

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«КАЗАНСКИЙ (ПРИВОЛЖСКИЙ) ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



КАШАПОВ ЛЕНАР НАИЛЕВИЧ

ПЛАЗМЕННО-ЭЛЕКТРОЛИТНАЯ ОБРАБОТКА ДЕТАЛЕЙ  
АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ, ПОЛУЧЕННЫХ С  
ПОМОЩЬЮ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ

Специальность 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы»

Специальность 2.5.15 – «Тепловые, электроракетные двигатели и  
энергоустановки летательных аппаратов»

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:

д.т.н. Ларионов В.М.

Казань-2022

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	5
Глава 1 Современное состояние исследований и применения технологий селективного лазерного сплавления.....	13
1.1 Аддитивные технологии изготовления металлических изделий .....	13
1.2 Физико-химические методы обработки металлических изделий аддитивного построения.....	25
1.3 Газовые разряды с жидкими электродами в процессах обработки металлических изделий. ....	43
1.4 Цель и задачи диссертации .....	56
Глава 2 Экспериментальные установки и методики измерений.....	59
2.1 Экспериментальные установки исследования плазменно-электролитного разряда в процессах обработки материалов .....	59
2.2 Оборудование и технология селективного лазерного сплавления .....	65
2.3 Термическая обработка изделий, изготовленных по технологии селективного лазерного сплавления .....	71
2.4 Методы исследования механических, физико-химических характеристик поверхности изделий и разряда в электролите .....	75
Глава 3 Экспериментальные и теоретические исследования плазменно-электролитного разряда в процессах обработки материалов .....	89
3.1 Электрические и энергетические характеристики плазменно-электролитного разряда.....	89
3.2 Влияние характеристик электролита на процессы самоподдержания разряда и обработки материалов .....	107

3.3 Характеристика микроструктуры поверхности в зависимости от параметров плазменно-электролитного разряда.....	116
3.4 Математическое моделирование условий формирования микроструктуры поверхности при плазменно-электролитной обработке	120
Глава 4 Исследование физико-химических характеристик пресс-форм лопаток и деталей газотурбинного двигателя, полученных по технологии селективного лазерного сплавления .....	130
4.1 Изготовление пресс-форм для лопаток и деталей газотурбинного двигателя селективным лазерным сплавлением.....	130
4.2 Исследование структуры и фазового состава изделий.....	139
4.3 Исследование физико-механических характеристик .....	154
4.4 Исследование морфологии поверхности СЛС-деталей энергетических установок.....	163
Заключение.....	166
Список литературы .....	167

## Принятые сокращения и условные обозначения

АТ – аддитивные технологии

СЛС – селективное лазерное сплавление

СЛС-изделия – изделия, полученные методом селективного лазерного сплавления

ЭЛПС – электронно-лучевое порошковое сплавление

ПНЭ – аддитивная технология прямого подвода энергии и материала

ИФММПН – инъекционное формование металла методом послойного наплавления

МПН – метод послойного наплавления

ГИП – горячее изостатическое прессование

ЭХП – электрохимической полировки

УКАО – ультразвуковая кавитационная абразивная обработка

МАО – магнитно-абразивная финишная обработка

ЧО – чистовая обработка

ВЧО – вибрационная чистовая обработка

ПМОИ – поверхностная механическая обработка истиранием

ПвМП – полировка в магнитном поле

ПспМП – полировка с помощью магнитного поля

ПЭР – полировка электрическим разрядом

ПЭО – плазменно-электролитная обработка

ВАХ – вольтамперная характеристика

СЭМ – сканирующий электронный микроскоп

ПЭП – плазменно-электролитная полировка

КЭвТР – контактный электролиз в тлеющем разряде

## ВВЕДЕНИЕ

Аддитивные технологии (АТ) – это обобщенное название технологий, предполагающих изготовление изделия по данным цифровой модели методом послойного добавления (add, англ. – добавлять) материала и подразделяются на огромное количество видов, отличающихся методами построения и используемыми материалами. За последнее десятилетие АТ начали активно использоваться в машиностроении, в частности, в прототипировании. Также развитие АТ способствует их применению в массовом производстве. Столь сильное развитие данного метода производства обусловлено его принципиальным отличием от классических методов изготовления (литье, прокатка, прессование, волочение, штамповка, ковка, фрезерование и др.). Данный принцип заключается в использовании принципа “добавления”, а не “удаления” материала как в случае с классическими субтрактивными методами. Именно высокие требования к геометрии изделия, которое невозможно было получить классическими методами, например, создание ячеистых структур, дало толчок развитию АТ.

