей измерительных приборов, перерабатывающих механизмов. Кроме того, материал обладает отличными криогенными свойствами и потенциалом для применения в криогенных аппаратах.

#### *Свойства:*

- термостойкий,
- превосходная стойкость к коррозии,
- высокая производительность при температурах до 700 ° C (предел прочности на разрыв, усталость, ползучесть)

#### *Применение:*

- функциональные прототипы,
- производство деталей мелкой серии,

- авиастроение (например, компоненты высокотемпературных турбин).

Таблица 10 - Химический состав EOS NickelAlloy IN718

| Элемент | Содержание, % |
|---------|---------------|
| Ni      | основа        |
| Fe      | 18,5          |
| Cr      | 18,0          |
| Nb      | 5,20          |
| Mo      | 3,0           |
| Ti      | 0,90          |
| Al      | 0,50          |
| C       | 0,04          |

***EOS Nickel Alloy HX*** – никелевый сплав для аэрокосмической промышленности и машиностроительного производства.

#### *Основная информация*

EOS Nickel Alloy HX представляет собой порошок для работ на EOSINT M 280 системах. Никелево-хромово-железно-молибденовый сплав в виде мелкого порошка. Его состав соответствует UNS N06002. Этот тип сплава характеризуется высокой прочностью и стойкостью к окислению и при повышенных температурах и сохраняет свои свойства до 1200 °C. Может применяться в авиационно-космической техники, например, при создании деталей газотурбин. Стандартное лазерное спекание приводит к полному плавлению по всей площади с толщиной слоя 20 мкм. Детали, созданные из EOS Nickel Alloy HX, могут быть подвергнуты термообработке, в результате чего можно варьировать свойства материала. Детали могут быть подвергнуты искровой эрозии, сварке, микро дробеструйной обработке, полировке и нанесению покрытий, если это требуется. Неэкспонированный порошок может быть использован повторно.

#### *Свойства:*

- жаропрочный и коррозионностойкий,
- прочный и стойкий к окислению,
- возможна последующая термическая и механическая обработка.

*Применение:*

- функциональные прототипы,
- Быстрый ремонт,
- быстрое производство,
- авиационно-космической техника.

В промышленности может использоваться для деталей, которые работают в тяжелых термических условиях и с высоким риском окисления, например, камеры сгорания, компоненты горелки, вентиляторы и опорных элементов в промышленных печах.

Таблица 11 - Химический состав EOS Nickel Alloy NX

| Элемент | Содержание, % |
|---------|---------------|
| Ni      | основа        |
| Cr      | 23,0          |
| Fe      | 20,0          |
| Mo      | 10,0          |
| C o     | 2,50          |
| W       | 1,0           |
| Mn      | 1,0           |
| C       | 0,15          |
| Si      | 1,0           |
| P       | 0,04          |
| S       | 0,03          |

*EOS Nickel Alloy IN718* из материала подобного этому используют как листовой обшивочный материал для сверхзвуковых самолетов. Аналогом Inconel alloy 718 можно рассматривать отечественный сплав ХН45МВТЮБР ГОСТ 5632. Материал комбинирует высокую прочность и коррозионную

устойчивость с превосходной свариваемостью, а также отсутствие склонности к коррозионному растрескиванию околошовных сварных зон. Отличается высокой прочностью на разрыв при температурах до 700°C. Создавался как листовой обшивочный материал для сверхзвуковых самолетов. В настоящее время широко используется в газовых турбинах, ракетных двигателях, космических аппаратах, атомных реакторах, нефтехимической промышленности. Допускающему применение при любых сочетаниях концентрации сероводорода, хлоридов и pH производственной среды, при условии достижения сплавом предела текучести 1034 МПа.

### 1.3 Законы нагружения в узлах трения

Многие детали машин или механизмы, такие, как валы, подшипники, уплотнения зубья зубчатых колес работают в условиях, при которых возникающие в них напряжения имеют знакопеременные значения.

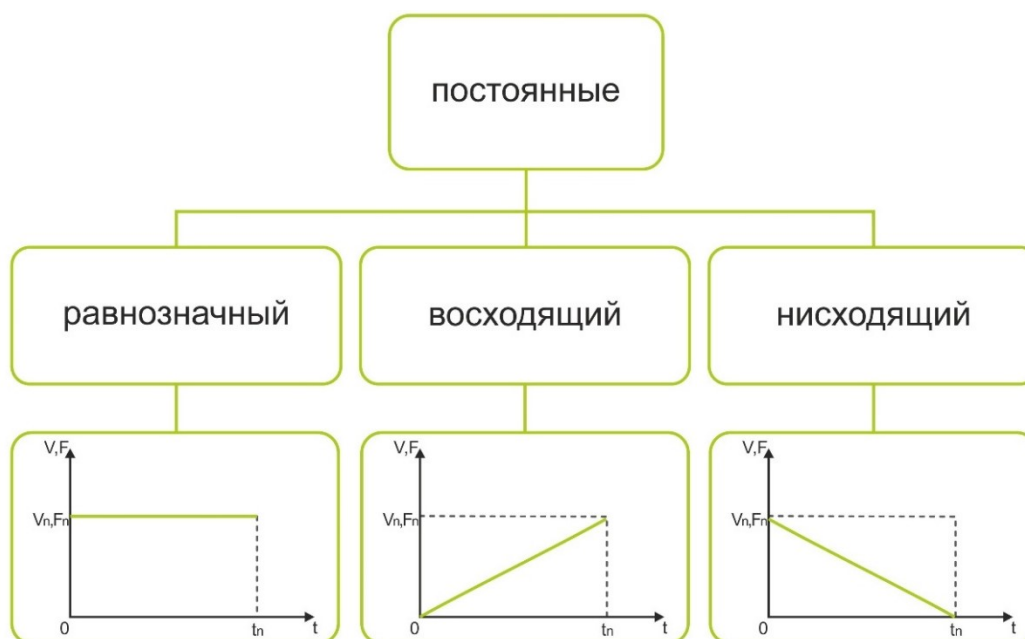
По характеру изменения во времени нагрузки в машинах делят на статические и динамические.

Характеристикой напряженности детали является *закон нагружения* (рисунок)- совокупность последовательных значений напряжений  $\sigma$  за один период при регулярном нагружении.



*Рисунок 1. Классификация законов нагружения.*

**Постоянные законы** - статические законы при которых нагрузка действует достаточно продолжительное время и скорость изменения (нарастания или убывания) значительно меньше скорости распространения деформации в конструкции.



*Рисунок 2. Структурная схема постоянных законов нагружения.*

Особенностью *равнозначного закона* является постоянно действующая, не изменяющаяся по величине, нагрузка. Данный закон обычно проявляется в работе узлов трения гидравлических ножниц, захватных механизмов промышленных роботов, различных гидравлических, пневматических и механических подъемных механизмах.

При действии *восходящего закона* нагрузка возрастает от нуля до максимума с постоянной интенсивностью. Проявление данного закона, замечается в разгонных механизмах испытательного оборудования на принципе работы требушета. Тормозная система ABS работает по такому принципу. В случае температурного нагружения, такой закон проявляется в работе тормозных систем, например, дисковые тормоза автомобиля.

Нисходящий закон является обратным восходящему, нагружение стартует с максимальной величины и сводится к нулю с постоянной интенсивностью.

**Пульсационный закон** - динамический закон (также имеет название отнулевой) при котором нагрузка изменяются от либо 0 либо от начального значения до любого положительного значения и обратно.

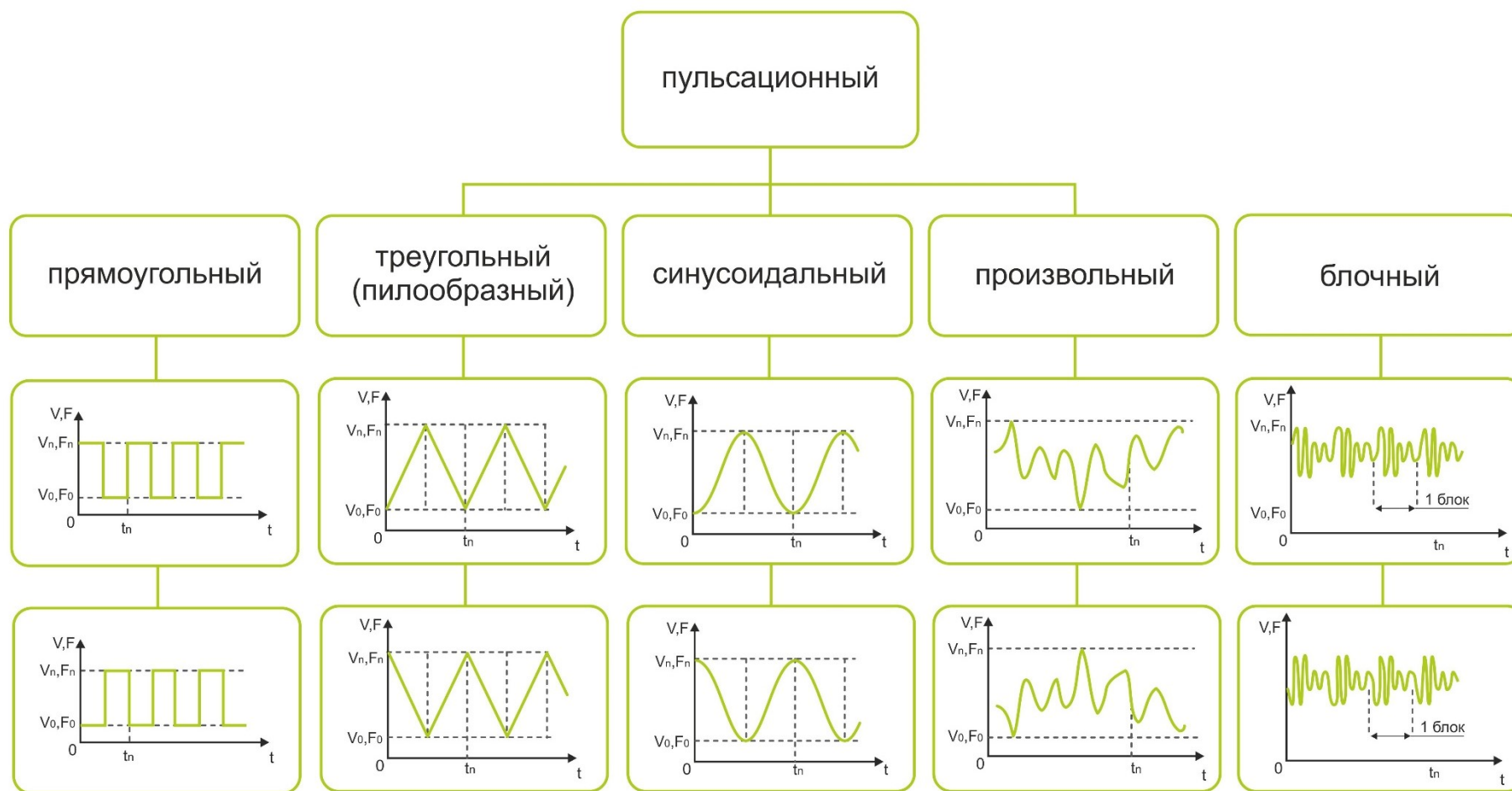


Рисунок 3. Структурная схема пульсационных законов нагружения.

Особенностью *прямоугольного закона* регулирования нагрузки является ступенчатое изменение нагрузки, и фиксирование ее, на заданное время до следующего изменения. Действие этого закона циклично. Применение данный закон находит в механизмах электромеханических релейных захватах, зажимах.

При действии *треугольного (пилообразного)* закона нагрузка возрастает (убывает) с определенной интенсивностью до заданного значения, а потом убывает (возрастает) с неизменной интенсивностью до начального значения и так цикл за циклом. Находит применение в различных кулачковых механизмах.

*Синусоидальный закон* является самым ярким примером пульсационных законов и его действие можно описать следующим образом: нагрузка возрастает и убывает по синусоиде (косинусоиде). Такой закон проявляется в работе зубьев зубчатых колес, работающих в одну сторону, штоков, толкателей и шатунов тихоходных машин, малонагруженных при обратном ходе.

*Произвольный закон* внешне не напоминает ни одну из геометрических фигур, при его действии нагружение абсолютно произвольно то возрастает то убывает. Этот закон находит применение практически во всех сложных машинах и механизмах, например, в двигателях внутреннего сгорания, коробках скоростей, редукторах, гидравлических и пневматических насосах.

*Блочный закон* является последовательностью блоков нагружения, которые могут состоять, как из одно и того же закона, так и из нескольких разных, такой закон редко проявляется в работе реальных машин и механизмов и применяется в основном на испытательных машинах и стендах.

#### *Знакопеременный закон*

Динамический закон, при котором, нагрузка меняет свое значение, а также направление действия, то есть, на графиках может находиться как в положительной плоскости, так и в отрицательной, например, значение изгиба при вращающихся валах.

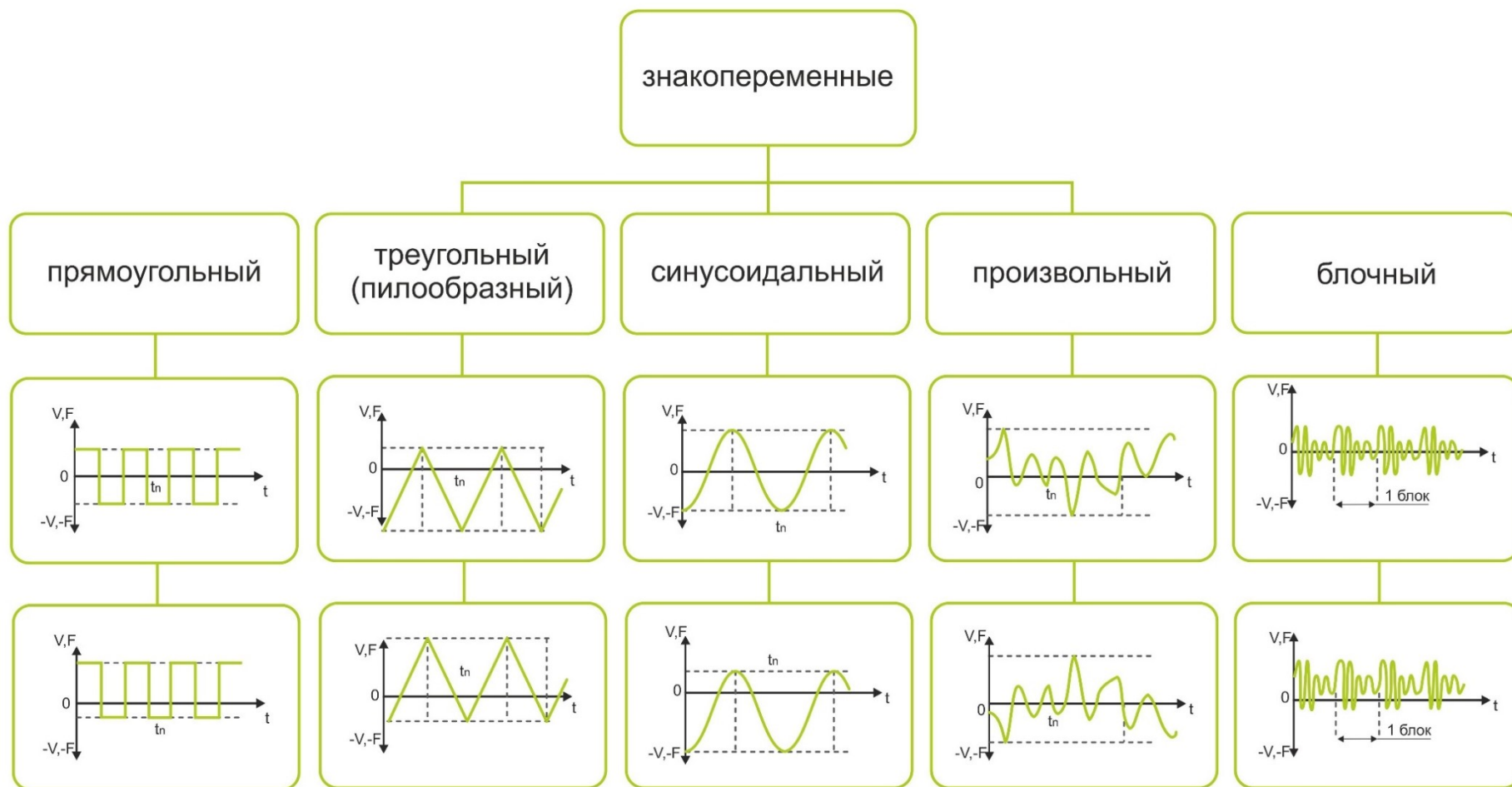


Рисунок 4. Структурная схема знакопеременных законов нагружения.

## 2. Объект и метод исследования

**Объект:** конструкционные материалы, узлы трения машин и механизмов, полученные посредством аддитивных технологий.

**Методы исследования:** исследования микроструктуры и пористости аддитивно полученных материалов (предварительно отшлифованных и отполированных, в случае исследования микроструктуры дополнительно ещё и травление в растворе кислоты) на инвертированном микроскопе Axio Vert A1, и в программе КОИ-1, взвешивание на весах My weigh 0.01 г для определения массы колодок до и после испытания для измерения износа, непосредственно определение коэффициента трения и исследование режимов работы на автоматизированном триботехническом комплексе.

## 3. Расчеты и аналитика

### 3.1 Описание математической модели изнашивания аддитивно полученных конструкционных материалов

Изнашивание является одной из главных причин нарушения эксплуатационных свойств конструкционных элементов и выход из строя машин и механизмов. Уменьшение износа путём выбора оптимальных материалов, покрытий, смазок или профилирования поверхностей имеет большое экономическое значение.

Несмотря на то, что на практике трение и износ тесно связаны, они являются качественно различными по природе явлениями. Это видно уже из того, что теоретически можно себе представить трение без износа. Например, в модели Прандтля-Томлинсона имеет место трение, но отсутствует износ. Изнашивание без трения также возможно, например, при приведении тел в нормальный контакт без касательного движения.

В большинстве случаев трение рассматривается как нежелательное явление. Оно, однако, может быть и основой различных технологических процессов, таких как шлифование, полирование или пескоструйная обработка. Принято различать следующие виды трения:

- Абразивное изнашивание имеет место в контакте двух тел с существенно различающимися твёрдостями или при наличии в промежуточной среде твёрдых частиц.
- Адгезионное изнашивание имеет место в контакте между телами, твёрдость которых одинакова или имеет один и тот же порядок величины.
- Коррозионное изнашивание связано с химической модификацией поверхности и последующим удалением поверхностного слоя.
- Усталостное изнашивание возникает при неоднократном нагружении поверхности в процессе скольжения или качения, при этом каждый отдельный цикл нагружения не приводит к заметным изменениям поверхности.

Так же стоит рассмотреть, какие фазы износа (рисунок 5) существуют и как выглядит типичная схема контакта и структура поверхностного слоя при трении двух поверхностей (рисунок 6). Это нужно для лучшего представления процессов трения и для введения полезных и правильных закономерностей в данной работе.

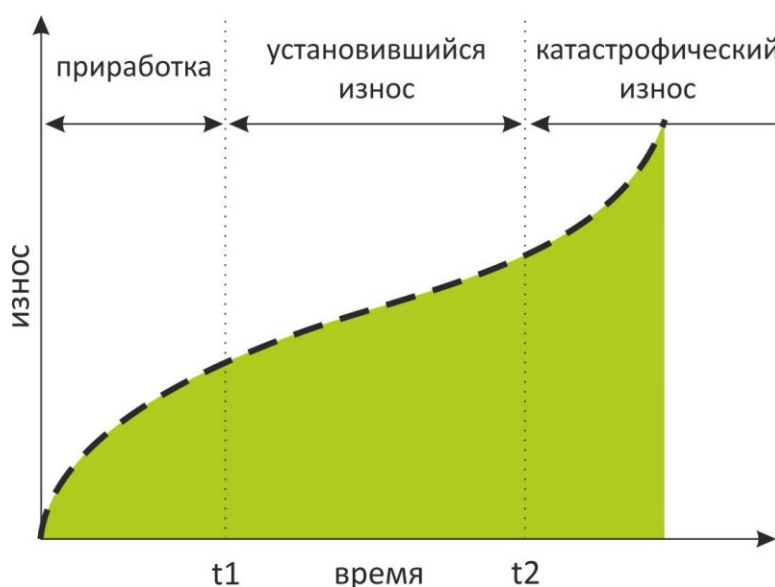


Рисунок 5. Типичная зависимость износа от времени испытания.

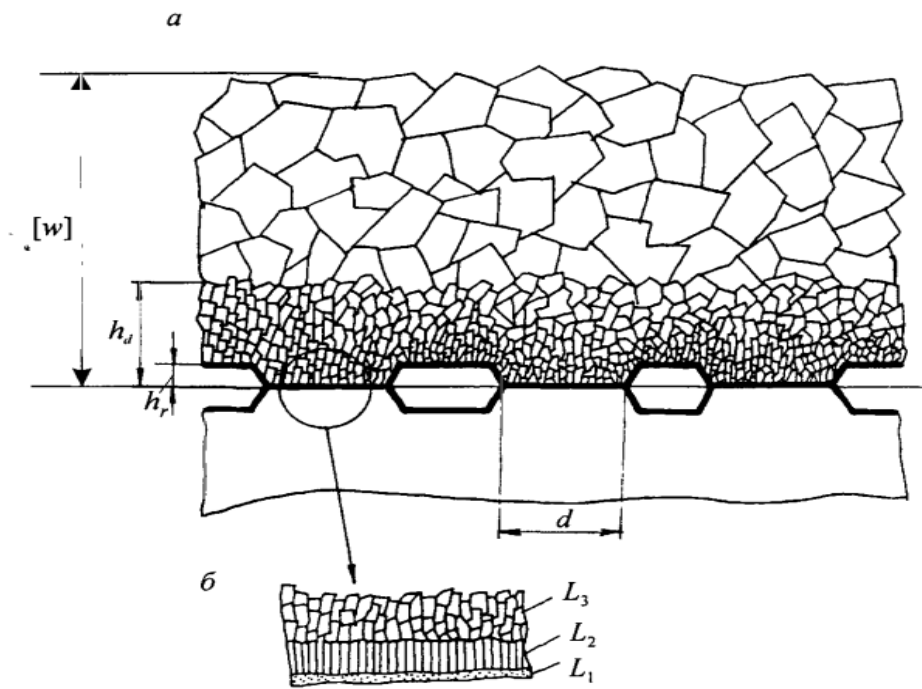


Рисунок 6. Схема контакта (а) и типичная структур поверхностного слоя (б) при взаимодействии двух шероховатых поверхностей: L1 – адсорбированной слой толщиной 10 нм; L2 – окисная плёнка толщиной 10-10<sup>2</sup> нм; L3 – сильно деформированный слой толщиной 10<sup>2</sup>-10<sup>3</sup> нм.

Рассмотрим обзор на математические представления о моделях изнашивания двух полупространств и начнём с такого параметра, как скорость износа.

Он определяется объёмом материала, удалённого с единицы площади поверхности в единицу времени. В общем случае скорость износа разных точек поверхности различна, поэтому вводится понятие скорости износа в рассматриваемой точке (x,y) поверхности, определяемой как:

$$\frac{dw_*}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta v_w(x,y)}{\Delta A \Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta w_*(x,y)}{\Delta t} \quad (1)$$

где  $\Delta A$  – элемент поверхности в окрестности рассматриваемой точки (x,y),  $\Delta v_w(x,y)$  – объём материала, изношенного с элемента поверхности  $\Delta A$  в течение интервала времени  $\Delta t$  (время износа),  $\Delta w_*(x,y)$  – линейный износ в точке (x,y), который характеризует глубину изношенного слоя в рассматриваемой точке за время  $\Delta t$ , то есть, изменения положений точки поверхности в направлении, перпендикулярном к границы материала.  $\frac{dw_*}{dt}$

определяет скорость изнашивания положения поверхности при износе. Если все точки поверхности находятся в одинаковых условиях и скорость износа во всех точках постоянна, величина  $\Delta v_w / \Delta A$  равна отношению полного объёма изношенного материала к площади поверхности трения.

Кроме того, иногда используется термин – интенсивность износа. Этот параметр характеризует объём материала, изношенного с элемента поверхности трения при прохождении единицы пути трения, то есть.

$$\frac{dw_*}{dl} = \lim_{\Delta l \rightarrow 0} \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta v_w}{\Delta A \Delta l} = \lim_{\Delta l \rightarrow 0} \frac{\Delta w_*}{\Delta l} \quad (2)$$

Где  $\Delta l$  – длина пути трения. Интенсивность износа величина безразмерная, изменяется в пределах от  $10^{-3}$  до  $10^{-13}$  в зависимости от свойства материалов и условий взаимодействия двух сред.  $\frac{dw_*}{dl} = 10^{-9}$  означает, что слой толщиной в 1 мкм изнашивается при скольжении на расстоянии 1 км. Между скоростью и интенсивностью изнашивания при постоянной скорости скольжения  $V$  имеет место такое соотношение:

$$\frac{dw_*}{dt} = V \frac{dw_*}{dl} \quad (3)$$

Характеристики износа при трении, приведённые выше, удобны для того, чтобы описать процессы изнашивания на макроуровне, так как: во-первых, они характеризуют непосредственно формоизменение поверхностного слоя и, во-вторых, являются непрерывными или кусочно-непрерывными функциями, то есть, относятся к классу функций, которые обычно используются при постановке контактных задач.

При всём не стоит забывать, что изнашивание зависит не только от параметров материалов, участвующих в паре трения. Многие исследования показывают, что линейный износ  $w_*$  является функцией структурных параметров  $\{S\}$  и внешних параметров  $\{X\}$ , то есть.

$$w_* = F(S, X) \quad (4)$$

Где  $\{S\}$  включает в себя структуру элементов (взаимодействующих тел, промежуточной и окружающей среды), их свойства (агрегатное состояние,

геометрические характеристики, поверхностные и объёмные свойства) и взаимодействие элементов структуры. {X} включает в себя нагрузку, скорость, время, температуру и т.д. Поэтому, скорость изнашивания зависит не только от свойств самого материала, но и условий, в которых происходит процесс трения.

Рассмотрим некоторые примеры уравнений износа, полученных теоретически в разные года (таблица 20)

*Таблица 12 - Уравнения износа, полученные теоретически*

| Автор                         | Уравнение износа                              | Механизм износа      |
|-------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------|
| Хольм (1946)<br>Арчард (1953) | $\frac{dw_*}{dt} = K \frac{pV}{H}$            | Адгезионный          |
| Крагельский<br>(1965)         | $\frac{dw_*}{dt} = K p^\alpha V (\alpha > 1)$ | Усталостный          |
| Рабинович<br>(1965, 1971)     | $\frac{dw_*}{dt} = K \frac{pV}{H}$            | Абразивный, фреттинг |
| Харрикс<br>(1976)             | $\frac{dw_*}{dt} = K p V$                     | Фреттинг             |

Приведены некоторые примеры уравнения износа, полученные теоретически при изучении различных механизмов изнашивания. В этой таблице Н – означает твёрдость материала, К – имеет определенное значение для каждого механизма изнашивания в модели, используемой для изучения. Как следует из приведенных в таблице уравнений, основными внешними характеристиками, влияющими на скорость изнашивания поверхности трения, являются контактное давление  $p$  и относительная скорость  $V$ .

Анализ большого количества уравнений износа, полученные как теоретически, так и на основании обработки результатов трибологических испытаний на износ, показывает, что в большинстве случаев зависимость

скорости износа от давления и скорости скольжения может быть обозначена в виде:

$$\frac{dw_*}{dt} = K_w p^\alpha V^\beta, \quad (5)$$

где  $K_w$ -коэффициент износа,  $\alpha$  и  $\beta$  – параметры. Величина  $K_w$ ,  $\alpha$  и  $\beta$  зависят от свойств материалов, фрикционных параметров трибосопряжения, температуры и так далее. Их значения для конкретного вида изнашивания могут быть определены на основании известных эмпирических и модельных уравнений износа (таблица 12).

### 3.1 Моделирование изнашивания

При моделировании механического изнашивания важно определить:

1. напряжённое состояние,
2. поле температур,
3. свойства материалов,
4. макро - и микрогеометрию поверхностей.

Рассмотрим алгоритм (блок-схему) изнашивания, на рисунке 7 изображено то, каким образом происходит изнашивание поверхности.

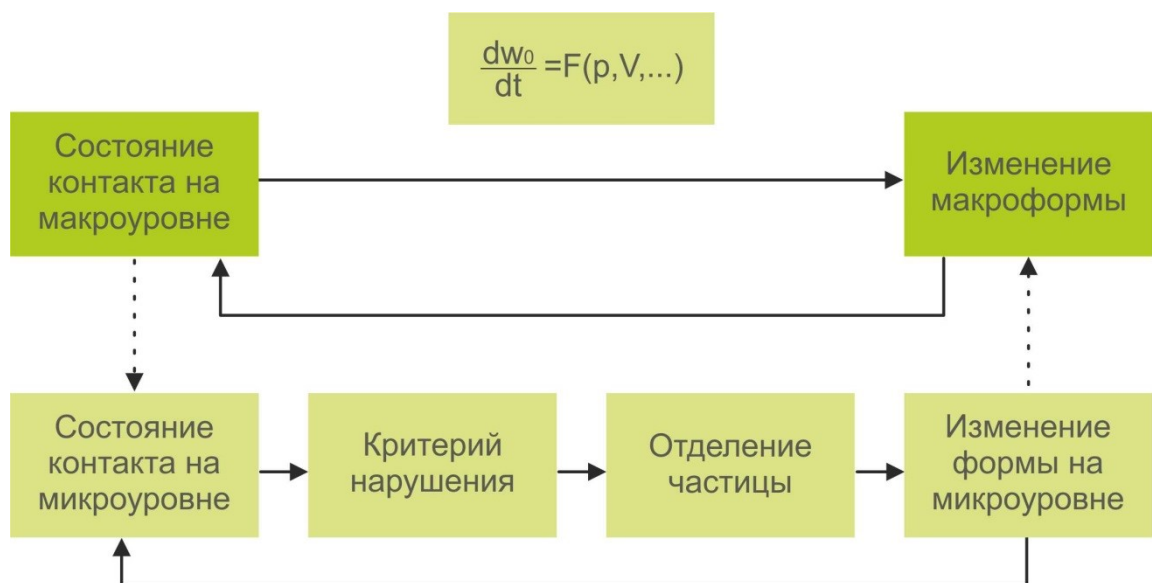


Рисунок 7. Основные этапы моделирования изнашивания и их взаимосвязь.

При расчёте износа важно помнить, что не все частицы, отделяющиеся с поверхности, уносятся из зоны трения. Моделирование перемещения отделившихся частиц в зоне трения и их влияния на процесс изнашивания на

микроуровне является сложной задачей, которую в данной работе рассматривать не будем.

### 3.2 Модель отслаивания при усталостном напряжении

Рассмотрим изнашивание упругого полупространства под действием распределённой по его поверхности нагрузки, циклически изменяющейся со временем. Возникающее внутри полупространства поле напряжений вызывает накопление усталостных повреждений в подповерхностных слоях. Посчитаем, что скорость накопления повреждений  $q = \partial Q / \partial t \geq 0$  есть функция амплитудного значения  $P(t)$  нагрузки и расстояния  $\Delta z$  от рассматриваемой точки до поверхности полупространства. Так как поле напряжений на бесконечности не будет существовать, то

$$\lim_{\Delta z \rightarrow +\infty} q(\Delta z, P) = 0. \quad (6)$$

Введём неподвижную систему координат  $Oxuz$ , связав плоскость  $Oxu$  с поверхностью полупространства в начальный момент времени  $t=0$  и направив ось  $Oz$  в глубь пространства. Позже посмотрим, как в процессе износа координата поверхности вдоль оси  $Oz$  будет меняться. Координата поверхности в неподвижной системе координат  $Oxuz$  будет описываться монотонно возрастающей кусочно-непрерывной функцией времени  $Z(t)$ , при этом  $Z(0)=0$ . Для каждого интервала  $[t_n, t_{n+1}]$  ( $n=0,1,2,\dots$ ) функция непрерывна. Поэтому определим функцию накопления повреждений при  $z > Z(t)$  как

$$Q(z, t) = \int_{t_n}^t q(z - Z(t'), P(t')) dt' + Q_n(z) \quad (7)$$

где  $Q_n(z) = Q(z, t_n)$  – повреждённость, имеющая место на глубине  $z$  в момент времени  $t_n$ ,  $0 \leq Q_n(z) < Q^*$ . Разрушение произойдёт в точке  $z^*$  промежутка  $[Z(t^*), +\infty)$ , где впервые (в момент времени  $t^*$ ) выполнится условие

$$Q(z^*, t^*) = Q^* \quad (8)$$

Где  $Q^*$  – некоторое критическое значение повреждённости, при котором происходит элементарный акт разрушения.

Изучим процесс изнашивания с начального момента времени  $t_0=0$ . Из уравнений (5) и (6) следует, что процесс разрушения определяется функциями  $q(\Delta z, P)$  и  $Q_0(z)$ , которые по предположению являются непрерывными.

Исследуем особенности функции  $Q(z, T)$  и соответственно процесса разрушения при разных видах функции  $q(z, P)$ . Если  $q(z-Z(t), P)$  и  $Q_0(z)$  монотонно убывают по  $z$ , т.е.  $\partial q / \partial z > 0$  и  $dQ_0 / dz \leq 0$ , условие (2) выполняется на границе  $z=Z(t)$  начиная с момента времени  $t=t_1$ , определяемого из соотношения

$$\int_0^{t_1} q(0, P(t')) dt' + Q_0(0) = Q^* \quad (9)$$

И  $Z(t)=0$  при  $t \leq t_1$ . Возникающее непрерывное изменение линейного размера тела  $z=Z(t)$  будем называть *поверхностным износом*.

Если одна из функций  $q(z-Z(t), P)$  или  $Q_0(z)$  не является монотонно убывающей по  $z$ , а имеет, например, максимум на некотором расстоянии от границы упругого пространства, условие (2) может выполняться во внутренней точке  $z=Z_1$  полупространства в момент времени  $t_1$ . В этом случае произойдет подповерхностное разрушение, заключающееся в отделении слоя толщины  $\Delta Z_1=Z_1$ . В последующие моменты времени будет иметь место непрерывное изменение линейных размеров  $Z(t)$  для значений  $(t > t_1)$  за счёт поверхностного износа. Для определения дальнейшего протекания процесса, при  $t > t_1$ , исследуем функцию  $Q(z, t)$ , определяемого соотношением (1) при  $z > Z_1$ , как и на предыдущем шаге и т.д. Если в некоторый момент времени  $t_n$  условие (2) снова окажется выполненным внутри тела в точке  $Z_n=Z(t_n+0)$ , ( $n=2,3,\dots$ ), то опять произойдёт отделение слоя конечной толщины, которая определяется выражением

$$\Delta Z_n = Z(t_n + 0) - Z(t_n - 0). \quad (10)$$

Следовательно  $Z(t)$ , в этом случае – кусочно-непрерывная функция.

### 3.3 Скорость поверхностного износа

Существует возможность определить скорость поверхностного износа  $dZ(t)/dt$  в каждом интервале  $(t_n, t_{n+1})$ , в котором функция  $Z(t)$  непрерывна. Для

этого получим уравнение для того, чтобы определить функцию  $dt/dZ$ . Поскольку  $Q(Z(t), t) \equiv Q^*$ , то

$$\frac{dt}{dZ} = -\frac{\partial Q}{\partial Z} / \frac{\partial Q}{\partial t} \quad (11)$$

Значения производных  $\frac{\partial Q}{\partial Z}$  и  $\frac{\partial Q}{\partial t}$  вдоль линии  $t=t(Z)$  можно найти дифференцируя выражение (5):

$$\frac{\partial Q}{\partial Z} = \int_{Z_n}^Z \frac{\partial q(Z-Z', P(Z'))}{\partial Z} \cdot \frac{dt}{dZ'} + \frac{\partial Q_n(Z)}{\partial Z} \quad (12)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial Z} = (0, P(t(Z))). \quad (13)$$

Из (8) и (9) получим следующее интегральное уравнение для определения функции  $dt/dZ$  в интервале  $[t_n, t_{n+1}]$ :

$$\frac{dt}{dZ} = -\frac{1}{q(0, P(t(Z)))} \left[ \int_{Z_n}^Z \frac{\partial q(Z-Z', P(Z'))}{\partial Z} \cdot \frac{dt}{dZ'} dZ' + \frac{\partial Q_n(Z)}{\partial Z} \right] \quad (14)$$

Уравнение при постоянной нагрузке  $P_0$ , то есть при  $P(t) \equiv P_0$ , есть интегральное уравнение Вольтера второго рода. Общее решение этого уравнения, полученное с помощью преобразования Лапласа-Карсона, дано в. Таким образом, если нам известны функции  $q(z, P)$  и  $Q_n(z)$ , мы можем аналитически описать процесс поверхностного износа. Рассмотрим пример процесс изнашивания, в котором монотонно убывающая функция  $q(z, P)$  имеет вид:

$$q(z, P) = \left(\frac{P}{P_*}\right)^N \cdot \frac{1}{T_*} \exp\left(-\frac{z}{a(P)} N\right), \quad (15)$$

где  $P_*$  и  $T_*$  - характерная нагрузка и соответствующее ей время до первого разрушения;  $a(P) > 0$  - величина, имеющая размерность длины и зависящая от действующей нагрузки  $P$ ,  $N$  - некоторая постоянная ( $N > 0$ ). Предположим, что  $Q_0(z) \equiv 0$  и что нагрузка  $P(t)$  является ступенчатой функцией, то есть:

$$P(t) = \begin{cases} P_0, & t < t_1 \\ P_1, & t \geq t_1, \end{cases} \quad (16)$$

где  $t_1 = T_*(P_*/P_0)^N$ . При  $t=t_1$  функция  $Q_1(z)=Q(z, t_1)$  может быть определена из уравнения (1):

$$Q_1(z) = \exp\left(-\frac{z}{a(P_0)}N\right). \quad (17)$$

Применив преобразования Лапласа по переменной  $z$ , определим скорость поверхностного износа при  $t > t_1$ . Учитывая вид образа функции  $q(z,P)$ :

$$L_{[q(z,P);p]} = \left(\frac{P}{P_*}\right)^N \cdot \frac{1}{T_*} \cdot \frac{p}{p + \frac{N}{a(P)}} \quad (18)$$

где

$$L[f(z);p] \equiv \int_0^{+\infty} \exp(-pz) f(z) dz, \quad (19)$$

Используя получим

$$L\left[\frac{dt}{dz};p\right] = \frac{NT_*}{a(P_0)} \cdot \left(\frac{P_*}{P_1}\right)^N \frac{p + \frac{N}{a(P_1)}}{p\left(p + \frac{N}{a(P_0)}\right)}. \quad (20)$$

Применяя обратное преобразование Лапласа, имеем:

$$\frac{dt}{dz} = \frac{NT_*}{a(P_0)} \left(\frac{P_*}{P_1}\right)^N \left[ \frac{a(P_0)}{a(P_1)} - \left(\frac{a(P_0)}{a(P_1)} - 1\right) \exp\left(-\frac{N}{a(P_0)}Z\right) \right]. \quad (21)$$

Интегрирование данного соотношения поможет установить связь между координатой  $Z$  поверхности и временем  $t$ :

$$t = \frac{NT_*}{a(P_1)} \left(\frac{P_*}{P_1}\right)^N Z - \left(\frac{a(P_0)}{a(P_1)} - 1\right) \left(\frac{P_*}{P_1}\right)^N T_* \left(1 - \exp\left(-\frac{N}{a(P_0)}Z\right)\right). \quad (22)$$

Из этого следует, что скорость поверхностного износа в рассматриваемом случае стремиться к постоянному значению при  $t \rightarrow +\infty$ , не зависящему от первоначального значения нагрузки  $P_0$ , т

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} \frac{dZ}{dt} = \frac{a(P_1)}{NT_*} \left(\frac{P_1}{P_*}\right)^N. \quad (23)$$

Данные результаты позволяют заключить, что при монотонно убывающей по  $z$  функции  $q(z,P)$  и начальной функции  $Q_0(z) \equiv 0$  имеет место только поверхностный износ данного полупространства.

### 3.4 Расчёт коэффициентов для уравнения

В величину  $N$  будут входить следующие свойства: коэффициент теплопроводности материала и пористость, так как для аддитивно полученных

материалов, используемых в трибосопряжениях, эти параметры несомненно важны.

#### *Расчёт теплопроводности материалов*

Теплопроводность композитного материала является суммой произведений теплопроводности каждого составляющего на его количество в общем объеме формула

$$\lambda_V = \lambda_A \cdot \eta_A + \lambda_B \cdot \eta_B \quad (24)$$

Расчёт коэффициента теплопроводности для аддитивно полученных материалов.

#### EOS Titanium Ti6Al4V

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{Titanium Ti6Al4V}} &= \lambda_{\text{Ti}} \cdot \eta_{\text{Ti}} + \lambda_{\text{Al}} \cdot \eta_{\text{Al}} + \lambda_V \cdot \eta_V + \lambda_{\text{Fe}} \cdot \eta_{\text{Fe}} + \lambda_C \cdot \eta_C + \lambda_O \cdot \eta_O + \lambda_N \\ &\quad \cdot \eta_N + \lambda_H \cdot \eta_H \\ \lambda_{\text{Titanium Ti6Al4V}} &= 0,87558 \cdot 22,3 + 0,065 \cdot 237 + 30,5 \cdot 0,045 + 79,9 \cdot 0,025 + \\ &\quad 0,008 \cdot 335 + 0,0013 + 0,1721 \cdot 0,0005 + 0,00012 \cdot 0,0243 = 40,9806577 = \\ &\quad 40,98 \text{ (Вт/м} \cdot \text{K)} \end{aligned}$$

#### EOS Stainless Steel PH1

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{Stainless Steel PH1}} &= \lambda_{\text{Fe}} \cdot \eta_{\text{Fe}} + \lambda_{\text{Cr}} \cdot \eta_{\text{Cr}} + \lambda_{\text{Ni}} \cdot \eta_{\text{Ni}} + \lambda_{\text{Cu}} \cdot \eta_{\text{Cu}} + \lambda_{\text{Mn}} \cdot \eta_{\text{Mn}} + \lambda_{\text{Si}} \cdot \eta_{\text{Si}} \\ &\quad + \lambda_{\text{Nb}} \cdot \eta_{\text{Nb}} + \lambda_C \cdot \eta_C + \lambda_P \cdot \eta_P + \lambda_S \cdot \eta_S \\ \lambda_{\text{Stainless Steel PH1}} &= 0,75 \cdot 79,9 + 94,5 \cdot 0,1448 + 0,045 \cdot 90,4 + 0,035 \cdot 401,9 + \\ &\quad 6,87 \cdot 0,01 + 0,01 \cdot 148 + 53,5 \cdot 0,003 + 0,0007 \cdot 335 + 0,0004 \cdot 14 + 0,0003 \cdot \\ &\quad 0,269 = 93,6909807 = 93,69 \text{ (Вт/м} \cdot \text{K)} \end{aligned}$$

#### EOS Nickel Alloy IN718

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{Nickel Alloy IN718}} &= \lambda_{\text{Ni}} \cdot \eta_{\text{Ni}} + \lambda_{\text{Fe}} \cdot \eta_{\text{Fe}} + \lambda_{\text{Cr}} \cdot \eta_{\text{Cr}} + \lambda_{\text{Nb}} \cdot \eta_{\text{Nb}} + \lambda_{\text{Mo}} \cdot \eta_{\text{Mo}} + \lambda_{\text{Ti}} \\ &\quad \cdot \eta_{\text{Ti}} + \lambda_{\text{Al}} \cdot \eta_{\text{Al}} + \lambda_C \cdot \eta_C \\ \lambda_{\text{Nickel Alloy IN718}} &= 90,4 \cdot 0,5386 + 79,9 \cdot 0,185 + 94,5 \cdot 0,18 + 53,5 \cdot 0,052 + \\ &\quad 139,8 \cdot 0,03 + 22,3 \cdot 0,009 + 237 \cdot 0,005 + 335 \cdot 0,0004 = 88,9772 = 88,98 \\ &\quad \text{(Вт/м} \cdot \text{K)} \end{aligned}$$

#### *EOS Aluminium AlSi10Mg*

$$\lambda_{\text{EOS Aluminium AlSi10Mg}} = \lambda_{\text{Al}} \cdot \eta_{\text{Al}} + \lambda_{\text{Si}} \cdot \eta_{\text{Si}} + \lambda_{\text{Mg}} \cdot \eta_{\text{Mg}} + \lambda_{\text{Fe}} \cdot \eta_{\text{Fe}} + \lambda_{\text{Mn}} \cdot \eta_{\text{Mn}} \\ + \lambda_{\text{O}} \cdot \eta_{\text{O}} + \lambda_{\text{Ti}} \cdot \eta_{\text{Ti}} + \lambda_{\text{Cu}} \cdot \eta_{\text{Cu}} + \lambda_{\text{Zn}} \cdot \eta_{\text{Zn}} + \lambda_{\text{C}} \cdot \eta_{\text{C}} + \lambda_{\text{Ni}} \cdot \eta_{\text{Ni}} \\ + \lambda_{\text{Pb}} \cdot \eta_{\text{Pb}} + \lambda_{\text{Sn}} \cdot \eta_{\text{Sn}}$$

$$\lambda = 237 \cdot 0,868 + 148 \cdot 0,11 + 120,4 \cdot 0,0045 + 79,9 \cdot 0,0055 + 6,87 \cdot 0,0045 + 0,002 \cdot 2,659 + 0,0015 \cdot 22,3 + 0,001 \cdot 401,9 + 0,001 \cdot 115 + 0,0005 \cdot 335 + 0,005 \cdot 90,4 + 0,0005 \cdot 35,1 + 66,7 \cdot 0,0005 = 223,7947 = 223,8.$$

### Пористость

Важно рассмотреть пористость, так как она отвечает за фактическую площадь контакта поверхностей трения. Для этого используем приложение, разработанное на кафедре МТМ, ИФВТ, НИ ТПУ КОИ - 1 (количественная обработка изображения), эти данные были выведены в главе объект и методы исследования.

Рассмотрим математическую модель износа, полученную в программе MathLAB (рисунок 39) и полученный график, который отображает количество изношенного материала по времени при одном обороте в АТК (рисунок 40).

```
%EOS Stainless Steel PH1
a=0.000021
P1=104

T2=7200|

l=223.8
q=0.14

N=l*q;

x1 = [0;30;60;90;120;150;180;210;220;240;255;270;300;330];
y1 = (-3*10.^(-9)*x1.^5)+(3*10.^(-6)*x1.^4)-(0.001*x1.^3)+(0.1049*x1.^2)+(2.0933*x1)+11.188;

P2=y1

Iznos=((a*P1)/(N*T2))*((P1/P2)^N)

plot(x1,y1,'r');
title('');
xlabel('Время');
ylabel('Износ');
grid on;
```

Рисунок 39. Математическая модель износа аддитивно полученного силумина.

Из анализа систем уравнений исходят следующие выводы:

- при постоянной нагрузке на узел трения (чего в не идеальном случае быть не может) весь процесс износа складывается из приработки и установившегося режима, но может возникнуть катастрофический износ (вследствие нагрузки, которая превышает рекомендуемую на узел),
- при работе узла в установившемся режиме износ имеет постоянные скорости износа на всех пятнах контакта, то есть воспроизводится микрогеометрия поверхности.

### 3.5 Описание технологии выращивания конструкционных материалов, используемой нами при подготовке испытываемых образцов.

В настоящее время наиболее используемыми в получении металлических деталей можно считать следующие аддитивные методы: лазерное спекание и вакуумно-дуговое напыление.

Электронно-лучевое напыление. Принцип действия электронно-лучевого испарителя: для формирования потока электронов предназначена электронная пушка (рисунок 8), состоящая из вольфрамового термокатода и фокусирующей системы. Внешний вид установки электронно-лучевого напыления представлен на рисунке 8.

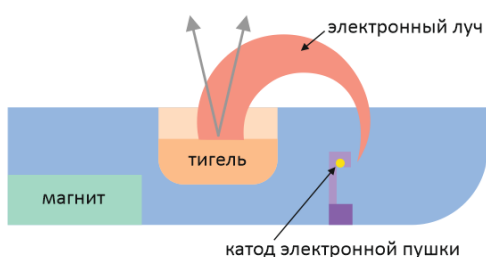


Рисунок 8. Схема электронно-лучевого испарителя.



Рисунок 9. Установка электронно-лучевого напыления Arcam Q10.

Электроны проходят эту систему, ускоряются за счет разности потенциалов до 10 кВ между катодом и анодом и формируются в электронный луч. Отклоняющую систему создает магнитное поле, перпендикулярное направлению движения выходящих из фокусирующей системы пушки электронов. Это поле направляет электронный луч в центральную часть водоохлаждаемого тигля, причем в месте падения луча создается локальная

зона разогрева и испарения вещества из жидкой фазы. Поток испарившегося материала осаждается в виде тонкой пленки на подложке, которая обычно располагается на определенном расстоянии над испарителем. Изменяя ток в катушке управляющего отклоняющей системой электромагнита, можно сканировать лучом вдоль тигля, что предотвращает образование «кратера» в испаряемом материале.

К недостаткам электронно-лучевого испарения следует отнести:

- высокое ускоряющее напряжение (порядка 10 кВ);
- вследствие затрат энергии на образование вторичных электронов низкий КПД установок (до 25% энергии первичного пучка), нагрев тигля, рентгеновское и УФ-излучение;
- при бомбардировке наносимых пленок вторичными электронами генерацию радиационных дефектов;
- по сравнению с магнетронным напылением низкую стехиометрию пленок;
- вследствие низкой энергии осаждаемых частиц плохую адгезию тонких пленок к основе;
- зарядение напыляемой поверхности статическим зарядом, который может вызвать пробой по пленке и нарушить ее адгезию;
- не высокую производительность.

К преимуществам метода относятся:

- возможность нанесения пленок металлов (в том числе тугоплавких), сплавов, полупроводниковых соединений и диэлектриков с температурой плавления вплоть до 3500°C;
- высокая скорость испарения веществ (от 1 до 10 нм/м) и возможность регулирования ее в широких пределах за счет изменения подводимой к испарителю мощности;
- возможность получения при высоком вакууме покрытий, практически свободных от загрязнений; их чистота определяется чистотой используемого для напыления материала;

- равномерность получаемых покрытий;
- свободная диффузия атомов вещества испарителя в рабочей камере, прямолинейное их движение без столкновения с остаточными молекулами компонентов воздуха и бесполезного рассеивания материала в объеме камеры, исключение химического взаимодействия напыляемого вещества с остатками воздуха.

Лазерное спекание. Выборочное лазерное спекание (SLS) – метод аддитивного производства, используемый для создания функциональных прототипов и мелких партий готовых изделий. Технология основана на последовательном спекании слоев (рисунок 10) порошкового материала с помощью лазеров высокой мощности. SLS зачастую ошибочно принимают за схожий процесс, называемый выборочной лазерной плавкой (SLM). Разница заключается в том, что SLS обеспечивает лишь частичную плавку, необходимую для спекания материала, в то время как выборочная лазерная плавка подразумевает полную плавку, необходимую для построения монолитных моделей.

Процесс включает использование трехмерных моделей в формате STL в качестве чертежей для построения физических моделей. Трехмерная модель подлежит цифровой обработке для виртуального разделения на тонкие слои с толщиной, соответствующей толщине слоев, наносимых печатным устройством. В качестве нагревательного элемента для спекания металлического порошка используются оптоволоконные лазеры относительно высокой мощности – порядка 200Вт. Некоторые устройства используют более мощные лазеры с повышенной скоростью сканирования (т.е. передвижения лазерного луча) для более высокой производительности. Возможно повышение производительности за счет использования нескольких лазеров.

Порошковый материал подается в рабочую камеру в количествах, необходимых для нанесения одного слоя. Специальный валик выравнивает поданный материал в ровный слой и удаляет излишний материал из камеры, после чего лазерная головка спекает частицы свежего порошка между собой и с

предыдущим слоем согласно контурам, определенным цифровой моделью. После завершения спекания слоя, процесс повторяется: валик подает свежий материал, лазер начинает спекать следующий слой. Привлекательной особенностью этой технологии является очень высокое разрешение печати – в среднем около 20 микрон.

Интересной особенностью процесса является отсутствие необходимости построения опор для сложных элементов конструкции. Не спеченный порошок не удаляется во время печати, а остается в рабочей камере. Таким образом, каждый последующий слой имеет опорную поверхность. Кроме того, неизрасходованный материал может быть собран из рабочей камеры по завершении печати и использован заново: производство можно считать фактически безотходным.

Технология практически не имеет ограничений по геометрической сложности построения, а высокая точность исполнения минимизирует необходимость механической обработки напечатанных изделий.

Технология обладает несколькими достоинствами по сравнению с традиционными производственными методами:

- возможность быстрого производства геометрически сложных деталей без необходимости механической обработки;
- производство практически безотходно, что выгодно отличает подобного рода печать от субтрактивных технологий;
- возможность создания нескольких моделей одновременно с ограничением по размеру рабочей камеры;
- построение моделей занимает порядка несколько часов, что несоизмеримо более выгодно, чем литейный процесс, который может занимать до нескольких месяцев с учетом полного производственного цикла.

С другой стороны, у технологии есть и свои недостатки:

- детали, произведенные лазерным спеканием, не обладают достаточной монолитностью, а потому не достигают тех же показателей

прочности, что и отлитые образцы, или детали, произведенные субтрактивными методами.