Несмотря на данные преимущества остается ряд недостатков, тормозящих широкое внедрение АТ в массовое производство. К ним можно отнести низкие эксплуатационные характеристики металлических изделий (низкая прочность, высокая шероховатость, наличие внутренних дефектов), которые в некоторых случаях могут быть устранены применением различных методов обработки. При этом методы термической и финишной обработки увеличивают трудоемкость и время изготовления. Поэтому поиск новых методов финишной обработки сложно-профильных изделий аддитивного производства является актуальной задачей.

Одним из перспективных методов обработки является плазменно-электролитный процесс, суть которого заключается в использовании газовых разрядов с жидкими электродами. В зависимости от вида и полярности жидкого электрода можно получать различные эффекты воздействия, начиная с полировки и термической обработкой и заканчивая формированием

покрытия. Таким образом, исследование влияния плазменно-электролитной обработки на микроструктуру поверхности изделия, полученных методом селективного лазерного сплавления (СЛС), представляет научный и практический интерес.

На данный момент наибольший вклад в исследования в области плазменно-электролитной обработки поверхностей изделий внесли такие ученые как П. Бруггеман, М. Кушнер, Е. Мелетис, А. Хиклинг, Б. Локке, А. Денаро, Ф. Крчма, Д. Минаката, Е. Нейтс, П. Мезей, Р. Пфилегер, М. Вебб, С. Реутер Б. Тарабова, П. Цай, Й. Канзаки, Д. Верлет, К. Вилсон, К. Ясуи, А. Ерохин, Б.Р. Лазаренко, О.В. Поляков, Е.В. Кривичкий, Д.И. Словецкий, Ю.С. Акишев, Э.Е. Сон, И.Ш. Абдуллин, Ф.М. Гайсин, Н.Ф. Кашапов, А.Ф. Гайсин, А.В. Хлюстова, Ю.А. Лебедев, П.Н. Белкин, Л.Ф. Бахтурова, С.Д. Терентьев, В.В Шамко и А.И. Максимов.

В исследования в области аддитивных технологий наибольший вклад внесли такие ученые как Д. Оливейра, Т. Олсен, Б. Томлин, А. Фатеми, Я. Янг, А. Элиот, Т. Войсин, Р.Н. Кашапов, С. Сингх, М. Атаран, С. Вильямс, С. Форд, П. Эдвардс и др.

Однако, несмотря на большое число исследований в отечественной и зарубежной литературе отсутствуют систематические экспериментальные и теоретические данные о плазменно-электролитной обработке изделий, полученных по технологии селективного лазерного сплавления.

**Целью** данной работы являлось изучение физико-химических процессов взаимодействия низкотемпературной плазмы разряда с жидкими электродами с поверхностью изделий, полученных методом селективного лазерного сплавления, (СЛС-изделий) и разработка метода финишной плазменно-электролитной обработки деталей энергетических установок, полученных методом селективного лазерного сплавления.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Провести обзор существующих методов аддитивного построения металлических изделий, существующих методов термической и финишной

обработки, определить современное состояние известных экспериментальных и теоретических исследований газовых разрядов с жидкими электродами в процессах обработки металлических изделий;

2. Разработать и изготовить экспериментальные установки исследования характеристик плазменно-электролитного процесса при обработке металлических образцов;

3. Установить условия термического, гидроударного и полирующего воздействия газовых разрядов с жидкими электродами на поверхности изделий, полученных селективным лазерным сплавлением;

4. Исследовать зависимость процесса обработки СЛС-изделий от параметров газовых разрядов с жидкими электродами и определить закономерности модификации поверхностных слоев СЛС-изделий от термического, гидроударного и полирующего воздействия;

5. Провести моделирование процесса финишной плазменно-электролитной полировки поверхности СЛС-изделий;

6. Разработать метод плазменно-электролитной обработки деталей энергетических установок, полученных методом селективного лазерного сплавления.