Технологии послойного лазерного спекания используется в промышленности ввиду возможности построения внутренних структур цельных деталей, недоступных по сложности традиционным методам производства. Детали с комплексной геометрией могут быть выполнены целиком, а не из составных частей, что благоприятно влияет на качество и стоимость изделий.

В данной исследовательской работе была задействована установка лазерного спекания фирмы Arcam AB - Arcam Q20, так как она имеет ряд преимуществ и широко представлена на российском рынке.

Arcam Q20 (рисунок 11) - разработка в области аддитивного производства Additive Manufacturing от фирмы Arcam AB. Она спроектирована для быстрого производства больших, сложных металлических деталей.

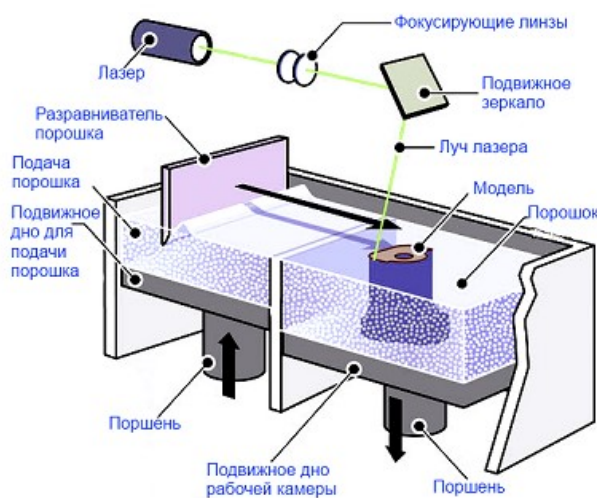


Рисунок. 10. Принцип работы принтера, основанного на лазерном спекании.



Рисунок 11. Установка лазерного спекания Arcam Q20.

Установка Arcam Q20 обеспечивает работу с различными сплавами: на основе титана, никеля, алюминия, а также сталями и некоторыми другими.

Наиболее показательными для триботехнических характеристик аддитивно полученных конструкционных материалов являются исследования структуры, пористости поверхности и твердости.

### 3.6 Исследуемые материалы

В рамках магистерской диссертации были рассмотрены материалы:

- EOS Stainless Steel PH1,
- EOS Titanium Ti6Al4V,
- EOS Aluminium AlSi10Mg,
- EOS CobaltChrome MP1,
- EOS Nickel Alloy IN718.

EOS Stainless Steel PH1 из материала подобного этому производят детали, обладающие высокой сопротивляемостью коррозии. В ее составе характерно содержание не менее 12% хрома, способствующего образованию на поверхности стойкой окисной пленки, предохраняющей сталь от окисления. Эта сталь хорошо сваривается и позволяет получать прочные, устойчивые к коррозии детали. Нержавеющая сталь в морском судостроении используется как заменитель цветных металлов и сплавов для изготовления облицовки гребных валов, лопаток турбин и т. п. (гребной вал, коленчатый вал).

EOS Titanium Ti6Al4V из материала подобного этому производят протезы, так как имеют хорошую биосовместимость с организмом человека и в редких случаях вызывают аллергическую реакцию. Высокая биосовместимость обусловлена способностью титана в доли секунды образовывать на своей поверхности защитный оксидный слой. Благодаря которому он не корродирует и не отдаёт свободные ионы металла, которые способны вокруг имплантата или протеза вызывать патологические процессы. (протезы).

EOS Aluminium AlSi10Mg из материала подобного этому, к примеру мелкодисперсный антифрикционный силумин, производят червячных, зубчатых колес и других деталей работающих в условиях трения. В паре со сталью износостойкость «антифрикционного силумина» больше, а коэффициент трения

и адгезионное схватывание меньше по сравнению с традиционной алюминиевой бронзой. (зубчатые и червячные колёса)

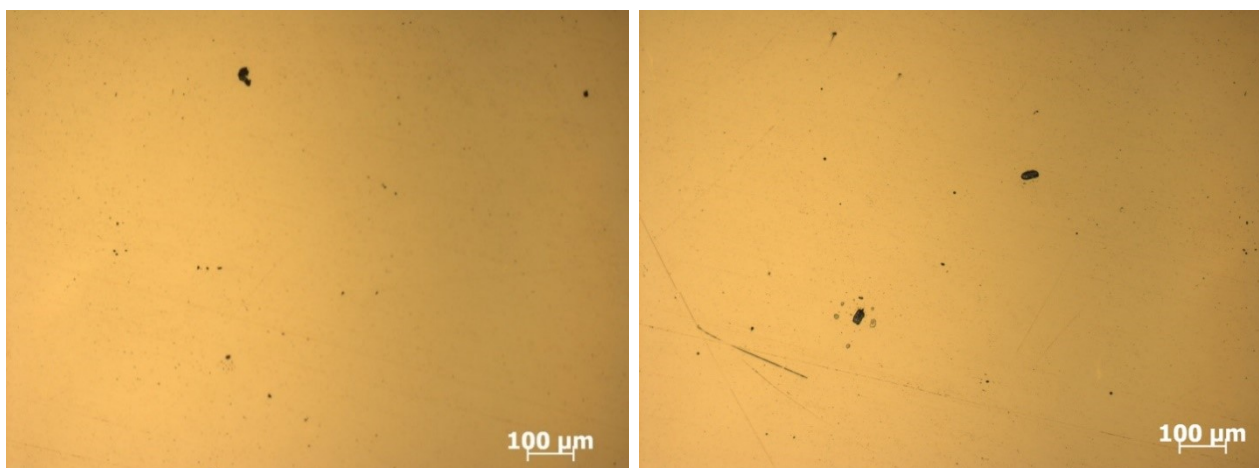
EOS CobaltChrome MP1 из материала подобного этому производят различные протезы. Самый распространённый неблагородный сплав, который применяется в стоматологии. Обладает положительными свойствами: очень легко-текучий, что позволяет отливать тонкие модели, высокая твёрдость, высокая эластичность, отсутствие коррозии, хорошо паяется. (протезы)

EOS Nickel Alloy IN718 из материала подобного этому используют как листовой обшивочный материал для сверхзвуковых самолетов. Аналогом Inconel alloy 718 можно рассматривать отечественный сплав ХН45МВТЮБР ГОСТ 5632. Материал комбинирует высокую прочность и коррозионную устойчивость с превосходной свариваемостью, а также отсутствие склонности к коррозионному растрескиванию околошовных сварных зон. Отличается высокой прочностью на разрыв при температурах до 700°C. Создавался как листовой обшивочный материал для сверхзвуковых самолетов. В настоящее время широко используется в газовых турбинах, ракетных двигателях, космических аппаратах, атомных реакторах, нефтехимической промышленности. Допускающему применение при любых сочетаниях концентрации сероводорода, хлоридов и pH производственной среды, при условии достижения сплавом предела текучести 1034 МПа.

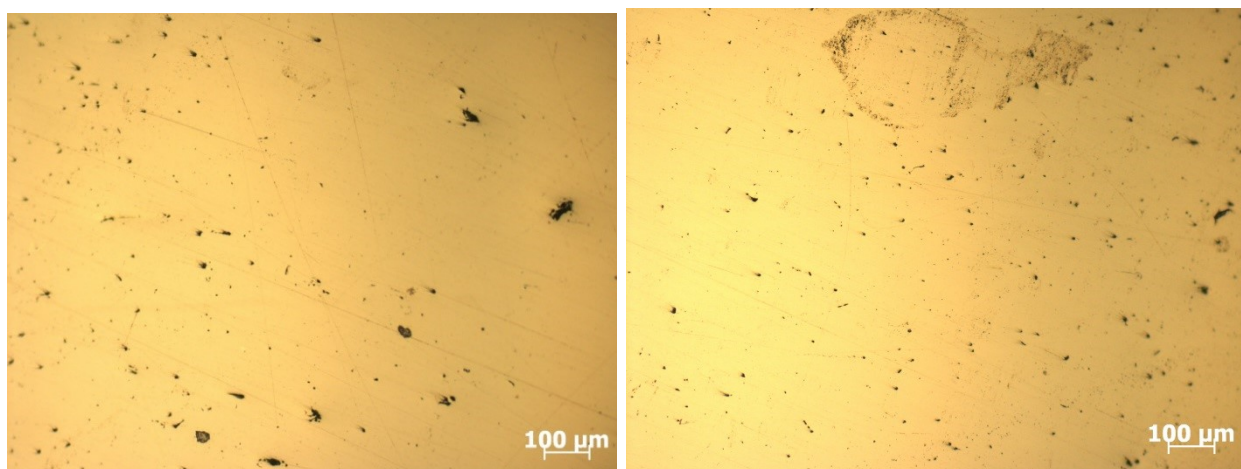
Данные материалы возможно применять в различных узлах трения в теории, но нужно привести исследования, которые дадут более полную картину.

### 3.7 Исследование пористости аддитивно полученных материалов

С точки зрения трибологических характеристик особый интерес представляет пористость, которая рассматривается на шлифованных и полированных образцах, подвергнутых обезжириванию техническим спиртом.



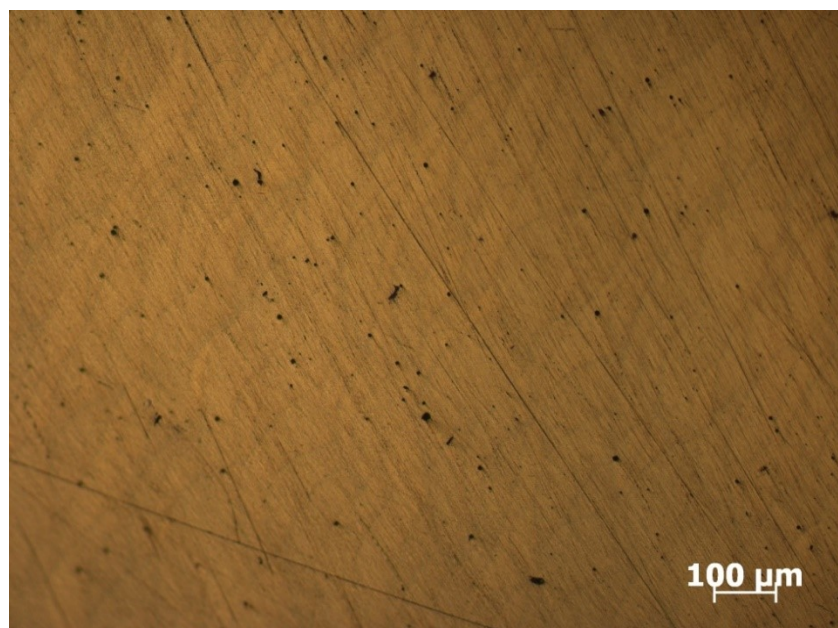
*Рисунок 12. Пористость материала EOS Cobalt Chrome MP1. Продольный срез.*



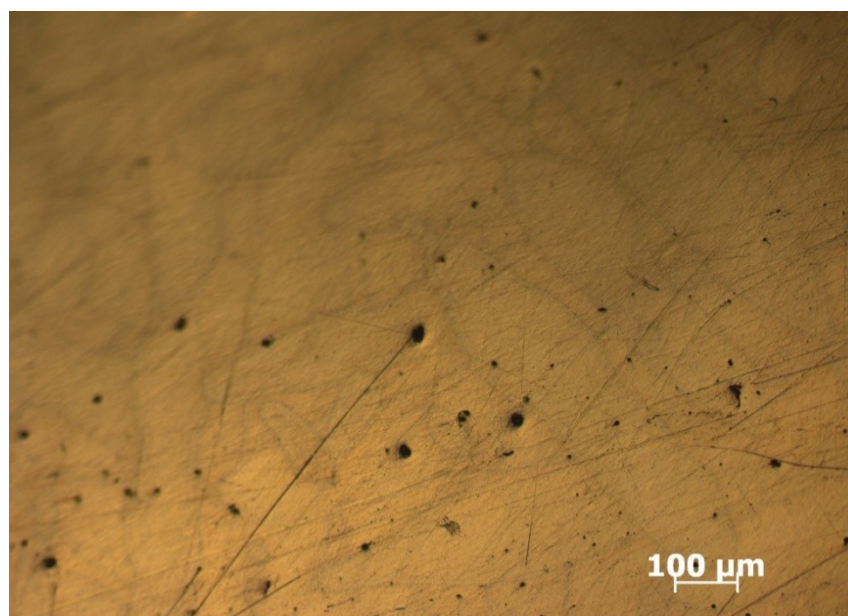
*Рисунок 13. Пористость материала EOS Cobalt Chrome MP1. Поперечный срез.*

Изучив пористость материала EOS Cobalt Chrome MP1, можно выделить несколько особенностей: на продольном, относительно печати, срезе количество пор небольшое, нет систематически распределённых участков, что означает хорошее спекание материала в одном слое.

На поперечном срезе расположено большое количество пор и их размеры несколько больше, чем у пор в продольном срезе, но крупных скоплений нет. Это объясняется тем, что температурный режим спекания для данного материала не является оптимальным: температуру следует увеличить, чтобы избежать повышенной пористости.



*Рисунок 14. Пористость материала EOS Aluminum AlSi10Mg. Продольный срез.*

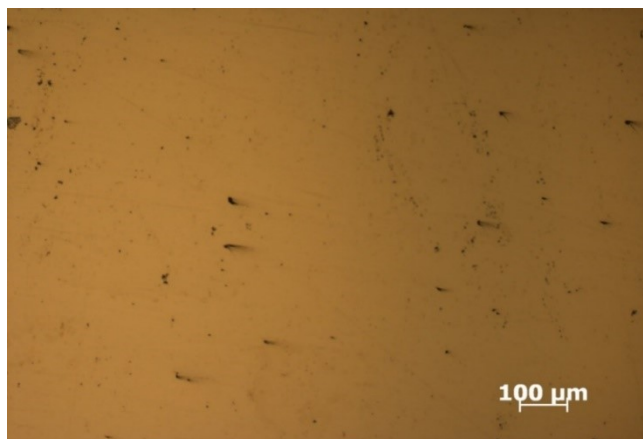


*Рисунок 15. Пористость материала EOS Aluminum AlSi10Mg. Поперечный срез.*

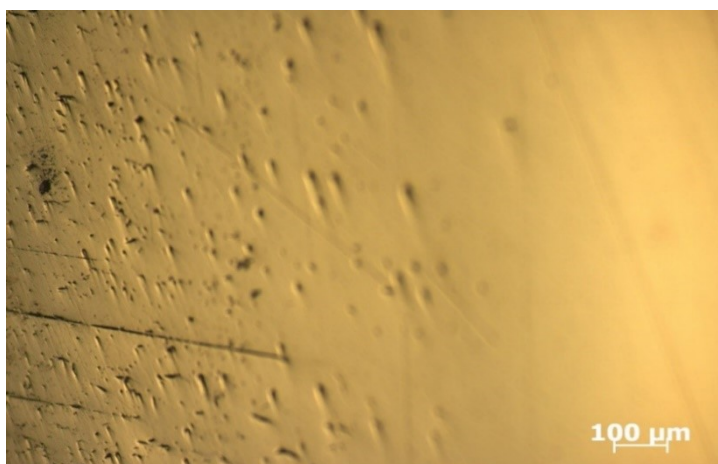
На продольном срезе образца из силумина наблюдаются небольшого размера поры, которые имеют место быть, так как одним из недостатков данного материала является повышенная пористость даже при литье, а не лазерном или вакуумно-дуговом спекании. В случае работы материала в паре трения данные характеристики могут и не являться недостатком, скорее, наоборот – в порах может задерживаться смазка, которая в теории продлит срок службы детали.

На поперечном срезе образца количество пор меньше, что свидетельствует о том, что даже при повышенной пористости материала,

правильно подобранный температурный режим может обеспечить производство качественной заготовки. Единственным недостатком поверхности является крупный размер пор, который может послужить причиной образования трещин.

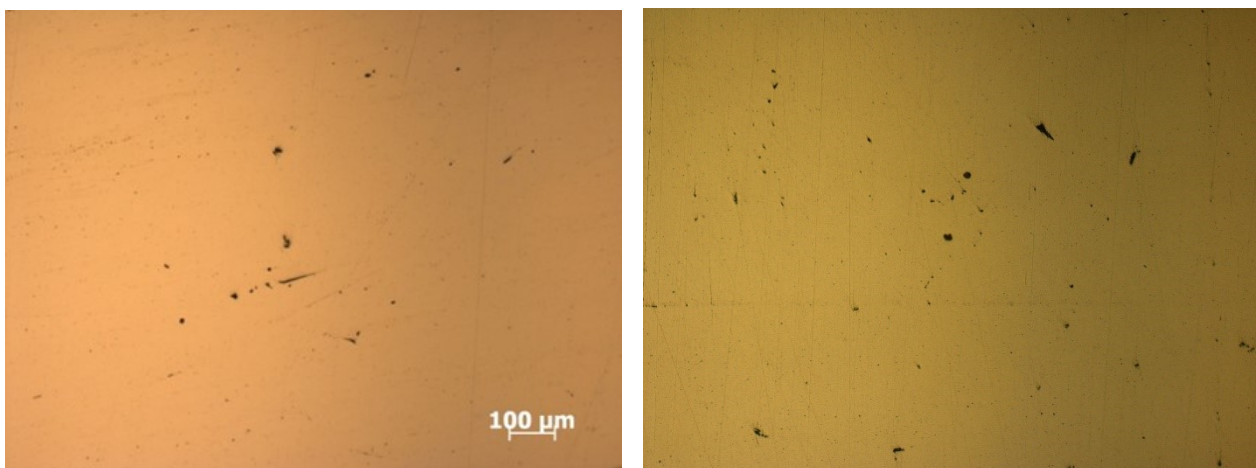


*Рисунок 16. Пористость материала EOS Nickel Alloy IN718. Продольный срез.*



*Рисунок 17. Пористость материала EOS Nickel Alloy IN718. Поперечный срез.*

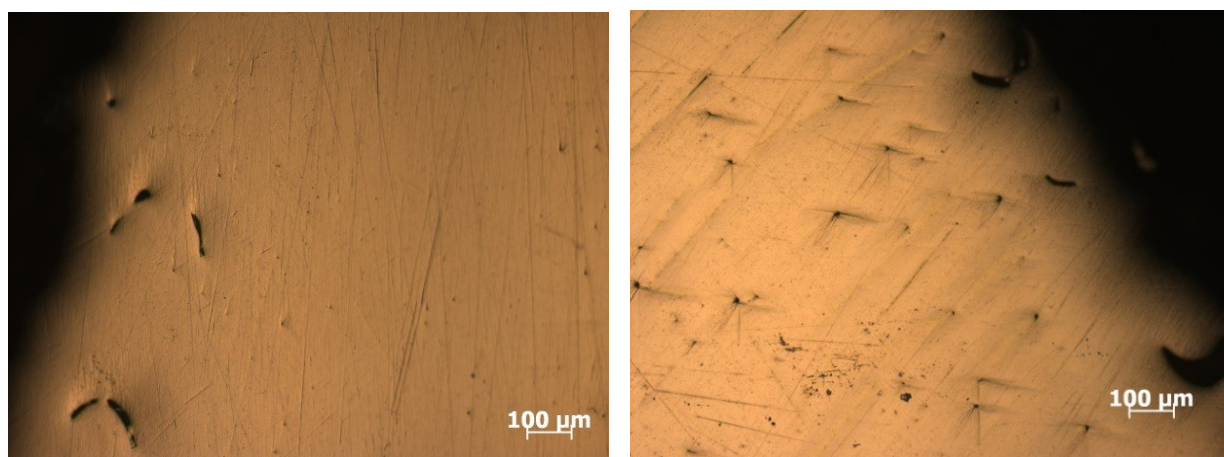
По расположению пор срез образца инконеля схожи с кобальтово - хромовым сплавом: на продольной плоскости поры мелкие и их небольшое количество, на поперечном срезе большое количество пор. Пористость можно уменьшить, увеличив температуру спекания.



*Рисунок 18. Пористость материала EOS stainless steel PH1. Продольный срез.*

Пористость стального образца в продольном срезе небольшая и нет крупных скоплений пор. Показатель пористости аддитивно полученных стальных образцов разительно не отличается от литых образцов, что свидетельствует о том, что напечатанные детали могут быть использованы в качестве ответственных деталей.

Что касается титанового сплава, то поры распределены следующим образом: крупные по периметру (рисунок 19), а мелкие в центре. Пористостью при печати можно управлять, но стоит помнить, что при увеличении пористости уменьшается прочность, что может негативно сказаться на деталях, работающих при ударных нагрузках.



*Рисунок 19. Пористость материала EOS Titanium Ti64Al4V. Поперечный срез.*

Показатели пористости для некоторых образцов в процентном составе были вычислены в программе КОИ (количественная обработка изображения, МТМ, ИФВТ, НИ ТПУ) и представлены в таблице 14.

Таблица 14 - Пористость EOS Nickel Alloy IN718

| EOS Nickel Alloy IN718   |       |       |                          |       |       |       |
|--------------------------|-------|-------|--------------------------|-------|-------|-------|
| Поперечный срез          |       |       | Продольный срез          |       |       |       |
| Светлая фаза, %          |       |       | Светлая фаза, %          |       |       |       |
| 98,81                    | 99,46 | 98,84 | 99,76                    | 99,52 | 99,87 | 99,82 |
| Среднее значение = 99,04 |       |       | Среднее значение = 99,74 |       |       |       |
| Тёмная фаза (поры), %    |       |       | Тёмная фаза, %           |       |       |       |
| 1,19                     | 0,54  | 1,16  | 0,24                     | 0,48  | 0,13  | 0,18  |
| Среднее значение = 0,963 |       |       | Среднее значение = 0,26  |       |       |       |

Таблица 15 - Пористость EOS Titanium Ti64Al4V

| EOS Titanium Ti64Al4V    |       |       |                          |       |       |
|--------------------------|-------|-------|--------------------------|-------|-------|
| Продольный срез          |       |       | Поперечный срез          |       |       |
| Светлая фаза, %          |       |       | Светлая фаза, %          |       |       |
| 99,86                    | 99,88 | 99,87 | 99,85                    | 99,89 | 99,81 |
| Среднее значение = 99,88 |       |       | Среднее значение = 99,85 |       |       |
| Тёмная фаза (поры), %    |       |       | Тёмная фаза, %           |       |       |
| 0,14                     | 0,12  | 0,13  | 0,15                     | 0,1   | 0,19  |
| Среднее значение = 0,13  |       |       | Среднее значение = 0,15  |       |       |

Таблица 16 - Пористость EOS Stainless steel PH1

| EOS Stainless steel PH1   |       |       |
|---------------------------|-------|-------|
| Поперечный срез           |       |       |
| Светлая фаза, %           |       |       |
| 99,72                     | 99,71 | 99,71 |
| Среднее значение = 99,713 |       |       |
| Тёмная фаза (поры), %     |       |       |
| 0,28                      | 0,29  | 0,29  |
| Среднее значение = 0,287  |       |       |

Анализируя данные таблиц и изображений шлифов в общем можно сказать, что пористость между слоями печати выше, чем в одном слое, это следует учитывать при выборе расположения детали в печатной камере. Процент пор не превышает 1% в поперечном и продольном направлении и поры имеют примерно одинаковый размер и геометрию, что свидетельствует о качественном спекании.

### 3.8 Исследование микроструктуры аддитивно полученных материалов

Изучение структуры аддитивно полученных материалов сводится к исследованиям протравленных (таблицы травителей для стали и титанового сплава таблица 17, 18) отшлифованных и отполированных образцов под инвертированным микроскопом Axio Vert A1.

*Таблица 17 - Водные растворы для травления сплавов титана*

| <b>Травитель</b>                                                                                                                                        | <b>Способ употребления</b>                                                                                                              | <b>Область применения</b>                                           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| FN (плавиковая кислота) 40%, 2 мл+ вода 98 мл                                                                                                           | Травление химическое: промывка в растворе: азотная кислота (d=1.4), 95 мл+                                                              | Для выявления структуры титановых сплавов                           |
| FN (плавиковая кислота) (40%), 5 мл+ HNO <sub>3</sub> (азотная кислота) (d=1,4), 5мл+ C <sub>3</sub> H <sub>5</sub> (OH) <sub>3</sub> (глицерин), 15 мл | Травление химическое протираанием 10-60 сек                                                                                             | Для выявления структуры сплавов с Al, Mo, V, Cr и др.               |
| FN (плавиковая кислота) (40%), 5 мл+ HNO <sub>3</sub> (азотная кислота) (d=1,4), 10 мл+ вода, 85 мл                                                     | Травление химическое в течение 10 – 15 с, промывка в 0,5% азотной кислоте                                                               | Для выявления структуры титановых α-сплавов                         |
| KOH (гидроксид калия), 20 г + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (пероксид водорода) (33%), 20 мл + вода, 60 мл                                              | Травление в подогретом до 40°C растворе: HNO <sub>3</sub> (азотная кислота) (d=1,4), 95 мл + FN (плавиковая кислота) (40%), 5 мл + вода | Для выявления структуры титановых α-сплавов и их сварных соединений |
| FN (плавиковая кислота) (40%), 5 мл+ HNO <sub>3</sub> (азотная кислота) (d=1,84), 1 мл+ вода, 94 мл                                                     | Травление химическое; промывка в 0,5 % HNO <sub>3</sub> , затем в воде                                                                  | Для выявления структуры титановых α-сплавов и их сварных соединений |
| FN (плавиковая кислота) (40%), 10 мл+ C <sub>3</sub> H <sub>5</sub> (OH) <sub>3</sub> (глицерин), 10 мл                                                 | Травление в течение нескольких минут                                                                                                    | Для выявления α-фазы в α+β-структурах                               |
| HOOC-COOH (щавелевая кислота) 35 г + FN (плавиковая                                                                                                     | Травление химическое в подогретом до 30°C растворе; промывка в 0,5 % HNO <sub>3</sub> , затем в воде                                    | Для структуры сварного соединения                                   |

|                                                                                                                                                        |                                                                                                                          |                                             |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| кислота), 2 мл+<br>CH <sub>3</sub> OH (метиловый спирт), 200 мл +<br>Fe(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> ·9H <sub>2</sub> O<br>(азотнокислое железо), 5г |                                                                                                                          |                                             |
| FN (плавиковая кислота) (40%), 5 мл+<br>H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (серная кислота) (d=1,84), 1 мл+<br>вода, 94 мл                                 | Травление химическое; промывка в растворе: азотная кислота (d=1,4), 95 мл +плавиковая кислота (40%), 5 мл, затем в воде. | Для выявления границ зёрен в сплавах титана |

Таблица 18 - Водные растворы для травления стали.

| Травитель                                                    | г/л     | Температура раствора | Время обработки |
|--------------------------------------------------------------|---------|----------------------|-----------------|
| Серная кислота (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )             | 90-130  | 30-40°C              | 0,5-1,0 ч       |
| Соляная кислота (HCl)                                        | 80-100  |                      |                 |
| Сухой спирт (C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> N <sub>4</sub> ) | 0,5     |                      |                 |
| Серная кислота (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )             | 150-200 | 25-60°C              | 0,5-1,0 ч       |
| Сухой спирт (C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> N <sub>4</sub> ) | 0,5     |                      |                 |
| Соляная кислота (HCl)                                        | 200     | 30-35°C              | 15-20 мин       |
| Сухой спирт (C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> N <sub>4</sub> ) | 0,5     |                      |                 |
| Соляная кислота (HCl)                                        | 150-200 | 30-50°C              | 15-25 мин       |
| Формалин                                                     | 40-50   |                      |                 |
| Сухой спирт (C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> N <sub>4</sub> ) | 0,5     |                      |                 |
| Азотная кислота (HNO <sub>3</sub> )                          | 70-80   | 50°C                 | 3-5 мин         |
| Соляная кислота (HCl)                                        | 500-550 |                      |                 |
| Сухой спирт (C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> N <sub>4</sub> ) | 0,5     |                      |                 |
| Азотная кислота (HNO <sub>3</sub> )                          | 100     | 85°C                 | 10 мин          |
| Серная кислота                                               | 50      |                      |                 |

|                                                              |     |      |           |
|--------------------------------------------------------------|-----|------|-----------|
| (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )                            |     |      |           |
| Соляная кислота (HCl)                                        | 150 |      |           |
| Сухой спирт (C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> N <sub>4</sub> ) | 0,5 |      |           |
| Соляная кислота (HCl)                                        | 150 | 50°C | 10-20 мин |
| Ортофосфорная кислота (H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> )      | 100 |      |           |
| Сухой спирт (C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> N <sub>4</sub> ) | 0,5 |      |           |

Структура аддитивно полученной нержавеющей стали (рисунок 20) имеет включения цементита (карбид железа, химическое соединение с формулой Fe<sub>3</sub>C.) похожа на структуру обычной ферритной стали хорошего качества (рисунок 21).

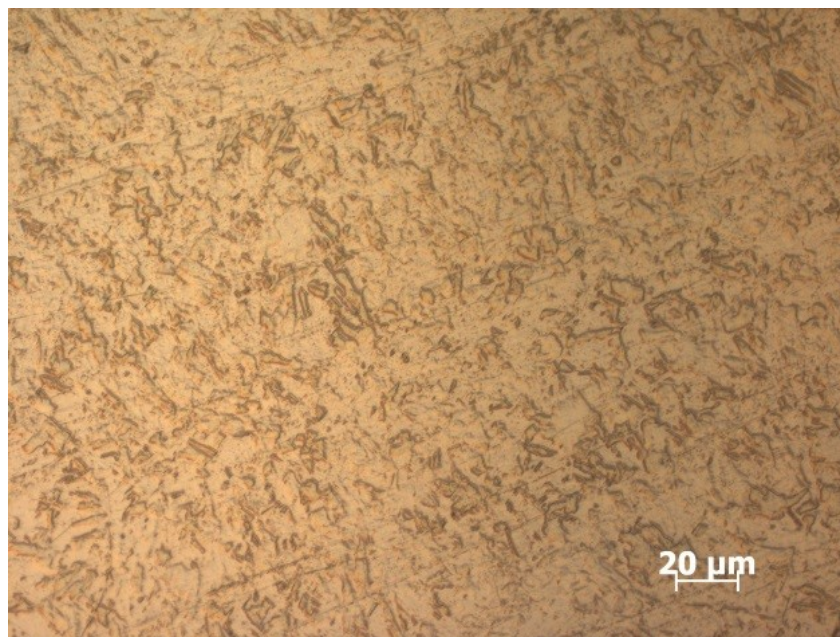
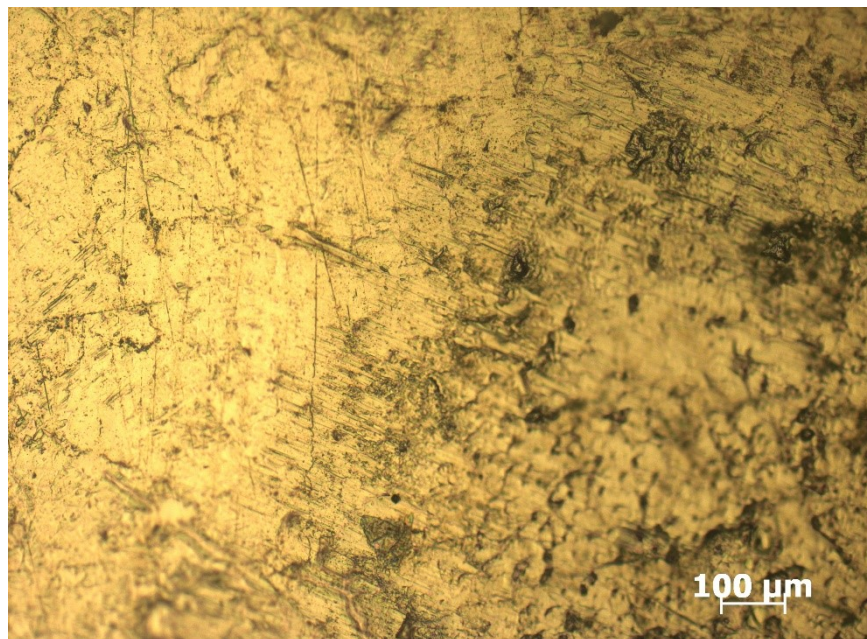


Рисунок 20. Структура EOS stainless steel PH1.

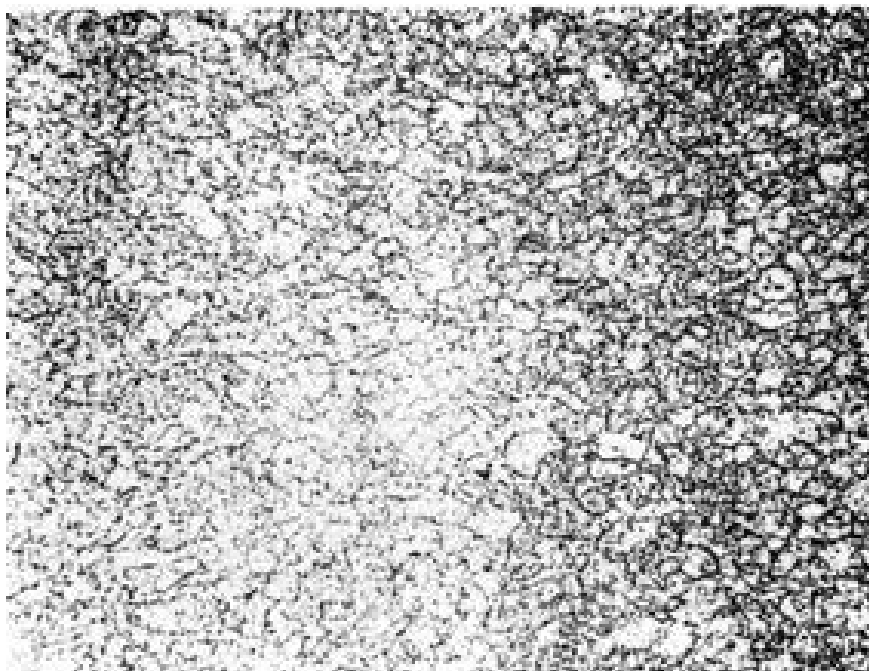


*Рисунок 21. Структура EOS stainless steel PH1.*

Структура титанового сплава (рисунок 22) не однородна, но имеет сходство со сплавами на основе титана (рисунок 23).



*Рисунок 22. Структура EOS Titanium Ti64Al4V.*



*Рисунок 23. Структура алюминиды титана  $Ti_{44}Al_5Nb_2Cr_{1,5}Zr_1B$ .*

По всем проведённым исследованиям можно сделать вывод, что образцы, полученные методом лазерного спекания, могут использоваться для изготовления деталей, так как обладают сравнительно схожими механическими свойствами и визуальная оценка пористости и микроструктуры также это подтверждает. Если говорить про более узкую направленность – исследование триботехнических свойств при динамических режимах нагружения узлов, то стоит исследовать образцы при работе на трение.

### 3.9 Методика работы с динамическими испытаниями

Сущность методики статических испытаний заключается в том, что основные триботехнические свойства конструкционных материалов и смазочных сред определяются за один цикл испытания. То есть, полный цикл содержит в себе три стадии испытаний (*антифрикционную, противоизносную и противозадирную*) с непрерывным переходом с одной стадии на другую. Осуществление непрерывного перехода с одной стадии испытаний на другую стало возможным благодаря возможностям современного исследовательского оборудования, управление которым полностью осуществляется от ЭВМ, например, автоматизированный триботехнический комплекс, разработанный в Томском политехническом университете и защищенный двумя патентами

Российской Федерации. В этом заключается первое основное отличие рассматриваемой методики от традиционных методик.

На рисунке 24 представлены два цикла испытания конструкционных материалов и смазочных сред в статическом режиме.

Первый режим характеризуется ступенчатым изменением либо нормальной нагрузки  $F_N$  на пару трения, либо скорости скольжения  $v_{ск}$ , либо одновременно обоих параметров на антифрикционной и противозадирной стадиях испытания. Отсюда следует, что вторым основным отличием данной методики от существующих является непрерывный переход с одного уровня нагрузки на другой. На противоизносной стадии испытания управляемые параметры остаются постоянными во времени.

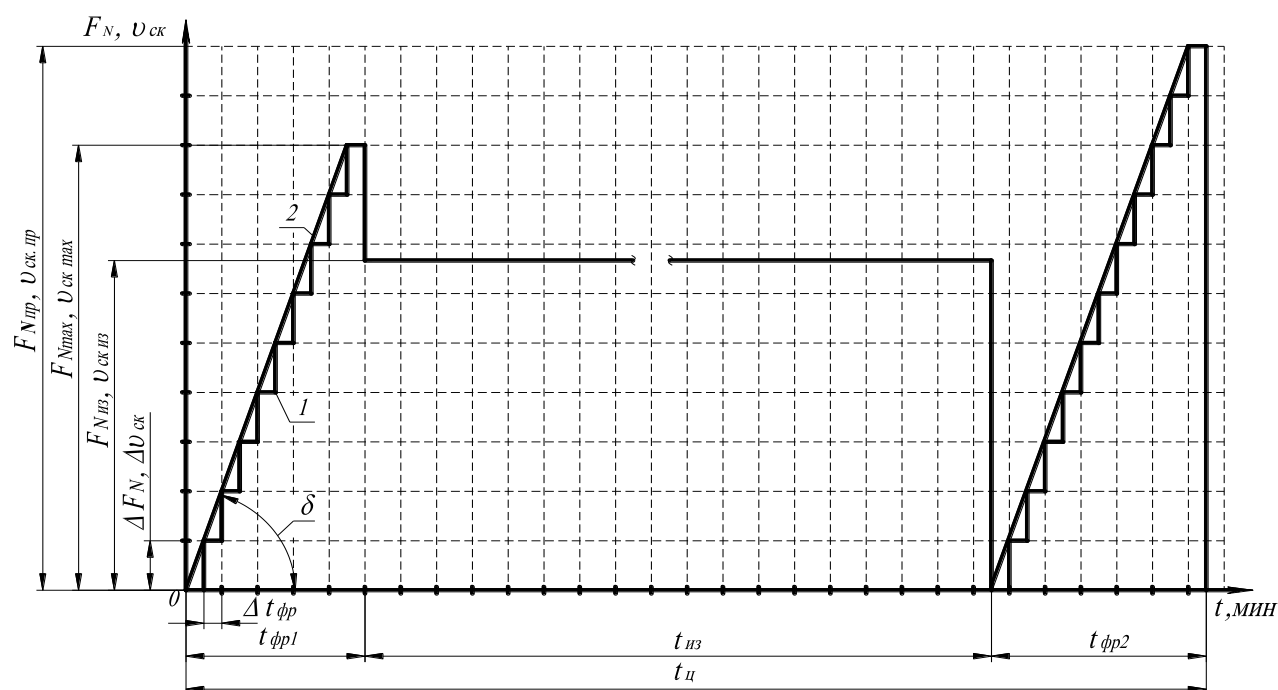


Рисунок 24. Циклы статических режимов испытаний: 1 – ступенчатый закон нагружение; 2 – линейный закон нагружения.

Второй режим статического испытания заключается в непрерывном изменении по линейному закону указанных выше управляемых параметров на антифрикционной и противозадирной стадиях испытания.

Первая (антифрикционная) стадия при ступенчатом изменении управляемых параметров характеризуется величиной приращения этих параметров ( $\Delta F_N$ ,  $\Delta v_{ск}$ ), действующего на протяжении времени  $\Delta t_{фр}$ .

Интенсивность нагружения узла трения  $z_c$  назначается исследователем и определяется исходя из максимальной величины управляемых параметров ( $F_{N_{\max}}$ ,  $v_{ск \max}$ ) по следующей формуле

$$z_c = \frac{F_{N_{\max}}}{t_{\phi p1}} = \frac{v_{ск \max}}{t_{\phi p1}}, \quad (25)$$

При непрерывно изменяющихся по линейному закону управляемых параметрах определяющим является угол приращения  $\delta$ , характеризующий интенсивность приращения их величины, определяемый в виде:

$$\delta = \arctg\left(\frac{F_{N_{\max}}}{t_{\phi p1}}\right), \quad (26)$$

Вторая (*противоизносная*) стадия характеризуется постоянной величиной управляемых параметров ( $F_{N_{из}}$ ,  $v_{ск из}$ ) действующей на протяжении времени  $t_{из}$ .

Третья (*противозадирная*) стадия является увеличенной антифрикционной стадией, характеризующейся предельной величиной управляемых параметров ( $F_{N_{пр}}$ ,  $v_{ск пр}$ ), соответствующих режиму схватывания элементов пары трения.

Ступенчатое изменение управляемых параметров позволяет проследить изменение регистрируемых параметров и возможность пары трения приспосабливаться к изменяющимся условиям работы на каждой ступени за время  $\Delta t_{\phi p}$ . В свою очередь, непрерывное изменение управляемых параметров позволяет проследить изменение регистрируемых параметров, исключая возможность приспособления пары трения к изменяющимся условиям работы. Противозадирная стадия испытания позволяет не только определить предельные значения управляемых параметров ( $F_{N_{пр}}$ ,  $v_{ск пр}$ ), но и произвести сравнительную оценку антифрикционных свойств до противоизносной стадии и после нее.

Методика проведения статических испытаний для получения высокой точности и надежности предусматривает следующую последовательность испытаний двух одинаковых пар трения. Перед началом испытаний производят приработку элементов пары трения на режимах, исключающих появление

заметных структурных изменений в поверхностных слоях конструкционных материалов. Затем температуру смазочной среды выводят на уровень, который будет поддерживаться стабильным в течение всего цикла испытания. После этого, формируют цикл испытания, задавая определяющие параметры для каждой стадии испытания, при этом необходимо учесть следующее:

- *величина управляемых параметров ( $F_{Nmax}$ ,  $v_{ск max}$ ) на антифрикционной стадии должна составлять не более 85% от ориентировочно определенных предельных значений управляемых параметров ( $F_{Nпр}$ ,  $v_{ск пр}$ ), для чего необходимо одну из подготовленных пар трения предварительно протестировать по противозадирной стадии испытаний;*
- *величина управляемых параметров ( $F_{Nиз}$ ,  $v_{ск из}$ ) на противоизносной стадии испытания должна составлять не более 85% от максимальной величины этих параметров ( $F_{Nmax}$ ,  $v_{ск max}$ ) на антифрикционной стадии;*
- *длительность антифрикционной стадии  $t_{фр1}$  должна составлять не более 5% от длительности противоизносной стадии  $t_{из}$ ;*
- *длительность противозадирной стадии  $t_{фр2}$  заранее не известна и назначается такой, чтобы ее хватило для достижения схватывания элементов пары трения.*

Сущность методики испытаний пар трения в динамических режимах идентична методике статических испытаний, описанной выше. Разница состоит лишь в законе изменения управляемых параметров. Это объясняет третье основное отличие рассматриваемой методики испытаний.

Данная методика динамических испытаний предусматривает два вида режимов испытаний, отличающихся друг от друга, как было указано выше, законом изменения управляемых параметров.

В первом виде испытаний предусматривается использование широко известных в теории законов нагружения (*синуса, косинуса, треугольника и т.д.*). На рисунке 25 представлен первый вид динамического режима испытаний с использованием синусоидальной функции.

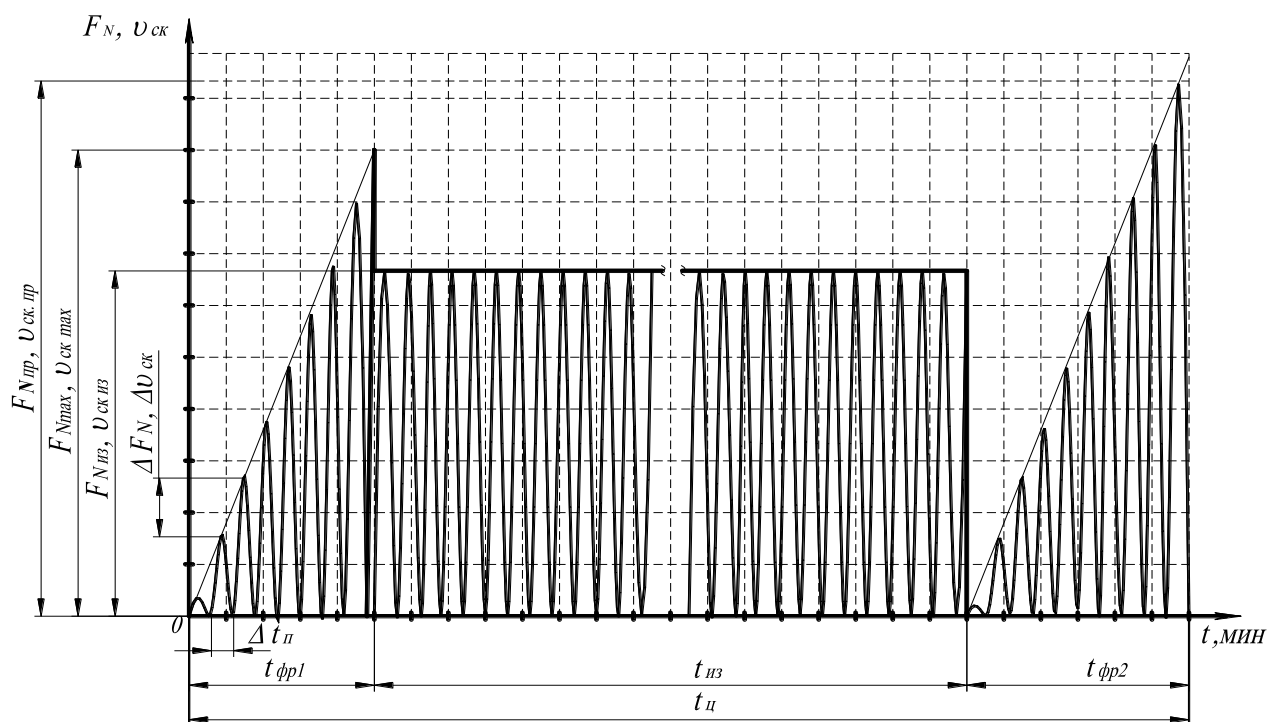


Рисунок 25. Цикл динамического режима испытаний с использованием синусоидальной функции.

Во втором виде динамических испытаний предусматривается реализация условий максимально приближенных к реальным условиям функционирования узлов трения машин и механизмов. На рисунке 26 представлен второй вид динамического режима испытаний, имитирующего условия работы пары трения “коленчатый вал – коренной вкладыш” двигателя внутреннего сгорания.

Основной величиной, характеризующей протекание динамического режима испытаний, является частота изменения управляемых параметров, которая определяется по следующей формуле

$$\chi_{F_N, v_{ск}} = \frac{1}{t_n}, \quad (27)$$

Первая (антифрикционная) стадия при динамическом изменении управляемых параметров характеризуется величиной приращения управляемых параметров за один период, длительностью  $t_n$ . Интенсивность изменения управляемых параметров  $z_d$  определяется максимальной величиной управляемых параметров ( $F_{Nmax}, v_{ск max}$ ) по следующей формуле

$$z_0 = \frac{F_{N_{\max}}}{t_n} = \frac{v_{ck_{\max}}}{t_n}, \quad (28)$$

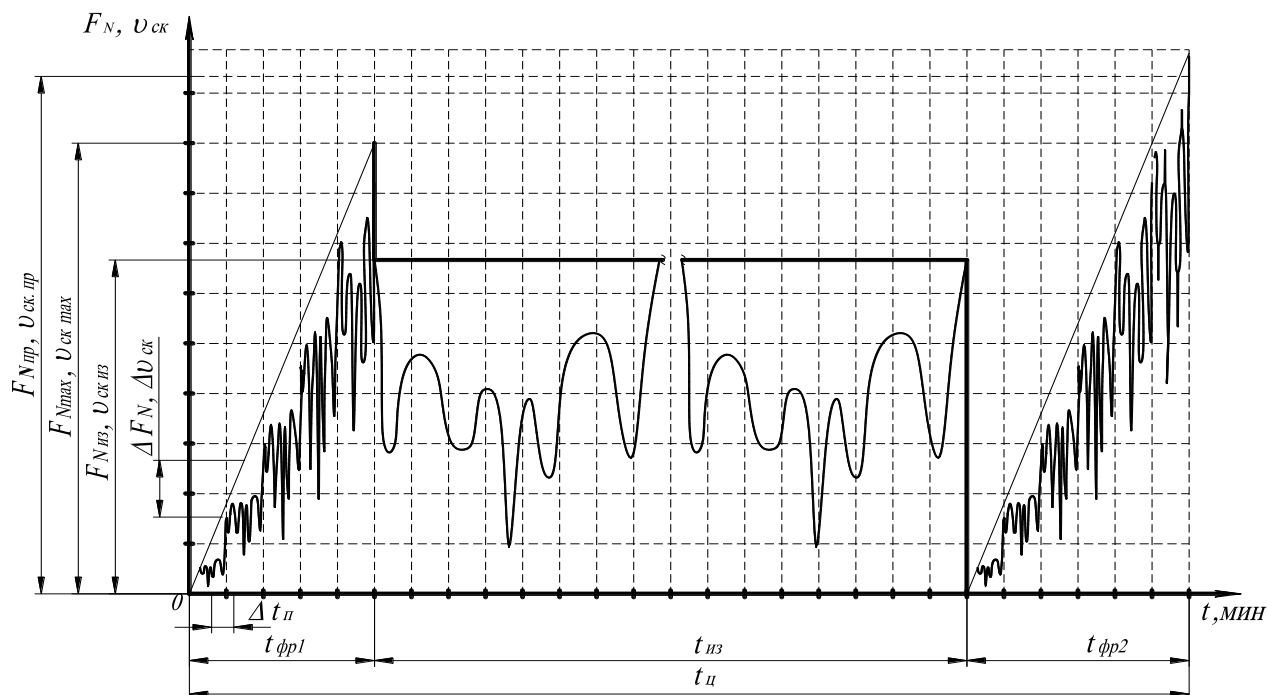


Рисунок 26. Цикл динамического режима испытаний, имитирующий условия работы пары трения “коленчатый вал – коренной вкладыш” двигателя внутреннего сгорания.

Противоизносная и противозадирная стадии триботехнических испытаний аналогичны стадиям, описанным выше в методике статических испытаний.

Динамическое изменение управляемых параметров позволяет проследить динамику изменения регистрируемых параметров и возможность пары трения приспосабливаться к изменяющимся условиям работы в течение каждого рабочего периода  $\Delta t_p$ . Кроме того, динамическое изменение управляемых параметров по законам, максимально приближенным к реальным, позволяет судить о процессах, происходящих в узлах трения технических систем с максимальной достоверностью.

### 3.10 Описание АТК

АК реализует идею распознавания состояния трибосистемы, воспринимая сигналы от датчиков и формируя ряд диагностических признаков, в зависимости

от которых определяется состояние трибосистемы и значение ее внутренних параметров, дает заключение о возможности дальнейшей эксплуатации.

Анализ исследований различных программно-управляемых машин и механизмов, выполненных в научных организациях, на промышленных предприятиях, а также в вузовских лабораториях, показывают, что наиболее целесообразным методом улучшения технологических характеристик их систем и приводов является подробное теоретическое и экспериментальное исследование определенных конструкций. В результате этого определяются пути модернизации исследуемой конструкции и разрабатываются более совершенные системы и приводы, а также методы управления ими. Аналогичная задача решалась при создании АК путем определенного изменения программно-задаваемых законов на основании теоретических и экспериментальных исследований, для обеспечения требуемой коррекции динамических характеристик и возможности получения на выходе необходимых законов управления системами комплекса, являющимися максимально приближенными к реальным условиям функционирования пар трения современной техники.

Созданный АК позволяет производить триботехнические испытания по трем схемам трения, представленным на рисунке 26.

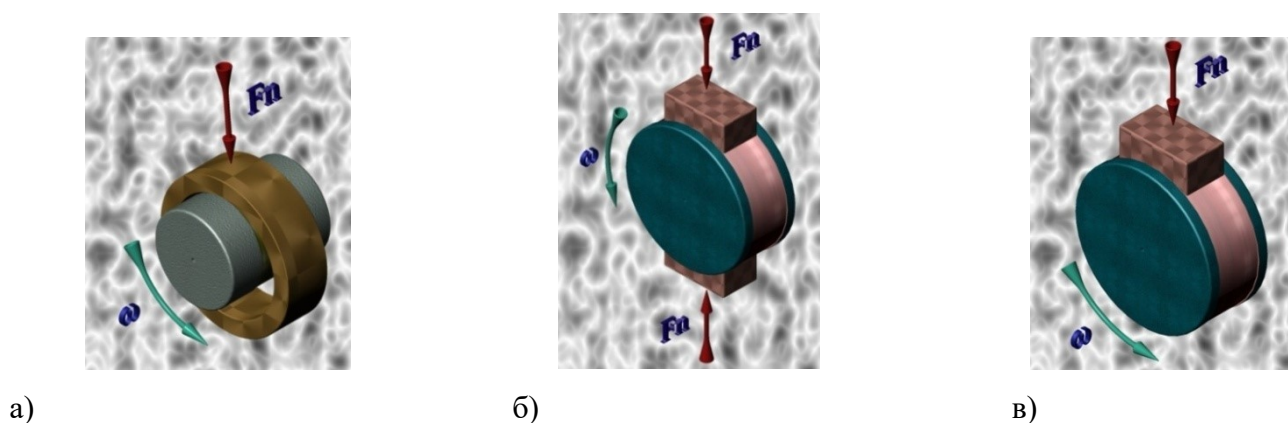


Рис. 26. Схемы трения: а – «вал – штырь»; б – «вал – колодки»; в – «вал – колодка»;  $F_n$  – усилие нормального нагружения,  $\omega$  – угловая скорость вращения контртела.

Анализ наиболее распространенных в современной технике схем трения проводился с учетом возможности воспроизведения на модельном узле трения

нагруженного состояния, типа движения (поступательное, возвратно-поступательное, вращательное - качение, качение с проскальзыванием, скольжение), а также температурного режима, которые имеют место в натурном узле трения.