#### **Научная новизна:**

1. В диапазоне  $U=0 - 400$  В,  $I = 0 - 50$  А,  $pH = 1 - 14$  и  $T_{эл} = 15 - 100^{\circ}\text{C}$  исследовано термическое, гидроударное и полирующее воздействие газовых разрядов с жидкими электродами на изделия, полученных методом селективного лазерного сплавления.

2. Определено, что в зависимости от свойств электролита (проводимость, кислотность, температура) наблюдаются различные формы разрядов (от дугового до лидерного). Выявлено, что интенсивное испарение электролита является причиной самостоятельного разряда.

3. Проведено моделирование процесса финишной плазменно-электролитной полировки поверхности изделий, полученных методом

селективного лазерного сплавления, в программном продукте Comsol Multyphysics.

**Практическая значимость:**

1. Разработана технология плазменно-электролитной обработки СЛС-изделий авиационной и энергетической промышленности, при которой происходит термическое, гидроударное и полирующее воздействие газовых разрядов на поверхность СЛС-изделия.

2. Определены оптимальные параметры плазменно-электролитной обработки, обеспечивающие получение поверхностей изделий с требуемым комплексом эксплуатационных свойств.

3. Смоделированы и произведены пресс-формы для изготовления лопаток газотурбинного двигателя и заготовки поршня полученных методом селективного лазерного сплавления.

4. Определены оптимальные параметры электродной системы и процесса плазменно-электролитной обработки данных пресс-форм.

**Работа выполнялась в рамках грантов:**

1) Государственное задание Министерства образования и науки Российской Федерации, проект №11.1300.2017/ПЧ «Развитие научных основ технологии получения титановых изделий с использованием низкотемпературной плазмы»; 2) Государственное задание Министерства образования и науки Российской Федерации, проект №3.9399.2017/БЧ «Развитие научных основ технологии получения титановых изделий с применением вакуумно-плазменного напыления»; 3) НИР «Исследование процессов лазерной и плазменной 3D-печати изделий медицинской техники» (Бюджет 14-154п), 4) Молодежный грант «Исследование процессов плазменно-гидроударной очистки литниковых систем от формовочных масс, применяемых в машиностроении» Академии наук Республики Татарстан; 5) Хозяйственные договора с ПАО «КЭТЗ» «Разработка методик финишной обработки мелкогабаритных металлических сложнопрофильных изделий, произведенных на металлическом 3D-принтере» и «Разработка методики



изготовления мелкогазразмерных изделий медицинского назначения, с использованием методов 3D-прототипирования и литейных технологий». б) Хозяйственные договора с ОАО «КМПО» «Разработка методик создания пресс-форм методом селективного лазерного сплавления».

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Результаты комплексных экспериментальных исследований зависимости образования различных структур разряда от параметров разряда с жидкими электродами.

2. Результаты комплексных экспериментальных исследований термического, гидроударного и полирующего воздействия газовых разрядов с жидкими электродами на СЛС-изделия, в диапазоне  $U=0 - 400$  В,  $I = 0 - 50$  А,  $pH = 1 - 14$  и  $T_{эл}= 15 - 100^{\circ}C$

3. Моделирование процесса плазменно-электролитной обработки поверхности изделий, полученных методом селективного лазерного сплавления.

4. Комбинированный метод плазменно-электролитной обработки деталей энергетических установок, включающий в себя термическое, гидроударное и полирующее воздействие.

5. Пресс-формы для изготовления лопаток газотурбинного двигателя и заготовки поршня полученных методом селективного лазерного сплавления.