При современной тенденции к повышению нагруженности узлов трения снижение их габаритов приводит к повышенному фрикционному разогреву. Фрикционная теплостойкость характеризуется, с одной стороны, способностью трибосопряжений работать при высоких температурах в зоне трения и с другой - способностью обеспечивать низкие температуры фрикционного разогрева.

Температура изменяет характер взаимодействия поверхностей, приводит к образованию пленок окислов, химических соединений, сгоранию масляных пленок и др. Значительный нагрев происходит в тонком слое, (5...20 мкм). Таким образом, температура – это фактор, сильно влияющий на трение и износ. При этом, различают объемную (определенного объема тела или вещества) и контактную температуру. Контактная температура представляет собой сумму температуры трения и объемной температуры.

На температурный режим трения, а, следовательно, на коэффициент трения и интенсивность износа имеет влияние коэффициент взаимного перекрытия поверхностей - отношение площадей трения контактирующих деталей.

Исходя из вышеизложенного, наибольший интерес представляет собой схема трения «вал – колодки». Это обстоятельство объясняется следующим. Во-первых, такая схема трения широко распространена и реализована в большинстве узлов трения существующей техники.

Во-вторых, изготовление как контртела – вала, так и испытуемых образцов-колодок не представляет особого затруднения.

В-третьих, поскольку температурный режим работы узла трения во многом определяется коэффициентом взаимного перекрытия, влияющим на распределение тепловых потоков, то в данной схеме трения его изменение возможно в пределах в пределах близким от 0 до 1. Этим коэффициентом

определяется также поступление активных компонентов среды в зону трения, которые влияют на условия образования защитных пленок.

В-четвертых, в этой схеме воспроизведение реальных условий эксплуатации натурального узла трения является возможным благодаря появлению программно-управляемых от ЭВМ средств и контрольно-измерительных приборов.

В-пятых, она позволяет применить существующие методы определения основных триботехнических свойств конструкционных и смазочных материалов. Кроме того, спецификой такой схемы трения являются высокая равномерность нагружения по контактному давлению, одинаковые скорости скольжения по всей поверхности трения, относительно легкая самоустановка образцов, благоприятные условия для образования гидродинамической смазки.

Известно, что для определения комплекса условий, приводящих к тому или иному виду повреждений поверхностей трения, и затем для последующей их реализации на испытательной установке необходимо установить критерии физического моделирования. При выборе этих критериев нужно исходить из природы процесса трения. Ведь трудность моделирования заключается в том, что применение одних и тех же материалов для модели и натуре еще недостаточно для совпадения процессов трения и изнашивания, так как материалы при трении постоянно меняют свои свойства различно в зависимости от ряда факторов. Важно выяснить, какой же из факторов является доминирующим.

В данной работе особое внимание уделено трем основным факторам (давление, скорость скольжения и температура), поскольку именно их наличие приводит к фрикционному разогреву, который определяет условия контактирования трущихся поверхностей: уровень деформирования (упругое, пластическое, микрорезание) на отдельных участках поверхностей, определяющий площадь поверхности фактического контакта, прочность адгезионных связей, условия смазывания и др.

В разработанном АК реализовано программное управление тремя параметрами: частота вращения контртела (с частотой управления до 10 Гц), усилие нормального нагружения узла трения (с частотой управления до 18 Гц), температура смазочной среды в камере трения. К программно-регистрируемым параметрам относятся: частота вращения контртела (от 0 до 3000 об/мин); угол поворота контртела; момент трения (от 0 до 5,2 Нм); усилие нормального нагружения (от 0 до 5000 Н); температура у поверхности трения (от +20 до +600 °С); температура смазочной среды (от +20 до +200 °С); линейный износ пары трения (от 0 до 2 мм); избыточное давление смазочной среды в камере трения (от 0 до 1 МПа).

Принципиальная схема разработанного АК представлена на рисунке 27. АК состоит из двух основных сборочных единиц: машины трения 1 и системы управления 2. Машина трения 1 включает в себя: проточную камеру 3; электродвигатель постоянного тока (ЭДПТ) привода главного движения 4; систему нагружения 5; систему циркуляции, фильтрации и терморегуляции (СЦФТ) 6 испытываемой смазочной среды.

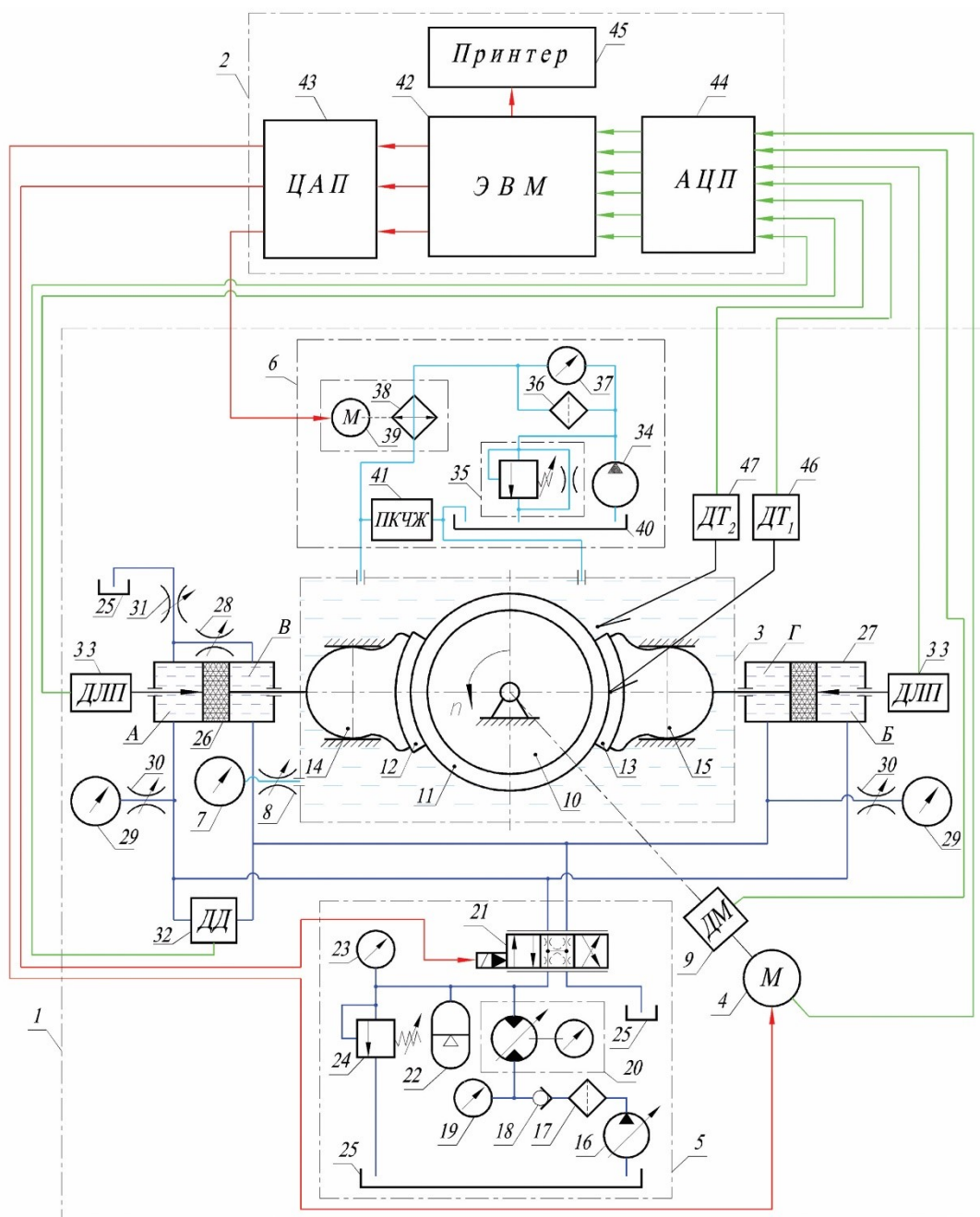


Рисунок 27. Принципиальная схема АК.

Принцип действия диагностического комплекса заключается в следующем. Перед началом испытания на выходной конец приводного вала подшипникового узла насаживают ролик 10, на котором закрепляют контробразец 11, а колодки 12 и 13 устанавливают в самоустанавливающиеся шаровые опоры 14 и 15 и производят герметизацию камеры 3. Затем в системе управления 2 посредством персональной ЭВМ 42 формируют начальные и граничные условия проведения испытания: продолжительность испытания, закон изменения частоты вращения контробразца, закон изменения давления в

системе нагружения, частота управления скоростью скольжения и нормальной нагрузкой, частота съема информации с датчиков, колебание температуры испытываемой смазочной среды, предельный момент трения испытываемого трибосопряжения. Производят пуск машины трения 1. Затем осуществляют включение системы циркуляции, фильтрации и терморегуляции 6 испытываемой смазочной среды. В результате, источник циркуляции 34 подает испытываемую смазочную среду под постоянным давлением, величина которого регулируется предохранительным клапаном 35, на фильтрующий элемент 36. О загрязненности фильтрующего элемента 36 судят по показаниям дифференциального манометра 37. Далее испытываемая смазочная среда попадает в радиатор 38, охлаждаемый ЭДПТ 39, в котором происходит ее охлаждение до необходимой программно заданной температуры. О величине давления в испытательной камере 3 судят по показаниям манометра 7, демпфируемого регулируемым дросселем 8. О степени и интенсивности образования абразивных частиц износа судят по показаниям ПКЧЖ 41. После того, как температура смазочной среды достигнет заданного программой значения, производят последовательный пуск ЭДПТ 4, который передает вращение контробразцу через упругий элемент датчика момента 9, и систему нагружения 14, на холостом ходу. При выходе на заданный программой температурный режим система управления 2 посредством персональной ЭВМ 42 производит стартовый запуск всех программно-управляемых элементов комплекса посредством ЦАП 43 и подает напряжение питания на все контрольные приборы, сигналы с которых преобразуются, усиливаются и поступают на ЭВМ 42 посредством АЦП 44. Вся информация о ходе эксперимента отображается в графическом виде на экране дисплея персональной ЭВМ 42 и записывается отдельным файлом в ее оперативной памяти, который по окончании эксперимента обрабатывается специальным программным продуктом и выдается в виде таблиц и графиков на экране дисплея или распечатывается на бумаге.

Нагружение испытываемого трибосопряжения может осуществляться в двух режимах: статическом и динамическом. Статическое нагружение испытываемых

образцов-колодок 12 и 13 осуществляют путем создания постоянного по величине давления в полостях нагружения А, Б и полостях разгрузки В, Г, о величине которого судят по показаниям манометров 29, демпфируемыми регулируемые дросселями 30. В динамическом режиме нагружение осуществляют посредством системы нагружения 5, которая работает следующим образом. Источник гидравлической энергии 16 создает давление рабочей жидкости, величина которого ограничивается настройкой подпорного клапана 24, стабилизируется пневмогидроаккумулятором 22 и передается на ДГР 21. Программно-управляемый ДГР 21 осуществляет формирование программно заданного закона нагружения испытуемого трибосопряжения в полостях нагружения А, Б и полостях разгрузки В, Г гидроцилиндров двухстороннего действия 26 и 27, регистрация которого осуществляется при помощи датчика разности динамических давлений 32.

Для измерения суммарного линейного износа контробразца 11 и образцов-колодки 13 используется датчик линейных перемещений 33. В ходе проведения эксперимента также на комплексе непрерывно регистрируются: температура в зоне трения - датчиком температуры 46, по показаниям которого судят о величине температуры в зоне трения; температура испытываемой смазочной среды датчиком температуры 47. Показание датчика температуры 47 система управления 2 сравнивает с программно заданным значением температуры испытываемой смазочной среды в испытательной камере 3 и при необходимости подает сигнал на включение ЭДПТ 39, на валу которого установлен пропеллер для обдува радиатора 38. По окончании испытания система управления 2 подает управляющий сигнал на отключение всех управляемых ее систем и питания контрольных приборов, происходит промывка и, при необходимости, смена испытываемой смазочной среды, а также испытуемых контробразца 11 и образцов-колодок 12 и 13, формирование новых начальных и граничных условий проведения испытания. Процесс испытания повторяется.

## Исследование динамических режимов нагружения

Важно отметить, что в реальных условиях функционирования механизм редко работает в статическом режиме. К тому же, также не стоит пренебрегать различными биениями и вибрациями, которые также накладывают свои отпечаток на работу механизма, приводя к неравномерному износу деталей (рисунок 28, 29) и узлов трения.



*Рисунок 28. Неравномерность износа вкладыша коленчатого вала.*



*Рисунок 29. Неравномерность износа толкателей коленчатого вала.*

Проблема состоит в том, что при неравномерном износе в виду геометрии детали или каких-либо дефектов, структура изначально и позже остается равномерной, даже при использовании методов упрочнения.

Неравномерность нагружения различных деталей в узлах трения можно изучить по рисункам 30-32, где наглядно показано, какие законы нагружения реализуются в реальной работе.

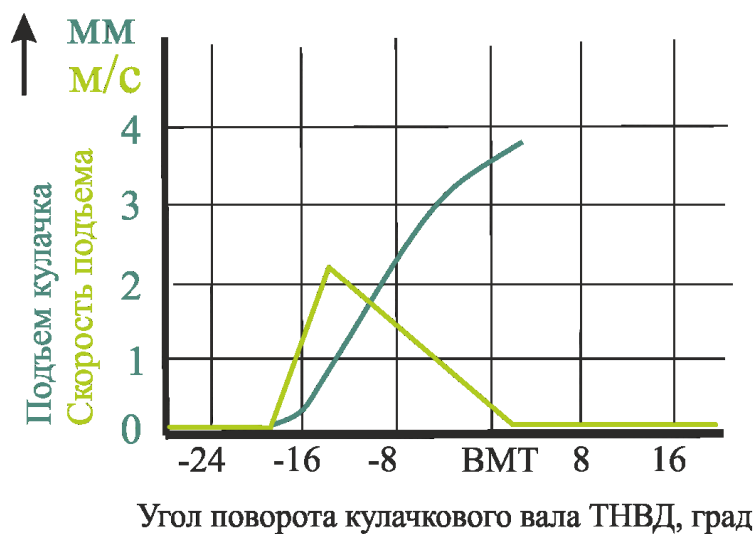


Рисунок 30. Закон кулачкового вала ТНВД.

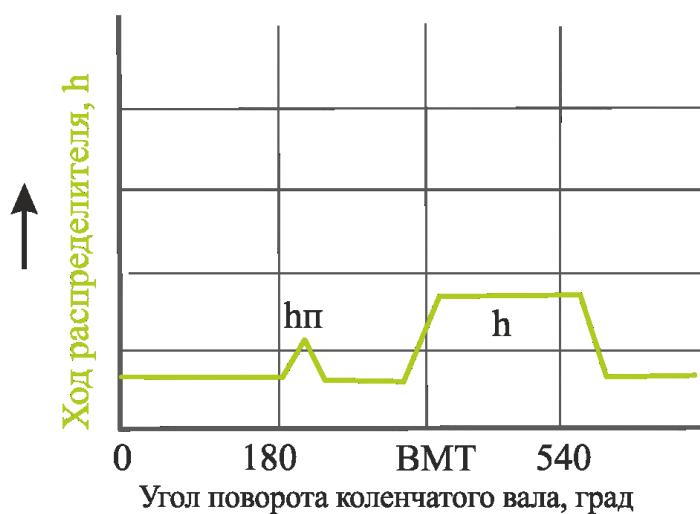


Рисунок 31. Закон перемещения плунжера ТНВД.

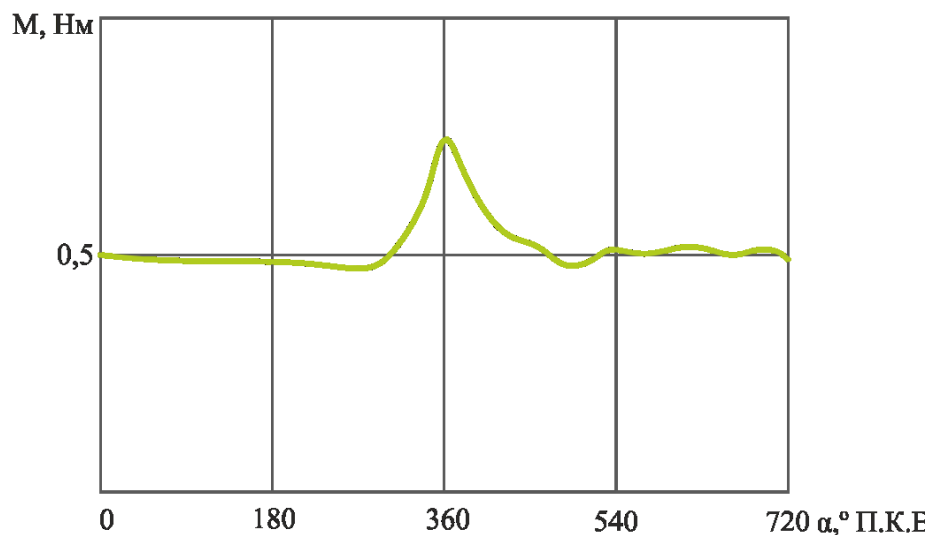


Рисунок 32. Диаграмма момента трения в подшипнике скольжения.

Поэтому более рациональным будет исследовать износостойкость материалов при работе в динамических режимах, реализация которых возможна при работе на автоматизированном триботехническом комплексе.

### 3.11 Испытания образцов на АТК

Для испытаний на автоматизированном триботехническом комплексе были взяты колодки из силумина *EOS Aluminum AlSi10Mg*, так как с точки зрения отлаженности технологического процесса этот материал является наиболее пригодным, так как работа с ним достаточно отработана и значение усадки является постоянным.

Колодки были выращены в двух ориентациях печати относительно нормали:  $90^\circ$  и  $45^\circ$ , послойно пористость не регулировалась, так как это следующий этап работы. В АТК был реализован закон нагружения коленчатого вала газораспределительного механизма ДВС (рисунок 33). В случае каждого исследования сначала производилась притирка, для обеспечения конформности поверхностей трения. Параметры режима трения приведены в таблице, площадь поверхности трения колодок составляет  $1 \text{ см}^2$ , в камеру была залита гидравлическая жидкость с расширенным диапазоном рабочих температур Shell Tellus S2V. Что касается нагружения пары трения, то в случае коленчатого вала ГРМ нормальной нагрузкой является 150 Н, а максимальной 500 Н.

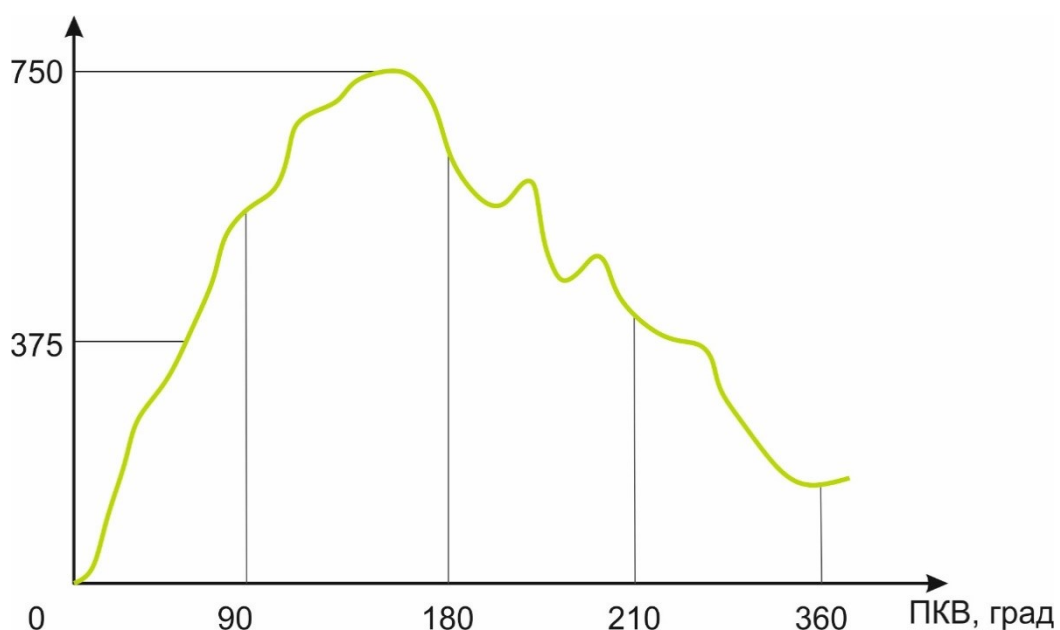


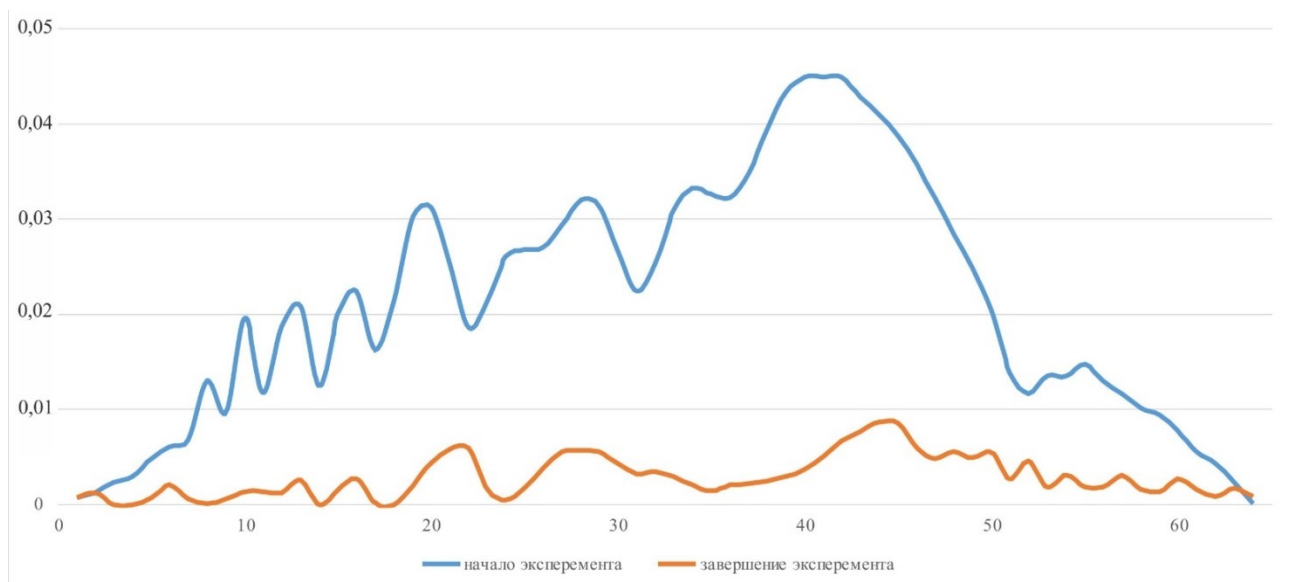
Рисунок 33. Закон силового нагружения коленчатого вала газораспределительного механизма ДВС.

Рассмотрим данные по колодкам, напечатанными под углом  $45^\circ$  относительно нормали (таблица 19).

Таблица 19 - Параметры режима нагружения колодок EOS Aluminim AlSi10Mg  $45^\circ$

| Параметр      |                                     | Значение   |
|---------------|-------------------------------------|------------|
| Притирка      | Время                               | 2 часа     |
|               | Нагрузка                            | 150 Н      |
|               | Скорость вращения                   | 500 об/мин |
| Рабочий режим | Время                               | 3 часа     |
|               | Скорость вращения                   | 500 об/мин |
|               | Нагрузка                            | 3-750 Н    |
|               | Исходная масса колодки I            | 1,34 г     |
|               | Исходная масса колодки II           | 1,29 г     |
|               | Масса колодки I после эксперимента  | 1,32 г     |
|               | Масса колодки II после эксперимента | 1,27 г     |
|               | Масса износа I колодки              | 0,02 г     |
|               | Масса износа II колодки             | 0,02 г     |

Так же важно знать не только, насколько изнашивался материал, но и как менялся коэффициент трения по времени (рисунок 34). На графике можно проследить, что в процессе проведения эксперимента происходит приспособляемость пары трения к окружающим условиям и внешним воздействиям.



*Рисунок 34. Изменение коэффициента трения во времени по закону нагружения коленчатого вала ГРМ.*

Далее рассмотрим данные по колодкам, напечатанным под  $90^\circ$  к нормали (таблица 20).

*Таблица 20 - Параметры режима нагружения колодок EOS Aluminut  
AlSi10Mg*

| Параметр      |                                     | Значение   |
|---------------|-------------------------------------|------------|
| Притирка      | Время                               | 2 часа     |
|               | Нагрузка                            | 150 Н      |
|               | Скорость вращения                   | 500 об/мин |
| Рабочий режим | Время                               | 3 часа     |
|               | Скорость вращения                   | 500 об/мин |
|               | Нагрузка                            | 3-750 Н    |
|               | Исходная масса колодки I            | 1,33 г     |
|               | Исходная масса колодки II           | 1,27 г     |
|               | Масса колодки I после эксперимента  | 1,33 г     |
|               | Масса колодки II после эксперимента | 1,26 г     |
|               | Масса износа I колодки              | 0,02       |
|               | Масса износа II колодки             | 0,02       |

Рассмотрим изменение коэффициента трения по времени на рисунке 35.



Рисунок 35. *Изменение коэффициента трения во времени по закону нагружения коленчатого вала ГРМ.*

Для сравнения был отработан синусоидальный закон нагружения, с данными по изменению коэффициента трения по времени можно ознакомиться на рисунке 36. В целом стоит отметить, что со временем коэффициент трения стремиться к постоянному значению и амплитуда колебаний становится меньше.

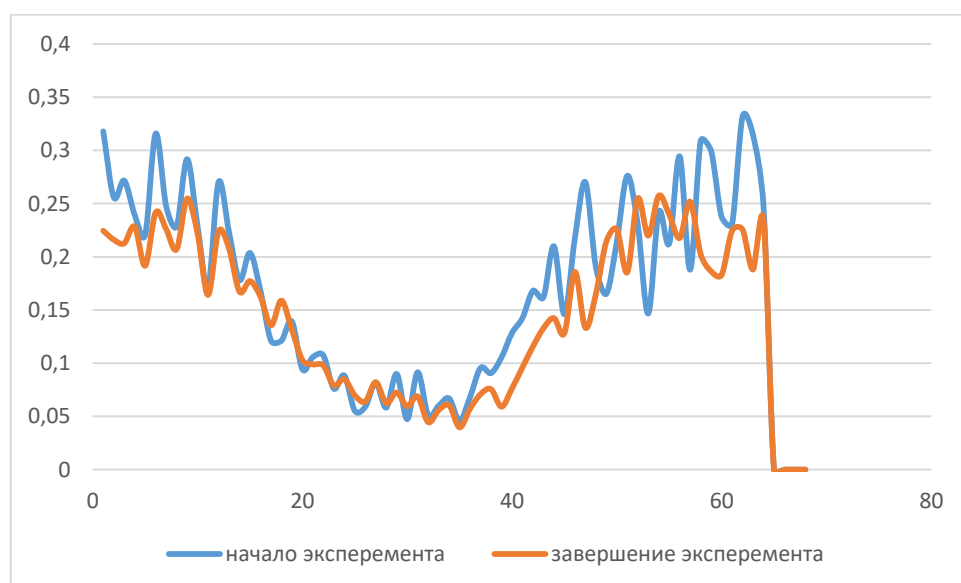


Рисунок 36. *Изменение коэффициента трения во времени по синусоидальному закону нагружения.*

Вместе с тем, были проведены измерения геометрических параметров колодок по схеме (рисунок 37), где зеленым цветом отображена зона износа, примерно полученная по данным, снятым с колодок (таблица 22). Можно сделать однозначный вывод о неравномерности износа при равномерных

свойствах, что еще раз подчёркивает потребность в распределении свойств по объему.

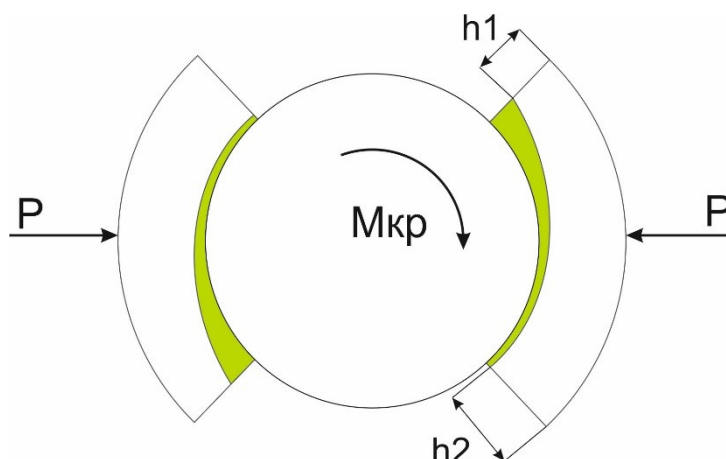


Рисунок 37. Изменение коэффициента трения во времени по синусоидальному закону нагружения.

Таблица 22 - Изменение геометрических параметров колодок при работе в АТК

|                                         |      |                |      |
|-----------------------------------------|------|----------------|------|
| Колодка EOS Aluminum AlSi10Mg 45°       |      |                |      |
| Исходный размер ширины колодки = 6,45мм |      |                |      |
| Левая колодка                           |      | Правая колодка |      |
| h1                                      | 5,41 | h1             | 5,18 |
| h2                                      | 5,59 | h2             | 5,41 |
| Колодка EOS Aluminum AlSi10Mg           |      |                |      |
| Исходный размер ширины колодки = 6,45мм |      |                |      |
| Левая колодка                           |      | Правая колодка |      |
| h1                                      | 5,02 | h1             | 5,28 |
| h2                                      | 5,32 | h2             | 5,71 |
| Колодка EOS Titanium Ti6Al4V            |      |                |      |
| Исходный размер ширины колодки = 6,45мм |      |                |      |
| Левая колодка                           |      | Правая колодка |      |
| h1                                      | 4,64 | h1             | 4,43 |
| h2                                      | 4,91 | h2             | 4,60 |

В целом, по исследованиям триботехнических характеристик, можно сказать, что важным этапом является работа именно в динамических режимах нагружения и в исследованиях неравномерных свойств по объему детали.

#### 4 Результаты проведенного исследования

В ходе исследований пористости были получены следующие результаты. Проведен аналитический обзор технологий и характеристик аддитивно полученных конструкционных материалов; исследованы микроструктуры

аддитивно полученных конструкционных материалов; проанализированы математических моделей изнашивания различных конструкционных материалов; построена математическая модель изнашивания аддитивно полученных конструкционных материалов; испытаны аддитивно полученные конструкционные материалы на различных режимах нагружения на АТК; изучены основные факторы, влияющие на человека и окружающую среду в процессе работы с ПЭВМ и шлифовальным цехом; проведены анализ и расчет параметров ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

В ходе данной работы были сделаны различные общие выводы:

- что пористость между слоями печати выше, чем в одном слое, это следует учитывать при выборе расположения детали в печатной камере. Процент пор не превышает 1% в поперечном и продольном направлении и поры имеют примерно одинаковый размер и геометрию, что свидетельствует о качественном спекании,
- важным этапом является работа именно в динамических режимах нагружения и в исследованиях неравномерных свойств по объему детали, так как износ происходит неравномерно при равномерных свойствах по объему,
- изнашивание может приводить как к росту, так и снижению шероховатости (за меру шероховатости берём среднеквадратичное отклонение профиля),
- увеличение коэффициента трения приводит к увеличению интенсивности износа и уменьшению роста отдельных частей,
- увеличение нагрузки увеличивает интенсивность изнашивания, при этом размер частиц увеличивается, если только тепловыделение отсутствует или его влияние незначительно, в обратном случае размер частиц уменьшается в следствии нагрева поверхностных слоёв.

#### 4. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

Целью данной работы является исследование триботехнических характеристик аддитивно полученных конструкционных материалов при динамических режимах нагружения узлов трения.

Таким образом, исследования помогут обозначить область применения аддитивно полученных материалов в узлах трения и продлить их срок службы.

Сфера использования материалов довольно широка: здравоохранение и медицина, машиностроение и приборостроение, космос и авиация.

В процессе выполнения ВКР решается большое количество задач, которые помогут в достижении поставленной цели.

##### **Потенциальные потребители результатов исследования.**

Для анализа потребителей результатов исследования необходимо рассмотреть целевой рынок и провести его сегментирование, которое в дальнейшем поможет найти те области, где продвижение нового продукта будет наименее трудоемким.

Для проведения сравнительного анализа выбран один конкурент – материалы, полученные традиционным путём. Аддитивно полученные конструкционные материалы являются уникальными, потому что позволяют распределять свойства по объему, что очень важно, учитывая, что износ в узлах трения не является равномерным.

Материалы, полученные традиционным путём.

Материалы, полученные традиционным путём, являются самыми распространёнными и применяемыми повсеместно, абсолютно во всех отраслях современной промышленности.

Материалы, полученные традиционным путём, применяются везде. При этом, они имеют некоторые недостатки:

- Равномерное распределение свойств по составу;
- Долгий технологический процесс.

Таблица 23 - Карта сегментирования рынка

|                 |         | Способ получения |    |
|-----------------|---------|------------------|----|
|                 |         | Традиционный     | АП |
| Размер компании | Крупные | +                |    |
|                 | Средние | +                | +  |

По карте сегментирования, таблицы 21, видно, что наименьшая конкуренция для разрабатываемого приспособления наблюдается на рынке крупных предприятий. Это связано с недоверием к аддитивным технологиям в виду того, что те недостаточно изучены.

### SWOT– анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта.

Таблица 24 - Матрица SWOT.

|                                                                                                               | <b>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</b>                                                                                       | <b>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</b>                                                            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                               | С1. Распределение свойств материала по объему<br>С2. Возможность создания сложнейших геометрических форм при коротком технологическом процессе. | Сл1. Материал недостаточно изучен.<br>Сл2. Более сложное и дорогое оборудование для получения и ограниченный размер |
| <b>Возможности:</b><br>В1. Низкая конкуренция, обыкновенно применяется традиционный материал. <div>Т.к.</div> | В1В2С1С2. высокий спрос в связи с возможностью увеличения срока службы.                                                                         | В1Сл2. Традиционные материалы равномерны по объему при неравномерном износе, но их цена несколько ниже.             |

|                                                                                                                         |  |                                                                                           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| В2. Увеличение спроса в виду неоспоримых преимуществ материалов                                                         |  |                                                                                           |
| <b>Угрозы:</b><br>У1. Спрос на аддитивно полученные материалы может не быть достаточно высоким<br>У2. Финансовый кризис |  | У2Сл2. В условиях кризиса повышенная цена материалов негативно скажется на уровне продаж. |

Таблица 25 - Интерактивная матрица проекта

| Сильные стороны проекта |    |    |    |
|-------------------------|----|----|----|
| Возможности проекта     |    | С1 | С2 |
|                         | В1 | +  | +  |
|                         | В2 | +  | -  |

На основании SWOT-анализа составляем интерактивную матрицу проекта, дающую общее представление о возможных вариантах стечения благоприятных и негативных факторов.

## Планирование научно-исследовательских работ

### Структура работ в рамках научного исследования

Разбиваем проект на основные этапы работы и назначаем исполнителей. Это необходимо для дальнейшего расчета заработной платы.

Таблица 26 - Перечень этапов и распределение исполнителей

| Основные этапы                                 | № |                                                | Должность исполнителя |
|------------------------------------------------|---|------------------------------------------------|-----------------------|
| Разработка технического задания                | 1 | Составление и утверждение технического задания | Руководитель          |
| Выбор направления исследований                 | 2 | Изучение материалов по теме                    | Студент               |
|                                                | 3 | Проведение обзора аналогов                     | Студент               |
|                                                | 4 | Исследование механических свойств АПМ          | Студент               |
|                                                | 5 | Выполнение расчетов                            | Студент               |
|                                                | 6 | Исследование триботехнических свойств АПМ      | Студент               |
| Теоретические и экспериментальные исследования | 7 | Разработка математической                      | Студент               |

|                                         |    |                                                                               |         |
|-----------------------------------------|----|-------------------------------------------------------------------------------|---------|
|                                         |    | модели износа                                                                 |         |
| Проведение ОКР                          |    |                                                                               |         |
| Разработка технологической документации | 8  | Исследование механических свойств после исследования триботехнических свойств | Студент |
|                                         | 9  | Исследование математической модели                                            | Студент |
| Оформление отчета                       | 10 | Заполнение пояснительной записки                                              | Студент |

### Определение трудоемкости выполняемых работ

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости:

$$t_{ож} = \frac{3t_{min} + 2t_{max}}{5}; \quad (29)$$

$t_{ож}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения работы чел.-дн.

$t_{min}$  – минимальная возможная трудоемкость выполнения заданной работы (оптимистическая оценка в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел/дн.

$t_{max}$  – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной работы (пессимистическая оценка в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел/дн.

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

$$T_p = \frac{t_{ож}}{q}; \quad (30)$$

$T_p$  – продолжительность одной работы, рабочих дней.

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

Таблица 27 - Ожидаемое время выполнения работы

| Основные этапы                                 | № раб | Содержание работ                                                              | $t_{ож}$ , чел/дн |
|------------------------------------------------|-------|-------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| Разработка технического задания                | 1     | Составление и утверждение технического задания                                | 1                 |
| Выбор направления исследований                 | 2     | Изучение материалов по теме                                                   | 1,4               |
|                                                | 3     | Проведение патентного обзора                                                  | 2                 |
| Теоретические и экспериментальные исследования | 4     | Исследование механических свойств АПМ                                         | 4,2               |
|                                                | 5     | Выполнение расчетов                                                           | 4,2               |
|                                                | 6     | Исследование триботехнических свойств                                         | 4,6               |
|                                                | 7     | Разработка математической модели                                              | 4,6               |
| Проведение ОКР                                 |       |                                                                               |                   |
| Разработка технологической документации        | 8     | Исследование механических свойств после исследования триботехнических свойств | 6,4               |
|                                                | 9     | Исследование математической модели                                            | 11,4              |
| Оформление отчета                              | 10    | Заполнение пояснительной записки                                              | 2,8               |
| Итого:                                         |       |                                                                               | 42,6              |

Расчет продолжительности одной работы не является необходимым, т.к. на каждой работе задействован один исполнитель, то есть  $T_p = t_{ож}$

### Разработка графика проведения научного исследования

Строится график проведения научного исследования в форме диаграммы Ганта.

Для удобства построения, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней необходимо перевести в календарные дни.

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{кал} \quad (31)$$

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

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

$k_{\text{кал}}$  – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}}; \quad (32)$$

$T_{\text{кал}}$  – количество календарных дней в году;

$T_{\text{вых}}$  – количество выходных дней в году;

$T_{\text{пр}}$  – количество праздничных дней в году

Таблица 28 - Временные показатели проведения научного исследования

| Название работы                                                               | Трудоемкость работ |            |                 | Исполнители  | Длительность работ в рабочих днях $T_p$ | Длительность работ в календарных днях $T_k$ |
|-------------------------------------------------------------------------------|--------------------|------------|-----------------|--------------|-----------------------------------------|---------------------------------------------|
|                                                                               | $t_{\min}$         | $t_{\max}$ | $t_{\text{ож}}$ |              |                                         |                                             |
| Составление и утверждение ТЗ                                                  | 1                  | 1          | 1               | Руководитель | 1                                       | 2                                           |
| Изучение материала по теме                                                    | 1                  | 2          | 1,4             | Студент      | 1,4                                     | 2                                           |
| Проведение обзора аналогов                                                    | 2                  | 2          | 2               | Студент      | 2                                       | 3                                           |
| Исследование механических свойств АПМ                                         | 3                  | 6          | 4,2             | Студент      | 4,2                                     | 6                                           |
| Выполнение расчетов                                                           | 3                  | 6          | 4,2             | Студент      | 4,2                                     | 6                                           |
| Исследование триботехнических свойств АПМ                                     | 3                  | 7          | 4,6             | Студент      | 4,6                                     | 7                                           |
| Разработка математической модели износа                                       | 3                  | 7          | 4,6             | Студент      | 4,6                                     | 7                                           |
| Исследование механических свойств после исследования триботехнических свойств | 6                  | 7          | 6,4             | Студент      | 6,4                                     | 9                                           |
| Исследование                                                                  | 9                  | 15         | 11,4            | Студент      | 11,4                                    | 16                                          |

|                                  |   |   |     |         |     |   |
|----------------------------------|---|---|-----|---------|-----|---|
| математической модели            |   |   |     |         |     |   |
| Заполнение пояснительной записки | 2 | 4 | 2,8 | Студент | 2,8 | 4 |

$$k_{\text{кал}} = \frac{365}{365-104-14} = 1,47; \quad (33)$$

Таблица 29 - Календарный план-график проведения НИОКР по теме

| № раб. | Вид работ                                                             | Исполнитель  | $T_k$ | Продолжительность выполнения работ                                                  |                                                                                      |                                                                                       |                                                                                       |                                                                                       |                                                                                       |    |      |
|--------|-----------------------------------------------------------------------|--------------|-------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|----|------|
|        |                                                                       |              |       | Март                                                                                | Апрель                                                                               |                                                                                       |                                                                                       | Май                                                                                   |                                                                                       |    | Июнь |
|        |                                                                       |              |       | 30                                                                                  | 10                                                                                   | 20                                                                                    | 30                                                                                    | 10                                                                                    | 20                                                                                    | 30 | 10   |
| 1      | Составление и утверждение технического задания                        | Руководитель | 2     |    |                                                                                      |                                                                                       |                                                                                       |                                                                                       |                                                                                       |    |      |
| 2      | Изучение материалов по теме                                           | Студент      | 2     |  |                                                                                      |                                                                                       |                                                                                       |                                                                                       |                                                                                       |    |      |
| 3      | Проведение патентного обзора                                          | Студент      | 3     |  |                                                                                      |                                                                                       |                                                                                       |                                                                                       |                                                                                       |    |      |
| 4      | Исследование механических свойств АПМ                                 | Студент      | 6     |                                                                                     |  |                                                                                       |                                                                                       |                                                                                       |                                                                                       |    |      |
| 5      | Выполнение расчетов                                                   | Студент      | 6     |                                                                                     |                                                                                      |  |                                                                                       |                                                                                       |                                                                                       |    |      |
| 6      | Исследование триботехнических свойств АПМ                             | Студент      | 7     |                                                                                     |                                                                                      |                                                                                       |  |                                                                                       |                                                                                       |    |      |
| 7      | Разработка математической модели износа                               | Студент      | 7     |                                                                                     |                                                                                      |                                                                                       |                                                                                       |  |                                                                                       |    |      |
| 8      | Исследование механических свойств после исследования триботехнических | Студент      | 6     |                                                                                     |                                                                                      |                                                                                       |                                                                                       |                                                                                       |  |    |      |

|    |                                           |         |    |  |  |  |  |  |  |  |  |
|----|-------------------------------------------|---------|----|--|--|--|--|--|--|--|--|
|    | их свойств                                |         |    |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 9  | Исследование математической модели износа | Студент | 16 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 10 | Заполнение пояснительной записки          | Студент | 4  |  |  |  |  |  |  |  |  |

### Бюджет научно-технического исследования

При планировании бюджета НТИ должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением. 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 темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- затраты на научные и производственные командировки;
- контрагентные расходы;
- накладные расходы.

### Расчет материальных затрат НТИ

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$Z_m = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m \Pi_i \cdot N_{рас.хi}; \quad (34)$$

$m$  – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования;

$N_{рас.хi}$  – количество материальных ресурсов  $i$ -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт, кг, м, м<sup>2</sup> и т.д.);

$\Pi_i$  – цена приобретения единицы  $i$ -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб/шт, руб/кг, руб/м, руб/м<sup>2</sup> и т.д.);

$k_T$  – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

Таблица 30 - Материальные затраты

| Наименование                                                          | Единица измерения | Количество | Цена за ед., руб. | Затраты на материалы |
|-----------------------------------------------------------------------|-------------------|------------|-------------------|----------------------|
| Колодка <i>EOS Aluminium AlSi10Mg</i> (продольное направление печати) | шт                | 3          | 200               | 600                  |
| Колодка <i>EOS Aluminium AlSi10Mg</i> (поперечное направление печати) | шт                | 3          | 200               | 600                  |
| Колодка <i>EOS Titanium Ti6Al4V</i>                                   | шт                | 3          | 500               | 1500                 |
| Итого расходы на материалы:                                           |                   |            |                   | 2700                 |

### Основная заработная плата исполнителей

В таблице 31 приведены основные этапы работы, их исполнители и затраты на оплату их труда.

Таблица 31 - Расчет основной заработной платы

| № п/п | Наименование этапа                    | Исполнители  | Трудоемкость, чел.-дн | Заработная плата на один чел.-дн., тыс. руб. | Всего заработная плата по тарифу, тыс. руб. |
|-------|---------------------------------------|--------------|-----------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------------|
| 1     | Составление и утверждение ТЗ          | Руководитель | 1                     | 1356                                         | 1356                                        |
| 2     | Изучение материалов по теме           | Студент      | 1,4                   | 879                                          | 1230                                        |
| 3     | Проведение патентного обзора          | Студент      | 2                     | 879                                          | 1758                                        |
| 4     | Исследование механических свойств АПМ | Студент      | 4,2                   | 879                                          | 3691,8                                      |
| 5     | Выполнение расчетов                   | Студент      | 4,2                   | 879                                          | 3691,8                                      |
| 6     | Исследование                          | Студент      | 4,6                   | 879                                          | 4043,4                                      |

|    |                                                                               |         |      |     |        |
|----|-------------------------------------------------------------------------------|---------|------|-----|--------|
|    | триботехнических свойств АПМ                                                  |         |      |     |        |
| 7  | Разработка математической модели износа                                       | Студент | 4,6  | 879 | 4043,4 |
| 8  | Исследование механических свойств после исследования триботехнических свойств | Студент | 4,2  | 879 | 3691,8 |
| 9  | Исследование математической модели износа                                     | Студент | 11,4 | 879 | 1020,6 |
| 10 | Заполнение пояснительной записки                                              | Студент | 2,8  | 879 | 2461,2 |

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением НТИ, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату:

$$З_{зп} = З_{осн} + З_{доп}; \quad (35)$$

$З_{осн}$  – основная заработная плата;

$З_{доп}$  – дополнительная заработная плата (12-20 % от  $З_{осн}$ ).

Основная заработная плата ( $З_{осн}$ ) руководителя (лаборанта, инженера) от предприятия (при наличии руководителя от предприятия) рассчитывается по следующей формуле:

$$З_{осн} = З_{дн} \cdot Т_p; \quad (36)$$

$З_{осн}$  – основная заработная плата одного работника;

$Т_p$  – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб.дн.;

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

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$З_{дн} = \frac{З_m \cdot M}{F_d}; \quad (37)$$

$З_m$  – месячный должностной оклад работника, руб.;

$M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

при отпуске в 24 рабочих дня  $M = 11,2$  месяца, 5-дневная неделя;

при отпуске в 48 рабочих дней  $M = 10,4$  месяца, 6-дневная неделя;

$F_d$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, рабочих дней.

Таблица 32 - Баланс рабочего времени

| Показатели рабочего времени                  | Руководитель | Студент |
|----------------------------------------------|--------------|---------|
| Календарное число дней                       | 365          | 365     |
| Количество нерабочих дней                    | 104          | 104     |
| - выходные дни                               | 14           | 14      |
| - праздничные дни                            |              |         |
| Потери рабочего времени                      |              |         |
| - отпуск                                     | 24           | 48      |
| - невыходы по болезням                       | -            | -       |
| Действительный годовой фонд рабочего времени | 223          | 199     |

Для руководителя:

$$З_{\text{дн. рук}} = \frac{27500 \cdot 11}{223} = 1356 \text{ руб};$$

Для студента:

$$З_{\text{дн. студ}} = \frac{17500 \cdot 10}{199} = 879 \text{ руб};$$

$$З_{\text{осн. рук}} = 1356 \cdot 1 = 1356 \text{ руб};$$

$$З_{\text{осн. студ}} = 879 \cdot 41,6 = 36566 \text{ руб};$$

$$З_{\text{зп. рук}} = 1356 + 1356 \cdot 0,12 = 1518 \text{ руб};$$

$$З_{\text{зп. студ}} = 36566 + 36566 \cdot 0,12 = 40953 \text{ руб};$$

**Дополнительная заработная плата исполнителей**

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$З_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot З_{\text{осн}}; \quad (38)$$

$k_{\text{доп}}$  – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,12 – 0,15).

$$З_{\text{доп.рук}} = 0,12 \cdot 1356 = 163 \text{ руб};$$

$$З_{\text{доп.студ}} = 0,12 \cdot 36566 = 4388 \text{ руб};$$

### Отчисления во внебюджетные фонды

В данной статье расходов отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством РФ 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:

$$З_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}); \quad (39)$$

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

На 2016 г. в соответствии с Федеральным закона от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30%. На основании пункта 1 ст.58 закона №212-ФЗ для учреждений осуществляющих образовательную и научную деятельность в 2016 году водится пониженная ставка – 27,1%.

Отчисления во внебюджетные фонды представлены в таблице 33.

*Таблица 33 - Отчисления во внебюджетные фонды*

| Исполнитель             | Основная<br>заработная<br>плата, руб. | Дополнительная<br>заработная<br>плата, руб. |
|-------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------------|
| Руководитель<br>проекта | 1356                                  | 163                                         |
| Студент                 | 36566                                 | 4388                                        |

|                                              |       |       |
|----------------------------------------------|-------|-------|
| Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды | 27,1% | 27,1% |
| Итого:                                       | 11509 |       |

### **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.

Образцы изготавливаются на предприятии АБ Универсал, материалы и амортизация для оборудования посчитаны, нужно подсчитать стоимость работ.

В таблице 34 представлены исполнители операций по изготовлению колодки для испытания в автоматизированном триботехническом комплексе (АТК).

*Таблица 34 - Сторонние исполнители*

| №<br>п/п | Профессия                                      | Количество<br>деталей | Количество<br>работников | Разряд<br>рабочего |
|----------|------------------------------------------------|-----------------------|--------------------------|--------------------|
| 1        | Оператор<br>установки<br>лазерного<br>спекания | 8                     | 1                        | -                  |
| 2        | Токарь                                         | 8                     | 1                        | 2                  |

Заказ будет выполняться в НИ ТПУ и в фирме АБ Универсал. Оклад оператора установки лазерного спекания принимаем 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.

Подсчитаем зарплату за 3 дня рабочих в НИ ТПУ. Результаты расчетов представлены в таблице 35.

*Таблица 35 - Оплата труда сторонних исполнителей*

| Исполнитель                                    | Заработная плата, рублей |
|------------------------------------------------|--------------------------|
| Оператор<br>установки<br>лазерного<br>спекания | 3312                     |
| Токарь                                         | 2208                     |
| Отчисления во<br>внебюджетные                  | 1596                     |

|        |      |
|--------|------|
| фонды  |      |
| Итого: | 7118 |

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:

$$З_{\text{осн.2}} = 986 \cdot 3 = 2952 \text{ руб};$$

Зарплата токаря:

$$З_{\text{зп.1}} = 1972 + 1972 \cdot 0,12 = 2208 \text{ руб};$$

Зарплата оператора установки лазерного спекания:

$$З_{\text{зп.2}} = 2958 + 2958 \cdot 0,12 = 3312 \text{ руб};$$

Отчисления для токаря:

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

Отчисления для оператора установки лазерного спекания:

$$З_{\text{внеб.2}} = 0,3 \cdot (2958 + 2958 \cdot 0,12) = 993 \text{ руб};$$

### **Накладные расходы.**

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов и т.д. Их величина определяется по следующей формуле:

$$З_{\text{накл}} = (\text{сумма статей } 1 \div 5) \cdot k_{\text{нр}}; \quad (40)$$

### **Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта.**

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы (темы) является основной для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции. Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект приведен в таблице 36.

*Таблица 36 - Расчет бюджета затрат НТИ*

| Наименование статьи                                           | Сумма, руб | Примечание           |
|---------------------------------------------------------------|------------|----------------------|
| Материальные затраты НТИ                                      | 2700       | Пункт 3.4.1.         |
| Затраты по основной заработной плате исполнителей             | 42852      | Пункт 3.4.2.         |
| Зарплаты по дополнительной заработной плате исполнителей темы | 5142       | Пункт 3.4.3.         |
| Отчисления во внебюджетные фонды.                             | 11613      | Пункт 3.4.4.         |
| Контрагентские расходы                                        | 7118       | Пункт 3.4.5.         |
| Накладные расходы                                             | 32403      | 16% от суммы ст. 1-5 |
| Бюджет затрат НТИ                                             | 101828     | Сумма ст. 1-6        |

Разработка НТИ проводится полностью при поддержке НИ ТПУ ИК, кафедры ТМСР. Математическая модель и экспериментальный образец создаются и исследуются на кафедре ТМСР и при поддержке фирмы АБ Универсал, г. Москва.

## 6. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

### **Введение**

В данной ВКР рассматривается работа по подготовке металлических образцов к дальнейшим исследованиям – а именно механическое шлифование и химическая полировка. Шлифование производится вручную на абразивной бумаге, полировка – путем промывки образцов в растворе кислот (плавиковая, азотная, вода). Были проанализированы вопросы, связанные с организацией рабочего места, производственной санитарией, техникой производственной безопасности и охраной окружающей среды.

Основной целью данного раздела является создание допустимых норм для улучшения условий труда, обеспечения производственной безопасности человека, повышения его производительности, сохранения работоспособности в процессе деятельности, а также охраны окружающей среды.