6. Определенные оптимальные параметры плазменно-электролитного процесса обработки данных пресс-форм деталей энергетических установок.

**Достоверность** полученных теоретических результатов обеспечивается использованием общепринятых методов численного расчета, а также применением современного программного обеспечения. Достоверность экспериментальных результатов диссертации обеспечивается многократным воспроизведением результатов измерений, проводимых с использованием аттестованных методов, государственных и международных стандартов, поверенных средств измерений, а также статистической обработкой

результатов и оценкой неопределенностей измерений. Полученные экспериментальные результаты согласуются с теоретическими расчетами и находятся в соответствии с результатами, полученными другими авторами.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертации были представлены в виде докладов на 13 международных, всероссийских и республиканских конференциях: 1-7) Международная научно-техническая конференция «Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий» (Казань, Россия, 2013, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021); 8-9) Аддитивные технологии: настоящее и будущее. Международная конференция (Москва, Россия, 2016, 2019); 10) IX International conference «Plasma Physics and Plasma Technology» (Минск, Республика Беларусь, 2018); 11) X Международная научно-техническая конференция "Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы" (Казань, Россия, 2019), 12) VII Международная конференция и молодежная школа «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2021) (Самара, Россия, 2021), 13) Всероссийская (с международным участием) конференция «Физика низкотемпературной плазмы» (ФНТП-2020) (Казань, Россия, 2020).

**Публикации.** Основные результаты по теме диссертации опубликованы в 17 работах, 4 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 10 - в рецензируемых журналах, индексируемых в Scopus и Web of Science, 3 – в других изданиях. Также по тематике диссертации было получено 3 патента.

**Личный вклад автора** заключается в разработке и сборке экспериментальных установок; разработке методик, планирование, постановка и проведение всех экспериментальных и теоретических исследований; обсуждение и обработка экспериментальных данных; разработке математической модели плазменно-электролитной полировки поверхности сплавов, полученных по технологии селективного лазерного сплавления. Автор принимал непосредственное участие в разработке и моделировании модернизированных пресс-форм для изготовления деталей

авиационной промышленности.

**Внедрение результатов исследования.** Основные результаты работы внедрены:

1. В процессе проектирования и создания пресс-форм лопатки авиационного газотурбинного двигателя и поршня для ОАО «Казанское моторостроительное производственное объединение».
2. В учебном процессе кафедры биомедицинской инженерии и управления инновациями Инженерного института ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет» при подготовке бакалавров по направлениям 16.03.01 «Техническая физика» и 27.03.02 «Управление качеством» в рамках дисциплин «Материаловедение» и «Физические основы материаловедения» и при подготовке магистров по направлению 12.04.04 «Биотехнические системы и технологии» в рамках дисциплины «Аддитивные технологии в медицине».

**Соответствие содержания диссертации паспорту научной специальности.** Диссертация соответствует паспортам специальности ВАК 1.1.9 Механика жидкости, газа и плазмы (технические науки) и ВАК 2.5.15 Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов (технические науки) и относится к следующим областям исследования:

1.1.9 Механика жидкости, газа и плазмы:

п.1. Реологические законы поведения текучих однородных и многофазных сред при механических и других воздействиях.

п.2. Гидравлические модели и приближенные методы расчетов течений в водоемах, технологических устройствах и энергетических установках.

п.4. Течения сжимаемых сред и ударные волны.

п.6. Течения многофазных сред (газожидкостные потоки, пузырьковые среды, газовзвеси, аэрозоли, суспензии и эмульсии).

п.8. Физико-химическая гидромеханика (течения с химическими

реакциями, горением, детонацией, фазовыми переходами, при наличии излучения и др.).

п.12. Струйные течения. Кавитация в капельных жидкостях.

п.14. Линейные и нелинейные волны в жидкостях и газах.

п.15. Тепломассоперенос в газах и жидкостях.

п.16. Гидромеханика сред, взаимодействующих с электромагнитным полем. Динамика плазмы.

п.18. Аналитические, асимптотические и численные методы исследования уравнений кинетических и континуальных моделей однородных и многофазных сред (конечно-разностные, спектральные, методы конечного объема, методы прямого моделирования и др.).