Вопросы производственной и экологической безопасности рассматриваются с позиции исполнителя, непосредственно связанного с процессами исследования.

Рабочая среда, организация рабочего места должны соответствовать общепринятым и специальным требованиям техники безопасности, эргономики, нормам санитарии, экологической и пожарной санитарии. Помещение оборудовано отдельными рабочими местами для всех сотрудников и студентов, с предоставлением средств индивидуальной защиты.

### **Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

К производствам повышенной опасности можно отнести этапы шлифования и полировки. При шлифовании в воздух, а затем в дыхательные пути работников могут попасть частицы порошка металла. При полировке потенциальной опасностью является, во-первых, несоблюдение техники безопасности при работе с кислотами и как следствие ожог кожных покровов, а во-вторых, вероятность попадания в воздух испарений химикатов при нарушении работы вытяжной системы.

В рамках производства изделия, представленного в ВКР, предварительная оценка опасных и вредных факторов при проведении работ по ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ.

| Группы факторов | Виды опасных и вредных факторов                                                                            |
|-----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Физический      | Повышенная или пониженная относительно нормативных требований температура, влажности и подвижности воздуха |
|                 | Повышенный уровень шума                                                                                    |
|                 | Отсутствие или недостаток естественного света, недостаточная освещенность рабочей зоны                     |
|                 | Вредные вещества; металлический порошок в воздухе, проникающий в организм человека через органы дыхания    |
| Химический      | Возможность химического ожога кожных покровов                                                              |
|                 | Испарения кислот в воздухе                                                                                 |

#### **Анализ выявленных вредных факторов:**

##### **Микроклимат.**

В ходе работы необходимо соблюдать допустимые значения на следующие производственные метеоусловия – влажность воздуха на рабочем месте, температура воздуха, скорость движения воздуха, а так же тепловые излучения. Указанные физические свойства воздуха на рабочем месте оказывают значительное влияние на протекание жизненных процессов в организме человека. Так, при неблагоприятном микроклимате (превышение или же занижение допустимых нормативных показателей указанных в СанПиН 2.2.4.548 – 96) снижается производительность труда и ухудшается здоровье работника.

Такой физический опасный фактор, как повышенная температура поверхности образцов, нагретых от трения обрабатываемых поверхностей.

##### **Действие фактора:**

- контакт с горячей (свыше 45 град. С) поверхностью может вызвать ожоги незащищенных участков тела;
- пониженная температура поверхностей холодильного оборудования, может служить причиной сосудистых заболеваний, особенно пальцев рук;

Неблагоприятные условия вызывают перенапряжение механизма терморегуляции, что приводит к перегреву или переохлаждению. Нарушениями механизма терморегуляции являются:

- Повышенная утомляемость;
- Снижение его производительности труда;
- Повышенный риск простудных и сердечных заболеваний.

*Таблица 37 - Таким образом оптимальные значения физических величин для обеспечения комфортного микроклимата*

| Период года | Категория работ по уровню энергозатрат, Вт | Температура воздуха, °С | Температура поверхностей, °С | Относительная влажность воздуха, % | Скорость движения воздуха, м/с |
|-------------|--------------------------------------------|-------------------------|------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|
| Холодный    | Іб (140 - 174)                             | 21 - 23                 | 20 - 24                      | 60 - 40                            | 0,1                            |
| Теплый      | Іб (140 - 174)                             | 22 - 24                 | 21 - 25                      | 60 - 40                            | 0,1                            |

Допустимые величины микроклимата на рабочем месте

- Изменение температуры воздуха по высоте должно быть не более 3°С;
- Изменение температуры воздуха по горизонтали и изменение в течении смены не должно быть более 4 °С для категории работ «Іб».

При температуре воздуха на рабочих местах более 25 °С , допустимые величины относительной влажности воздуха не должны превышать пределы:

- 70 % - при температуре воздуха 25 °С;
- 65 % - при температуре воздуха 26 °С;
- 60 % - при температуре воздуха 27 °С;
- 55 % - при температуре воздуха 28 °С.

Для профилактики неблагоприятного воздействия микроклимата должны быть использованы защитные мероприятия. Например, такие как системы местного кондиционирования воздуха, применение средств индивидуальной защиты (СИЗ), регламент времени работы и т.д.

К числу СИЗ от неблагоприятных климатических условий относят спецодежду, спецобувь, средства защиты рук, головные уборы.

### **Повышенный шум.**

В рабочем помещении должны соблюдаться нормы уровня шума согласно СН2.2.4/2.1.8.562-96.

Источником шума в рассматриваемом рабочем пространстве является система вытяжной вентиляции.

Повышенный уровень шума на рабочем месте вызывает у человека головную боль, головокружение, может привести к заболеванию нервной и сердечно-сосудистой системы, к развитию тугоухости, нарушению функций желудочно-кишечного тракта и обменных процессов в организме. В условиях постоянного шума повышается утомляемость, замедляется скорость психических реакций, ухудшается память. Нарушается компенсация внимания, точность и координированность движений, ухудшается восприятие звуковых и световых сигналов опасности, что ведет к увеличению травматизма.

Нормируемыми параметрами шума служат уровни в децибелах (дБ) среднеквадратичных звуковых давлений, измеряемых на линейной характеристике шумомера (или шкале С) в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами 63, 125, 500, 1000, 2000, 4000 и 8000 Гц. Для ориентировочной оценки шума разрешается измерять его общий уровень по шкале А шумомера в дБА. Допустимые нормы шума в лабораторных помещениях не более 80 дБА (согласно ГОСТ 12.1.003–83).

*Таблица 38 - Предельно допустимые уровни звука и эквивалентные уровни звука на рабочих местах для трудовой деятельности разных категорий тяжести и напряженности в ГОСТ 12.1.003–83.*

| 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 |
| легкой степени                             | 80                                   | 80                          | 75                     | 75                     | 75                     |

Если уровень шума на работе превышает 70-80 дБ необходимо использовать индивидуальные средства защиты (затычки для ушей, специальные наушники). В обеденный перерыв обязательно нужно покидать рабочее место и отправляться в более тихое место, чтобы слух немного отдохнул и адаптировался к нормальному уровню громкости. Не реже 1 раза в год (или в полгода, если уровень шума очень высокий) проверять слух у врача-оториноларинголога, следует уловить момент ухудшения и принять меры.

### **О рабочей зоны**

Искусственное освещение должно обеспечивать в помещении освещенность, позволяющую выполнять операции наладку оборудования без производственных дефектов и травматизма, возникающих по причине недостаточной освещенности. Недостаточная освещенность является вредным фактором при выполнении исследовательских работ, требующих особую точность. При работе в таких условиях сначала происходит перенапряжение глаз, которое впоследствии может вызвать ухудшение зрения. В этом случае требуется привлечение дополнительных источников света, в частности настольных ламп.

Освещение в лаборатории является комбинированным и соответствует нормативным требованиям.

Нормы освещенности рабочих поверхностей в производственных помещениях устанавливают в зависимости от характеристики зрительной работы. Лабораторию по исследованию можно отнести к III классу зрительной работы, так как работа связана с очень мелкими деталями.

*Таблица 39 - Наименьшая допускаемая освещенность при использовании системы общего освещения определяется по СНиП II-A.8-62 для аналитической лаборатории (III – работы высокой точности) 750 лк*

| Разряды<br>работы | Характер работ, выполняемых в<br>помещении |        | Нормы к.е.о. в % |     |
|-------------------|--------------------------------------------|--------|------------------|-----|
|                   | виды работ, по                             | Размер | при верхнем и    | при |

|     | степени точности                                                        | объекта<br><i>мм</i> | комбинированном<br>освещении | боковом<br>освещении |
|-----|-------------------------------------------------------------------------|----------------------|------------------------------|----------------------|
| 1   | 2                                                                       | 3                    | 4                            | 5                    |
| I   | Особо точные работы                                                     | 0,1 и менее          | 10                           | 3,5                  |
| II  | Работы высокой точности                                                 | Более 0,1 до 0,3     | 7                            | 2                    |
| III | Точные работы                                                           | Более 0,3 до 1       | 5                            | 1,5                  |
| IV  | Работы малой точности                                                   | Более 1 до 10        | 3                            | 1                    |
| V   | Грубые работы                                                           | Более 10             | 2                            | 0,5                  |
| VI  | Работы, требующие общего наблюдения за ходом производственного процесса | -                    | 1                            | 0,25                 |

Для вечернего освещения, помимо потолочных ламп, рабочее место должно быть оборудовано дополнительным источником света. В вечернее время в лабораториях обязательно общее искусственное рабочее освещение, причем расположение светильников должно быть равномерным. Чаще всего для общего освещения используются люминесцентные светильники типа ОД, оснащенные лампами ЛБ — 40, которые расположены в два ряда. Рекомендованное расстояние между рядами ламп — 2 м.

### **Вредные вещества**

Основным опасным воздействием является наличие веществ в рабочей зоне при проведении шлифовально-полировальных работ, так как в процессе шлифовки и полировки, металлический порошок может всплывать и находиться в воздухе рабочей зоны некоторое время, а от химикатов в воздух попадают испарения, опасные для человека. Для этого необходимо ограничить

наличие таких веществ в воздухе рабочей зоны и оно не должно превышать ПДК. Большинство веществ приводят к механическому повреждению тканей дыхательных путей, слизистых глаз, носоглотки, химическому отравлению. Соответственно необходимо соблюдать гигиенические нормы по проветриванию помещения, установке в них систем вытяжных вентиляций и предоставить сотрудникам СИЗ для защиты глаз и органов дыхания, а также халаты.

*Таблица 40 - Предельно допустимые концентрации вредных веществ в воздухе рабочей зоны производственных помещений (согласно ГН 2.2.5.1313-03)*

| <b>Вещество</b>                     | <b>ПДК,мг/м<sup>3</sup></b> | <b>Состояние</b> | <b>Класс опасности</b> |
|-------------------------------------|-----------------------------|------------------|------------------------|
| Азотная кислота                     | 2                           | Пары             | 3                      |
| Спирт                               | 5                           | Пары             | 3                      |
| Гидрофторидная (плавиковая) кислота | 0,5/0,1                     | Пары             | 2                      |
| Цирконий                            | 6                           | Аэрозоль         | 3                      |

Вредные вещества могут поступать в организм человека через органы дыхания (пары, газы, пыль), кожу (жидкие, масляные, твердые вещества), желудочно-кишечный тракт (жидкие, твердые, и газы). Наиболее часто вредные вещества попадают в организм человека через органы дыхания и быстро проникают к жизненно важным центрам человека.

В процессе выполняемых работ могут выделяться металлические частицы в наноразмерном состоянии. Согласно данному документу (ТС 019/2011) материалы и изделия для защиты от механических повреждений должны обладать стойкостью к истиранию и проколам, так же халаты, выдаваемые для защиты кожных покровов от механического воздействия, должны выдерживать разрывную нагрузку не менее 400 Н. Для защиты глаз рационально использование защитных очков. Для защиты органов дыхания необходимо использовать респираторы, каждый из которых имеет свой индивидуальный номер, площадь зрения не должна снижаться при использовании более чем на 30 %. Объемная доля кислорода должна быть около 21 %. Средства

индивидуальной защиты рук (резиновые перчатки) следует обязательно использовать при химической полировке.

Каждый работник обязан использовать вышеперечисленные средства индивидуальной защиты, а так же контролировать использование их другими сотрудниками.

В процессе шлифования исполнитель должен помнить о следующих требованиях.

- Одежда рабочего должна быть чистой и аккуратно заправленной, рабочее место должно содержаться в чистоте.
- При шлифовании не допускать сильного нагрева изделия во избежание термических ожогов рук.

Согласно РД 34.03.201-97 должны соблюдаться данные требования безопасности хранения химических веществ:

Кислота, щелочь, фосфат, реагенты и другие материалы должны храниться в складских помещениях, соответствующих требованиям СНиП II-58-75. На складах должен иметься запас посуды и приспособлений для безопасной расфасовки и транспортирования химических веществ.

Небольшие количества (до 2 - 3 л) щелочи и кислоты (кроме плавиковой) необходимо хранить в стеклянной таре (бутылях) с притертыми пробками в отдельных помещениях, оборудованных вентиляцией.

Плавиковую кислоту следует хранить в полиэтиленовых сосудах или парафинированных бутылках.

Работа с химическими веществами проводится строго на оборудованном столе с защитным стеклом и системой вытяжной вентиляции, работать в халате и резиновых перчатках.

Производственная безопасность обеспечивается, прежде всего, техникой безопасности, которую должен соблюдать каждый работник.

#### **Анализ выявленных опасных факторов:**

##### **Пожарная безопасность**

Помещение, в котором осуществляется процесс шлифования и исследования образцов, по взрывопожарной и пожарной опасности относится к категории Д: пониженная пожароопасность, в которых находятся негорючие вещества и материалы в холодном состоянии.

Среди организационных и технических мероприятий, осуществляемых для устранения возможности пожара, выделяют следующие меры:

- использование только исправного оборудования;
- проведение периодических инструктажей по пожарной безопасности;
- назначение ответственного за пожарную безопасность помещения;
- отключение электрооборудования, освещения и электропитания по окончании работ;
- курение в строго отведенном месте;
- содержание путей и проходов для эвакуации людей в свободном состоянии.

В помещении необходимо иметь 2 огнетушителя марки ОП-3, ОУ-3, исходя из размеров помещения, а также силовой щит, который позволяет мгновенно обесточить помещение. Огнетушители должны всегда содержаться в исправном состоянии, периодически осматриваться, проверяться и своевременно перезаряжаться. Желательно помещать на стенах инструкции по пожарной безопасности и план эвакуации в случае пожара. В случаях, когда не удастся ликвидировать пожар самостоятельно, необходимо вызвать пожарную охрану и покинуть помещение, руководствуясь разработанным и вывешенным планом эвакуации.

### **Электробезопасность**

Следует учитывать, что все оборудование в лаборатории является электрическим, поэтому необходимо обращаться к ГОСТ Р 12.1.019-2009. Электробезопасность должна обеспечиваться:

- конструкцией электроустановок;
- техническими способами и средствами защиты;

- организационными и техническими мероприятиями.

Электроустановки и их части должны быть выполнены таким образом, чтобы работающие не подвергались опасным и вредным воздействиям электрического тока и электромагнитных полей, и соответствовать требованиям электробезопасности. При возникновении пожаров каждый работник должен позвонить в службу спасения, дать сигнал тревоги.

К электрозащитным средствам относятся:

- изолирующие штанги всех видов;
- изолирующие клещи;
- указатели напряжения;
- сигнализаторы наличия напряжения индивидуальные и стационарные;
- диэлектрические ковры и изолирующие подставки;
- защитные ограждения (щиты и ширмы);
- ручной изолирующий инструмент;
- плакаты и знаки безопасности;

Перед началом работ каждый работник должен пройти инструктаж и пройти необходимое тестирование для повышения ответственности каждого работника. Для обеспечения защиты от поражения термическим действием электрической дуги при работах в закрытых и открытых электроустановках (оборудование электрических сетей, станций и подстанций, контактная сеть железных дорог) со снятием и без снятия напряжения дополнительно следует применять специальные защитные термостойкие комплекты, включающие одежду, обувь, средства защиты головы и рук.

### **Охрана окружающей среды**

В настоящее время стремятся предусмотреть комплекс мер по защите и охране регионов при проведении экспериментов и работ с материалами находящимися в наноразмерном диапазоне. При производимых манипуляциях с образцами, подвергнутыми шлифовально-полировальным работам, так как это является источником загрязнения, необходимо предпринять меры по минимизации или полному исключению загрязнения окружающей среды.

Материалы могут всплывать, и оставаться в воздухе, вследствие этого они могут перемещаться воздушными потоками за пределы лаборатории, осаждаясь загрязнять литосферу, проникать в подземные и наземные воды, выноситься из лаборатории пассивно человеком на одежде и коже. В случае нарушения процессов утилизации металлических порошков возможно попадания в водосточные трубы и систему водоснабжения, при этом будет происходить загрязнение литосферы, гидросферы.

Доля материала, проникающая в окружающую среду, не превышает допустимых норм, поэтому нет необходимости в создании санитарной зоны.

Экологическая задача лаборатории заключается в рациональном использовании сырья и электроэнергии, надежном хранении различных химикатов, замене вредных для окружающей среды технологических процессов

#### Утилизация отходов:

Частицы металлического порошка, оставшиеся после процесса шлифования, должны быть рассортированы по химическому составу, степени твердости, величине зерна и затем отправлены на предприятия по утилизации металлических отходов для дальнейшей переплавки.

Использованные растворы кислот собирают в тару и затем нейтрализуют твердыми карбонатами или гидроксидами натрия или калия. Затем жидкость выливают в канализацию с одновременной подачей воды.

#### **Защита в чрезвычайных ситуациях (ЧС)**

Ликвидация ЧС осуществляется силами и средствами предприятий, учреждений и организаций субъектов РФ, на территории которых сложилась ЧС, при проведении аварийно-спасательных и других неотложных работ.

В научной лаборатории, о которой идет речь в данной работе, для обеспечения защиты в ЧС должны соблюдаться данные требования:

- обозначен запасный выход
- на пути к выходу нет препятствий
- соблюдены целостность и исправность электрической проводки

- в помещении доступны первичные средства пожаротушения (огнетушитель)

- соблюдены правила безопасности хранения химических и взрывоопасных веществ

### **Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности труда**

В систему таких мероприятий должны входить:

- постоянное совершенствование технологических процессов и оборудования с целью устранить и предотвратить возможность появления производственных вредностей;

- переход от ручной работы к механизированной (в данном случае – процесс шлифования образцов)

- безусловное соблюдение технологических режимов, строгий контроль за их исполнением;

- знание и соблюдение техники безопасности

- безусловное соблюдение режимов труда и отдыха, правильная организация рабочего места;

- постоянный контроль за состоянием воздушной среды производственных помещений (соблюдение норм предельно допустимого количества абразива в воздухе и паров химических веществ);

- соблюдение требований безопасности труда к освещенности помещения, отоплению, вентиляции (система вытяжной вентиляции), кондиционированию воздуха;

Регулярные медицинские осмотры;

- соблюдение норм допустимой концентрации вредных веществ в воздухе

- доступ к системе водоснабжения, сан. узлу

- регламентированные перерывы в работе на обед и на отдых

- оборудованное помещение для отдыха работников, оснащенное необходимой мебелью (стулья, кресла, столы, холодильник, микроволновая печь, электрический чайник) и доступ к питьевой воде.

## Заключение

В ходе работы над магистерской диссертацией были рассмотрены аспекты применения аддитивно полученных материалов в триботехнике: в деталях, которые входят в узлы трения. Вместе с тем материалы были исследованы на пригодность для работы в динамических режимах нагружения, что еще раз подчеркнуло важность исследования материалов именно в динамических режимах нагружения и работа с дизайном структуры материала, что сведет к минимуму износ деталей, что экономически и экологически выгодно. Дальнейшим вектором развития данной работы станут исследования, направленные на расширение спектра материалов и различных режимов нагружения в рамках обучения в аспирантуре.

### Список публикаций студента

1. Буханченко С. Е., Пугачёва А. Е. Исследование структуры и механических свойств аддитивно полученных металлических элементов изделий // Современное машиностроение: наука и образование: материалы 5-й Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 30 Июня-1 Июля 2016. - Санкт-Петербург: СПбПУ, 2016 - С. 1219-1227 [605008-2016]
2. Пугачёва А. Е., Утьев О. М., Василькова М. А. Авторские украшения с применением технологии оксидирования при повышенной температуре // Gaudeamus Igitur. - 2015 - №. 1. - С. 123-125 [1007310-2015]
3. Пугачёва А. Е., Утьев О. М. Создание авторских украшений с применением технологии оксидирования при повышенной температуре // Современные материалы, техника и технология: материалы 4-й Международной научно-практической конференции, Курск, 25-26 Декабря 2014. - Курск: Университетская книга, 2014 - С. 368-372 [144202-2015]
4. Пугачёва А. Е. Художественное оксидирование в декоративной обработке материалов // Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы - 2015 (МНТК "ИМТОМ-2015"): материалы Международной научно-технической конференции. Часть 2, Казань, 2-4 Декабря 2015. - Казань: Фолиант, 2015 - С. 138-142 [710209-2016]
5. Пугачёва А.Е., Буханченко С.Е. Анализ применимости аддитивно полученных конструкционных материалов в трибосопряжениях на основе характеристик пористости // XXVIII Международная Инновационно-ориентированная Конференция Молодых Учёных и Студентов МИКМУС – 2016, г. Москва, 7-9 декабря 2016. – М.: ИМАШ РАН, 2016 – С. 25.

### Список использованных источников

1. Буханченко С.Е. Автоматизированный комплекс для триботехнических испытаний конструкционных материалов и смазочных сред в статическом и динамическом режимах : дис. кандидата технических наук : 01.02.06 / Том. политехн. ун-т. - Томск, 2005. - 170 с.
2. Машиностроение -- Машиноведение -- Трение, теория износа и смазки машин и механизмов. Трибология -- Трение в машинах и механизмах -- Трибометрия -- Оборудование -- Автоматизация
3. Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры
4. Sikora E. A., Ermolaev A. V. Selecting a vibration diagnostic defect 'Mechanical weakening of a structure' // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2016 - Vol. 124, Article number 012166. - p. 1-8 [598307-2016].
5. Горячева И.Г. Механика фрикционного взаимодействия. - М.: Наука, 2001. 478 с.
6. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия: Пер с англ. - М.: Мир, 1989. - 510 с.
7. Мышкин Н.К. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии. - Чебоксары.: МАИК "Наука/ Интерпериодика" - 2007. - 357 с., ил
8. Попов В.Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения. От нанотрибологии до динамики землетрясений. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. - 352 с.
9. Крагельский И. В, Добычин М. Н., Комбалов В. С. Основы расчетов на трение и износ. - М.: Машиностроение, 1977. - 526 с.
10. Горячева И.Г., Чекина О.Г. Модель усталостного разрушения поверхностей// Трение и износ. 1990. Т. 11, №3. С. 1-11
11. Борисов М.В., Павлов И.А., Постников В.И. Ускоренные испытания машин на износостойкость как основа повышения их качества. - М.: Изд-во стандартов, 1976 - 352 с.
12. Браун Э.Д., Евдокимов Ю.А., Чичинадзе А.В. Моделирование трения и изнашивания в машинах. - М.: Машиностроение, 1982. - 191 с.

13. Испытательная камера машины трения / Буханченко С.Е., Ларионов С.А., Пушкаренко А.Б. Патент РФ № 2163013. Оpubл. 10.02. 01., Бюл. № 4.
14. Автоматизированный комплекс для испытания трибосопряжений на трение и износ в статическом и динамическом режимах трения / Буханченко С.Е., Ларионов С.А., Пушкаренко А.Б. Патент РФ № 2165077. Оpubл. 10.04.01, Бюл. № 10.
15. Иванов А. Электронно-лучевое напыление: технология и оборудование:// Иванов А., Смирнов Б. Наноиндустрия научно-технический журнал. - М.: 2012, №6.
16. [http://3dtoday.ru/wiki/SLS\\_print/](http://3dtoday.ru/wiki/SLS_print/) (дата обращения 5.04.2016).
17. ГОСТ 12.3.002-75. Система стандартов безопасности труда. Процессы производственные. Общие требования безопасности
18. ГОСТ 12.1.004-91. Пожарная безопасность. Общие требования
19. ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны

## Приложение А

### LITERATURE REVIEW

Releasing of a new product line implies such important factors as cutting time and development cost and preparation for the production. This can be achieved not only by using new advance developments and materials in technology cycles, but also by error trapping on the initiatory stages of production.

Additive technologies (AT) is the second link in the technological chain of production: at first the object is being planned in three-dimensional CAD/CAM/CAE systems. Nevertheless, the use of these systems in model engineering is not enough. It is necessary to create a tangible solid prototype; the use of a material similar to the structural one is also desirable.

Furthermore, the use of traditional methods is disadvantageous for small series products, individualised products or spare parts. That is why the AT are used as a means of modern production systems. These technologies allow people to create a tangible object with high precision and surface quality, using only data from three-dimensional CAD/CAM/CAE systems without any equipment. These details can be used as prototypes for design, testing the assemblability, creating master models for further technologies, or as final products.

The development and implementation of the additive technologies in high-tech manufacturing is now one of the main paradigms in technical upgrading of modern industry.

Additive technologies are based on the results of fundamental studies in the areas of laser and informational technologies, physical chemistry, material engineering, computer simulation. The number of the AT-related scientific publications has reached the higher-order in the last two years. The AT based on various processes of production through the “addition” of material (as compared to the traditional metal technologies, based on its removal) provides the highly accurate (up to 100 nm) development, production and restoring of unique products of metals, alloys, ceramics and polymers, as well as their composite alloys, through the direct layer-by-layer synthesis, with substantial saving of expensive materials (up to 90%). Increasing the

use and upgrading the efficiency of AT require the development of new materials (special metallic and non-metallic powders, fibers, hydrogels, etc) and physico-chemical processes, on which the specific AT are based.

Look at the 3d printing techniques (Table 1.).

*Table 1. Additive technologies.*

| Technology                                   | Material      | Main settings                                                                             | Requirements                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|----------------------------------------------|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>STL</b> —<br>sterolithography             | Photopolymer  | Laser ray harden material;<br>Print thickness 0,1-0,2 mm;<br>Printing area 500x500x600mm; | The polymerization rate depends on the polymer density. The thicker the resin, the worse its hydromechanical properties. The more powerful the photoinitiator introduced into the resin, the less time is needed for solidification. The more powerful the laser, the shorter the life of the resin, because it is subject to background illumination. |
| <b>SGC</b> — Solid<br>Ground Curing          | Photopolymer  | UV lamp harden material on solid support. Metod is variety of masked sterolithography.    | The polymerization rate depends on the polymer density. The thicker the resin, the worse its hydromechanical properties. The more powerful the photoinitiator introduced into the resin, the less time is needed for solidification. The more powerful the laser, the shorter the life of the resin, because it is subject to background illumination. |
| <b>FDM</b> — Fused<br>Deposition<br>Modeling | Thermoplastic | Technology is used in single manufacture.                                                 | The thermoplastic should have a high fluidity and medium viscosity - so that the material can easily pass through the nozzles, but does not spread                                                                                                                                                                                                     |

|                                               |                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                   |
|-----------------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                               |                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                    | before baking.                                                                                                                                                                    |
| <b>BPM</b> — Ballistic Particle Manufacturing | Thermoplastic                        | Drops of polymer are applied to a special support then down at the same time formation of cross-section.                                                                                                                                                                           | High melting point of materials, defects.                                                                                                                                         |
| <b>SLS</b> — Selective Laser Sintering        | Powder of ceramics, metal or polymer | The laser is based on carbon dioxide. Technique that uses a laser as the power source to sinter powdered material, aiming the laser automatically at points in space defined by a 3D model, binding the material together to create a solid structure. Print thickness 0,1-0,15 mm | The requirements depend on the type of material, but powders should be finely-divided порошки должны быть мелкодисперсными и примерно одинаковыми по размеру должны быть частицы. |
| <b>LOM</b> — Laminated Object Modeling        | Any laminated material               | In it, layers of adhesive-coated paper, plastic, or metal laminates are successively glued together and cut to shape with a knife or laser cutter. Objects printed with this technique may be additionally modified by machining or drilling after printing.                       | The requirements depend on the type of material.                                                                                                                                  |

|                                 |              |                                                                                                                                                                                                                        |                                         |
|---------------------------------|--------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| <i>MJM</i> - Multi Jet Modeling | Photopolymer | Procedure of the rapidly Protoyping, with which a model is developed by a print head with several linear arranged nozzles, which functions similarly as the print head of an ink jet printer. Number of nozzles 96-448 | The support material should be fusible. |
|---------------------------------|--------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|

## **The review of metallic 3d materials, used in additive manufacturing, and their application**

There are certain requirements for additive manufacturing powders. First of all, it is sphericity, specific grain size, low content of gaseous impurities – such as oxygen and nitrogen. The modern aircraft entities purchase and use the powders of alloys of foreign origin, and there is a critical need for metallic powders of domestic alloys. As there is no serial production of powder materials for these technologies in Russia, let us review the foreign analogues that are presented in this work.

***EOS CobaltChrome MP1*** is - a hot-strength cobalt-chromium-molybdenum alloy for productive and biomedical applications.

### *General information:*

Cobalt-chromium-molybdenum based details are produced from EOS Cobalt Chrome MP1 alloy.

This group of alloys is characterized by excellent mechanical properties (strength, hardness, etc.), resistance to corrosion and high-temperature strength. Such alloys are widely used for biomedical purposes: in producing dental and medical implants, and **parts requiring high mechanical properties in elevated temperatures** such as aircraft engines.

### Properties:

- high strength, resistance to corrosion and high-temperature strength
- mechanical properties improve at a higher temperature (up to 500-600 °

C)

- The chemistry conforms to the composition UNS R31538 of high carbon CoCrMo alloy,

- nickel free (nickel content <0.1 %).
- fully meet the requirements of ISO 5832-4 and ASTM F75 for cast

CoCrMo implant alloys.

### Application:

- functional prototypes,
- series-production parts,

- mechanical engineering,
- production of medical equipment.

*Table 2. Chemical composition of EOS CobaltChrome MP1.*

| <b>Chemical element</b> | <b>Composition in percent, %</b> |
|-------------------------|----------------------------------|
| Co                      | 60.5                             |
| Cr                      | 28                               |
| W                       | 9                                |
| Si                      | 1.5                              |
| Mn, N, Nb, Fe           | < 1                              |

*Table 3. Technical information of EOS CobaltChrome MP1.*

| <b>Characteristics</b>                                                                                                                    | <b>Value</b>                               |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| Flow limit, Re                                                                                                                            | 935 (N/mm <sup>2</sup> )                   |
| Tensile strength, Rm                                                                                                                      | 1030 (N/mm <sup>2</sup> )                  |
| Extending A                                                                                                                               | 10 %                                       |
| Young's Modulus                                                                                                                           | 230 (kN/mm <sup>2</sup> )                  |
| Thermal conductivity $\lambda$                                                                                                            |                                            |
| Coefficient of thermal expansion                                                                                                          | 14.1 x 10 <sup>-6</sup> (K <sup>-1</sup> ) |
| Melting range $\Delta$                                                                                                                    | 1320 – 1420(C)                             |
| Density $\rho$                                                                                                                            | 8.6 (g/cm <sup>3</sup> )                   |
| The strength of the connection between the metal and the ceramic in accordance with EN ISO 9693, 3-Pt.-bend test (25 MIIa on EN ISO 9693) | 40 (N/mm <sup>2</sup> )                    |
| Biocompatibility L 929 (EN ISO 10993-5, -12)                                                                                              | No appearance of cellular toxic substances |

The material of that kind is used for producing prosthetic devices. The most widespread is a non-noble alloy which is used in dentistry. It has positive characteristics: it is easyflowing, which allows to cast thin models; it has high

strength, high stretchability, stainlessness and it can be easily soldered (prosthetic devices).

***EOS Aluminium AlSi10Mg (silumin)*** – a lightweight metal for motosport and aerospace applications.

*General information:*

AlSi10Mg is a typical casting alloy with good casting properties, which is used for cast parts with thin walls and complex geometry. It features high strength, hardness and good dynamic properties and is therefore used for parts subject to high loads. EOS Aluminium AlSi10Mg can be applied to the parts that require a combination of good thermal properties with low weight. Such parts can suffer spark erosion, welding, micro bead blasting and coating.

*Properties:*

- Good casting characteristics,
- High strength and hardness,
- good dynamic properties

*Application:*

- functional prototypes,
- small series products,
- motosport,
- automobile manufacturing,
- inner parts of aerospace crafts.

*Table 4. Chemical composition of EOS Aluminium AlSi10Mg.*

| <b>Chemical element</b> | <b>Composition in percent, %</b> |
|-------------------------|----------------------------------|
| Al                      | Base                             |
| Si                      | 9,0 - 11,0                       |
| Mg                      | 0,20 - 0,45                      |
| Fe                      | 0 - 0,55                         |
| Mn                      | 0 - 0,45                         |
| O                       | 0 - 0,20                         |

|    |          |
|----|----------|
| Ti | 0 - 0,15 |
| Cu | 0 - 0,10 |
| Zn | 0 - 0,10 |
| C  | 0 - 0,05 |
| Ni | 0 - 0,05 |
| Pb | 0 - 0,05 |
| Sn | 0 - 0,05 |

*Table 5. Technical information of EOS Aluminium AlSi10Mg*

| <b>Characteristics</b>         | <b>Value</b>                   |
|--------------------------------|--------------------------------|
| Flow limit, Re                 | 170 - 220 (N/mm <sup>2</sup> ) |
| Tensile strength, Rm           | 310 - 325 (N/mm <sup>2</sup> ) |
| Extending A                    | 2 - 3 %                        |
| Young's Modulus                | 75x103 (H/mm <sup>2</sup> )    |
| Thermal conductivity $\lambda$ | 120 - 180 (W/m*K)              |

The materials of this kind (e.g. fine antifrictional silumin) are used to produce screw type and tooth-wheels and other parts working in friction conditions. If combined with steel, the antifrictional silumin has higher wearing quality, and lower frictional coefficients and adhesive setting in comparison with traditional aluminum bronze. (screw type and tooth-wheels)

***EOS Titanium Ti6Al4V*** – an alloy used for light engineering.

General information.

EOS Titanium Ti6Al4V is a well-known light alloy which is characterized by having excellent mechanical properties and corrosion resistance combined with light specific weight. in compliance with ASTM F136-02a (ELI Grade 23) CL 41TI ELI - titanium alloy powder for the additive manufacturing of lightweight parts for aerospace and motor racing applications, and also for the production of biomedical implants.

*Properties:*

- Light weight and high specific strength,
- corrosion resistance,
- Laser-sintered parts fulfil requirements of ASTM F1472 (for Ti6Al4V) and ASTM F136 (for Ti6Al4V ELI) regarding maximum concentration of impurities.
- Features very high bioadhesion.

*Application:*

- Functional prototypes,
- Series-production parts,
- motosport,
- Aircraft engineering,
- Biomedical implants.

*Table 6. Chemical composition of EOS Titanium Ti6Al4V.*

| <b>Chemical element</b> | <b>Composition in percent, %</b> |
|-------------------------|----------------------------------|
| Ti                      | Base                             |
| Al                      | 5,5 - 6,5                        |
| V                       | 3,5 - 4,5                        |
| Fe                      | 0 - 0,25                         |
| C                       | 0 - 0,8                          |
| O                       | 0 - 0,13                         |
| N                       | 0 - 0,05                         |
| H                       | 0 - 0,012                        |

*Table 7. Technical information of EOS EOS Titanium Ti6Al4V.*

| <b>Characteristics</b> | <b>Value</b>                     |
|------------------------|----------------------------------|
| Flow limit, Re         | 900 - 1200 (N/mm <sup>2</sup> )  |
| Tensile strength, Rm   | 1100 - 1300 (N/mm <sup>2</sup> ) |

|                                  |                                       |
|----------------------------------|---------------------------------------|
| Extending A                      | 5 - 10 %                              |
| Young's Modulus                  | 110x103 (N/mm <sup>2</sup> )          |
| Thermal conductivity $\lambda$   | 7 (W/m*K)                             |
| Coefficient of thermal expansion | $9 \times 10^{-6}$ (K <sup>-1</sup> ) |

This titanium alloy powder is used for manufacturing of lightweight parts for aerospace and motor racing applications, and also for the production of biomedical implants and medical components.

Application examples: components with inner cooling system, bionic parts and osteal prostheses with biocompatible structure.

EOS Titanium Ti6Al4V: good biocompatibility with human body and rare hypersensitivity reactions allow to produce prostheses from the material of that kind. High biocompatibility of titanium is a result of its ability to form on its surface a protective oxide layer in a split second. Due to this layer it doesn't corrode and doesn't give up free metal ions able to cause pathologic processes around implant or prosthetic device.

***EOS StainlessSteel PH1*** – a stainless steel used in mechanical engineering and medical device industry.

#### *General information*

EOS StainlessSteel PH1 is a stainless steel. The chemistry of EOS StainlessSteel PH1 conforms to the compositions of 15-5 PH, DIN 1.4540 and UNS S15500. This kind of steel is characterized by having good corrosion resistance and excellent mechanical properties, especially in the precipitation hardened state. This type of steel is widely used in variety of medical, aerospace and other engineering applications requiring high hardness, strength and corrosion resistance.

#### *Properties:*

- very high strength,
- Hardness is approximately 45 HRC

#### *Application:*

- Functional prototypes,

- Series-production parts,
- mechanical engineering,
- medical device industry.

*Table 8. Chemical composition of EOS StainlessSteel PH1.*

| <b>Chemical element</b> | <b>Composition in percent, %</b> |
|-------------------------|----------------------------------|
| Fe                      | 75                               |
| Cr                      | 14.48                            |
| Ni                      | 4.5                              |
| Cu                      | 3.5                              |
| Mn                      | ≤1                               |
| Si                      | ≤1                               |
| Nb + Ta                 | 0.3                              |
| C                       | ≤0.07                            |
| P                       | ≤0.04                            |
| S                       | ≤0.03                            |

*Table 9. Technical information of EOS StainlessSteel PH1.*

| <b>Characteristics</b>    | <b>Value</b> |
|---------------------------|--------------|
| Yield strength in tension | 1380 MPa     |
| Elasticity modulus        | 200 GPa      |
| Vickers hardness          | 445          |
| Melting range             | 1038°C       |

From EOS Stainless Steel PH1 parts requiring high corrosion resistance are produced. It contains not less than 12% of chromium, which promotes the formation of a resistant oxide layer protecting the steel from oxidation. Parts made from EOS StainlessSteel PH1 can be welded, and they are characterized by hardness and good corrosion resistance. Stainless steel is used for marine applications as an analog for

non-ferrous metals and alloys for producing propeller shaft lining, turbine blading, enc. (propeller drive shaft, crank shaft).

**EOS NickelAlloy IN718** is a nickel chromium based alloy used for manufacturing.

#### *General information*

EOS NickelAlloy IN718 (inconel) is a nickel based heat resistant alloy. Its composition corresponds to UNS N07718, AMS 5662, AMS 5664, W.Nr 2.4668, DIN NiCr19Fe19NbMo3. This kind of precipitation-hardening nickel-chromium alloy is characterized by having good tensile, fatigue, creep and rupture strength at temperatures up to 700°C. EOS NickelAlloy IN718 alloy has also outstanding corrosion resistance in various corrosive environments. This material is ideal for many high temperature applications such as gas turbine parts, instrumentation parts, power and process industry parts. Material also possesses excellent cryogenic properties and potential for cryogenic applications.

#### *Properties:*

- heat-resistant
- outstanding corrosion resistance
- high performance at temperatures up to 700°C, e.g. tensile strength, fatigue, creep and rupture

#### *Applications:*

- Functional prototypes
- Series-production parts
- Aerospace
- Industry (e.g. high-temperature turbine components).

*Table 10. Chemical composition of EOS NickelAlloy IN718.*

| <b>Chemical element</b> | <b>Composition in percent, %</b> |
|-------------------------|----------------------------------|
| Ni                      | Base                             |
| Fe                      | 18,5                             |
| Cr                      | 18,0                             |

|    |      |
|----|------|
| Nb | 5,20 |
| Mo | 3,0  |
| Ti | 0,90 |
| Al | 0,50 |
| C  | 0,04 |

**EOS NickelAlloy HX** is a nickel based alloy used in aerospace technology and mechanical engineering

*General information:*

EOS Nickel Alloy HX is a heat and corrosion resistant metal alloy powder intended for processing on EOSINT M 280 systems. It is a nickel-chromium-iron-molybdenum alloy in fine powder form. Its composition corresponds to UNS N06002. This type of alloy is characterized by having high strength and oxidation resistance also at elevated temperatures, and is often used up to 1200 °C. Its applications can be found in aerospace technology, e.g. gas turbine parts. Standard laser processing parameters results in full melting across the entire geometry, typically with 20 µm layer thickness. Parts built from EOS NickelAlloy HX can be heat treated and material properties can be varied within a specified range. The parts can be machined, spark-eroded, welded, micro shot-peened, polished, and coated if required. Unexposed powder can be reused.

***Properties***

- heat and corrosion resistant
- strength and oxidation resistance
- subsequent heat treatment and machining possible

***Applications***

- Functional prototypes
- Rapid Repair
- Rapid Manufacturing
- Aerospace

It can be also used in industry for components with severe thermal conditions and high risk of oxidation, e.g. combustion chambers, burner components, fans, roller hearths and support members in industrial furnaces.

*Table 11. Chemical composition of EOS Nickel Alloy IN718.*

| <b>Chemical element</b> | <b>Composition in percent, %</b> |
|-------------------------|----------------------------------|
| Ni                      | Base                             |
| Cr                      | 23,0                             |
| Fe                      | 20,0                             |
| Mo                      | 10,0                             |
| C o                     | 2,50                             |
| W                       | 1,0                              |
| Mn                      | 1,0                              |
| C                       | 0,15                             |
| Si                      | 1,0                              |
| P                       | 0,04                             |
| S                       | 0,03                             |

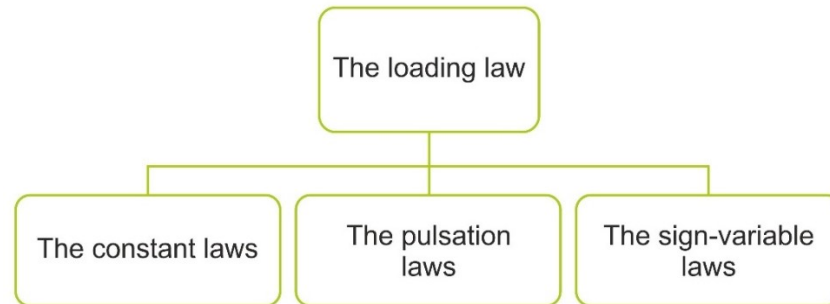
*EOS Nickel Alloy IN718* is used as a material for producing sheet facing material for supersonic airplanes. XH45MBTЮБП ГОСТ 5632 can serve as a domestic equivalent for Inconel alloy. This material combines high strength with excellent weldability and has no susceptibility to corrosion cracking of heat-affected zones. It features high rupture strength at temperatures up to 700°C. It was made as a sheet facing material for supersonic airplanes. At the present time it is widely used in producing gas turbine parts, rocket engines, spacecraft, nuclear reactors, and in petrochemical industry. The application is allowable by any combination of hydrogen sulphide, chlorides and in-plant environment pH, with the condition of attaining flow limit 1034 MPa.

### **The laws of loading in friction units**

Many machinery parts and elements such as lay shafts, bearings, teeth of a tooth wheel, etc. are working in the conditions in which the strain in them

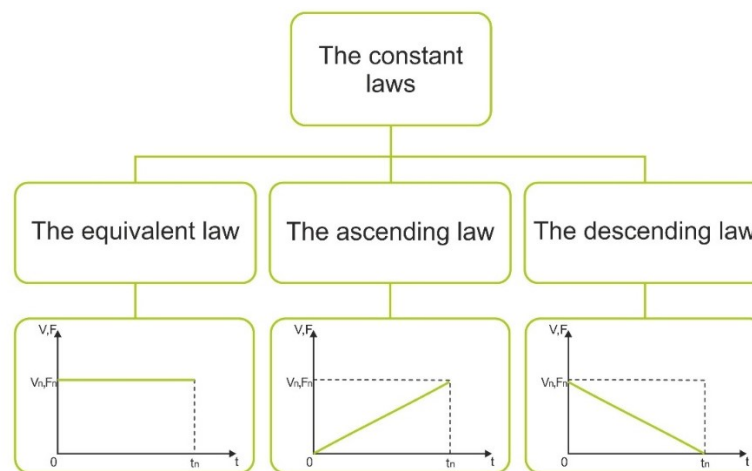
occasionally changes its value and character. By the nature of temporal variation machinery loads are distinguished as static and dynamic.

*The loading law* (picture 1) is the characteristic of the degree of tension of the part - a set of consecutive values of tension  $\sigma$  in one period under regular loading.



*Picture 1. Classification of loading laws.*

**The constant laws** are static laws under which the load acts for a sufficiently long period of time and the rate of change (increase or decrease) is much less than the distortion propagation velocity in the construction.

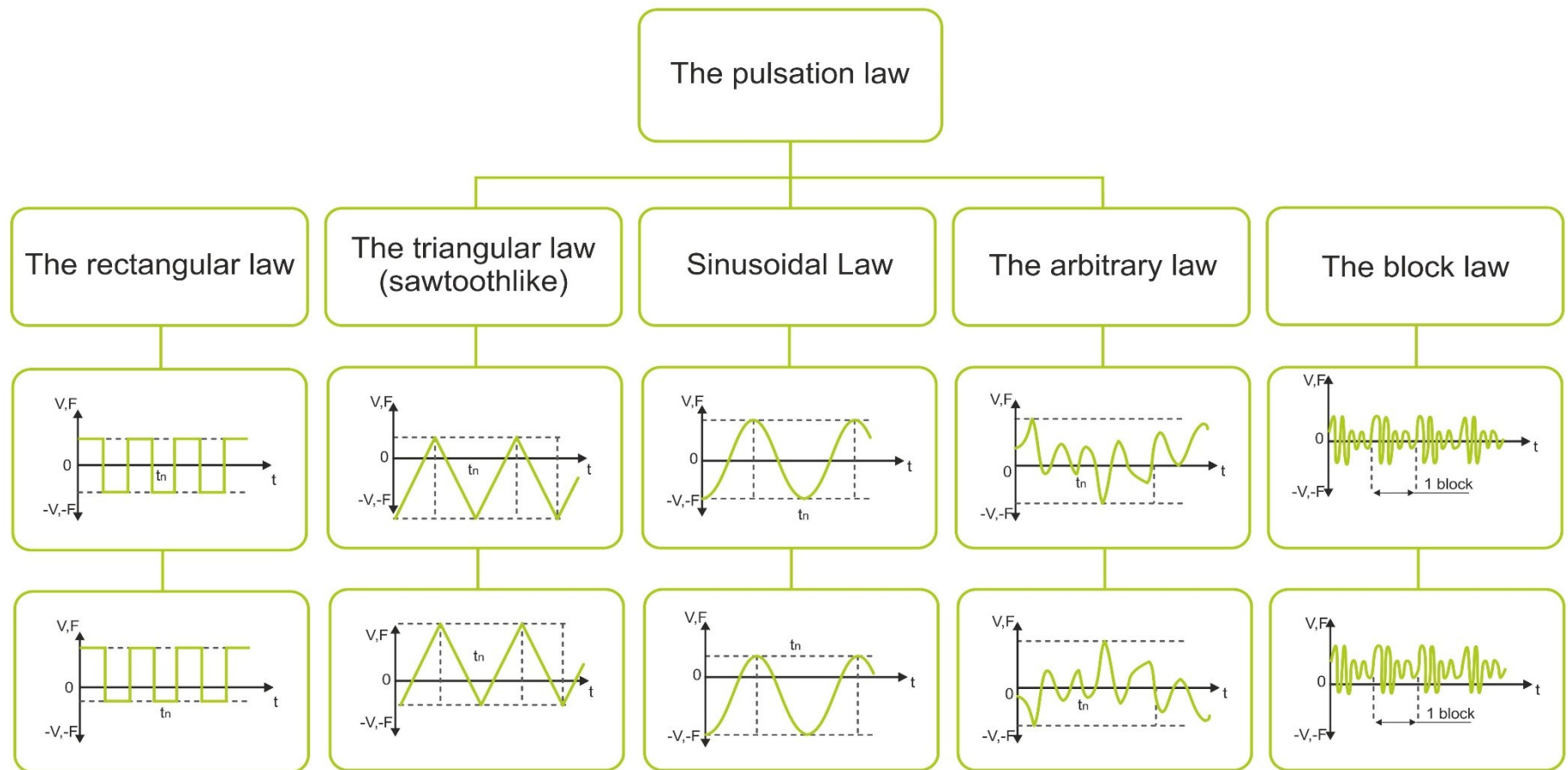


*Picture 2. Structural diagram of constant loading laws.*

*The equivalent law* is characterized by the constantly acting load that does not change in magnitude. This law is usually manifested in the operation of hydraulic scissors' friction units, gripping mechanisms of industrial robots, and in various hydraulic, pneumatic and mechanical lifting mechanisms.

*The descending law* is contrary to the ascendant: the loading starts from the maximum and is reduced to zero with constant intensity.

*The pulsation law* is a dynamic law (also called a zero law) in which the load changes from either the initial value to any positive value and vice versa.



Picture 3. Structural diagram of pulsation laws.

*The rectangular law* of the load regulation is characterized by a step-load change and its fixation for a particular period of time until the next change. The effect of this law is cyclic. This law is being applied in the mechanisms of electromechanical relay grips and clamps.

Under the action of the *triangular (sawtoothlike) law*, the load increases (decreases) with a certain intensity to a predetermined value, and then decreases (increases) with an unchanged intensity to the initial value, cycle after cycle. It is being applied in various camshaft mechanisms.

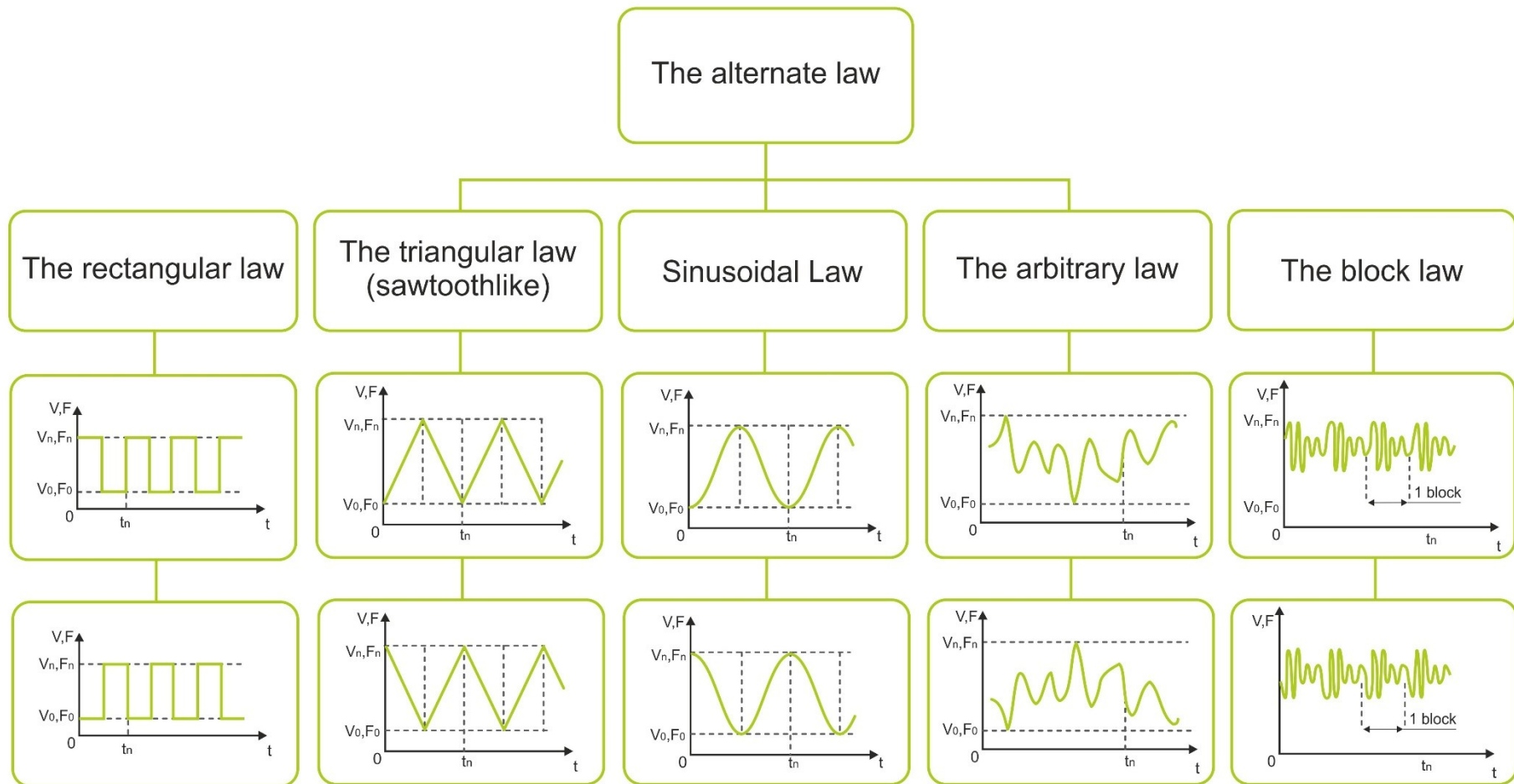
*Sinusoidal Law* is the striking example of pulse-coupled laws and its action can be described as follows: the load increases and decreases in a sinusoid (cosine wave). The work of this law can be seen in the work of teeth of a tooth wheel working in one direction, rods, pushers and connecting rods of slow-moving machines, low-loaded in the reverse motion.

*The arbitrary law* does not seem to remind any of the geometric figures; during its operation, the loading is absolutely arbitrary, it increases then decreases. This law can be applied practically in all complex machines and mechanisms, for example, in internal-combustion engines, speed boxes, reducing gears, hydraulic and pneumatic pumps.

*The block law* is a sequence of loading blocks which can include either the same law or several different ones; this law is rarely found in the work of real machines and mechanisms and is used mainly on test machines and test beds.

#### *The alternate law*

It is *the dynamic law* in accordance with which the load changes its value and the direction of the action, i.e. the load can be found on the graphs both on the positive and on the negative plane (for ex., the bending value of rotating lay shafts).



Picture 4. Structural diagram of alternate laws.