2.5.15 Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов:

п.9. Теоретические основы и технологические процессы изготовления деталей двигателей и агрегатов летательных аппаратов, включая технологическую подготовку производства, в том числе автоматизированные системы проектирования и управления, технологические процессы и специальное оборудование для формообразования и обработки деталей двигателей, их защита.

п.17. Прогнозирование развития конструкции, технологии производства, формирование перспективных уровней электродинамического, термодинамического и эксплуатационно-технологического совершенства двигателей летательных аппаратов и их агрегатов, а также технико-экономических процессов их создания, производства и эксплуатации. Математические основы формирования требований к перспективным двигателям и энергетическим установкам летательных аппаратов.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения. Полный объем диссертации составляет 179 стр. с 83 рисунками и 16 таблицами. Список используемых источников содержит 129 наименований.

# ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ.

## 1.1 Аддитивные технологии изготовления металлических изделий

Во всем мире наблюдается вариативная классификация аддитивных технологий в области металлического трехмерного изготовления изделий. В основном, их подразделяют в зависимости от принципов построения, а также в зависимости от применяемых способов подвода энергии для послойного скрепления (фиксации) слоев построения.

Ассортимент металлических аддитивных технологий постоянно увеличивается. На данный момент известно 13 различных принципов работы, которые поставляют более 190 производителей оборудования (Рисунок 1.1).



Рисунок 1.1 – Виды аддитивных технологий производства из металлов и сплавов [1].

С точки зрения подводимой энергии и применяемых исходных материалов аддитивные технологии построения из металлов и их сплавов можно разделить на два основных вида (процесса):

1. Процесс сплавления
2. Процесс спекания

В свою очередь, процесс сплавления подразделяются на два следующих метода:

- Метод расплавления и формирования материала в заранее нанесенном порошковом слое

- Метод прямого подвода энергии и материала в место построения

Технология сплавления материала в предварительно сформированном слое порошка подразделяется на технологии лазерного «LB PBF» и электронного «EB PBF» сплавления слоев.

LB-PBF – “Laser Beam Powder Bed Fusion” или лазерное порошковое сплавление в слое, также известная как Селективное Лазерное Сплавление (СЛС - SLM – “Selective Laser Melting”), является наиболее распространенной технологией аддитивного производства металлических изделий. Её распространение связано, прежде всего, с тем, что данная технология является самой первой из технологий аддитивного построения из металлов: она была разработана и запатентована в середине 1980-х годов в результате совместной работы доктора Карла Декарда и доктора Джо Бимана из Техасского университета, Остин. Также огромное значение сыграло активное внедрение в практику в различных отраслях промышленности [2].

Селективное лазерное сплавление основано на сплавлении порошкового материала под действием лазерного излучения. С помощью системы выравнивания порошковый материал с заданной толщиной слоя наносится на пластину-подложку, закрепленную на платформе сборки. Система выравнивания может представлять собой лезвие, кисть или валик, который предварительно наносит определенное количество порошка из резервуара и распределяет его по подложке. Например, в принтерах, относящихся к серии ProX от компании 3D Systems, присутствует прижимной ролик, выравнивающий поверхность порошкового слоя и, в то же время, уплотняющий порошковый слой, уменьшая возможность образования пустот между частицами порошка после их сплавления, таким образом, увеличивая эксплуатационные характеристики изделий. Также существует

альтернативный вариант, когда сам контейнер с порошком перемещается по зоне построения и равномерно распределяет порошок.

Энергия, необходимая для сплавления частиц порошка, подводится с помощью лазерного излучения. С помощью системы позиционирования луч лазера фокусируется на поверхностном слое порошка и выборочно проходит по его поверхности, слой. Управление лазерным лучом реализуется с помощью системы зеркал, которые вращаются с помощью микро моторов, тем самым обеспечивая быстрое перемещение лазера в зоне построения. Существует также способ сканирования, в котором реализуется перемещение самого лазера в параллельных плоскостях над зоной выращивания. Разработка установок по селективному лазерному сплавлению начиналась с применения одного лазерного источника и оптической системы позиционирования, сегодня для повышения производительности многие промышленные системы используют несколько лазерных и оптических систем. В таких установках либо каждый лазер обрабатывает выделенную область платформы сборки, либо альтернативные настройки позволяют обрабатывать всю площадь платформы сборки каждым лазерным лучом. Второй тип установок упрощает калибровку положения луча между всеми лазерами и, следовательно, улучшает проблемы контроля качества в области перекрытия.

После завершения процесса селективного лазерного сплавления слоя порошка, платформа опускается на величину толщины слоя порошка и далее, после нанесения нового слоя, процесс сплавления повторяется. Таким образом, мы, последовательно, повторяя эти операции, получаем изделия требуемой геометрии. Металлический порошок, который не попадает в зону выборочного сплавления, может быть повторно использован после переработки. Для защиты порошка от окисления, процесс сплавления проходит в атмосфере инертного газа и вакуума. Содержание кислорода не должно превышать 0.1%.

Для этого камера построения спроектирована газонепроницаемой и перед запуском процесса заполняется инертным газом, таким как аргон или

азот. Технологический дым и частицы отводятся от процесса сплавления направленным потоком газа внутри камеры построения и направляются через системы фильтрации.

Определяющими параметрами процесса лазерного сплавления являются длина волны, мощность, скорость сканирования лазера (время позиционирования луча на поверхности слоя), диаметр пятна фокуса лазерного луча и алгоритм сканирования. Оптимальные параметры различаются в зависимости от состава металлического сплава и характеристик порошка (Рисунок 1.2).

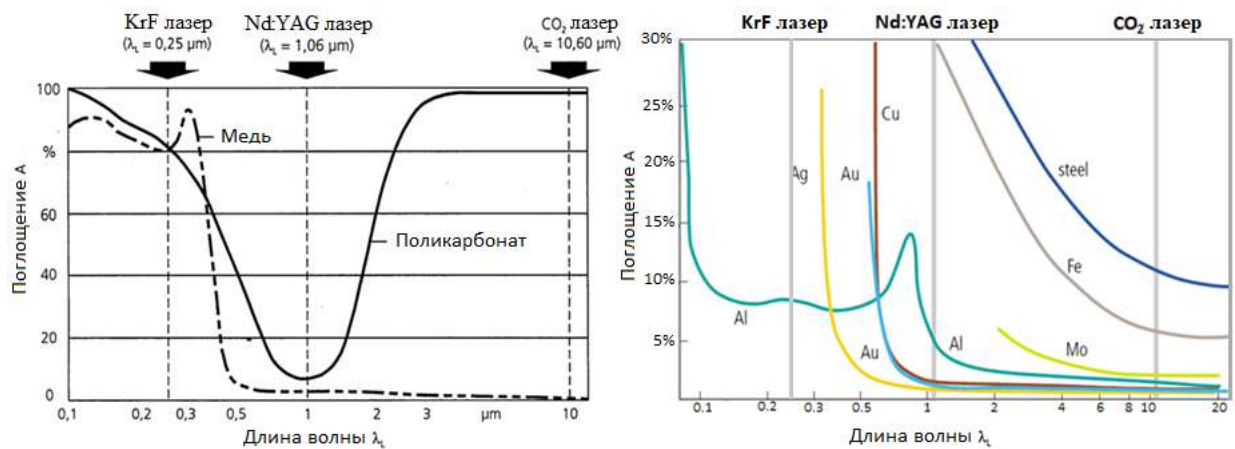


Рисунок 1.2 - Зависимость длины волны от поглощения лазерного излучения для различных металлов и сплавов.

В промышленных СЛС системах используются одномодовые волоконные Nd:YAG лазеры с длиной волны от 1070 до 1080 нм. Мощность лазера составляет от 100 до 400 Вт для опытных-лабораторных СЛС систем и до 700–1000 Вт для промышленных СЛС систем. Формирование луча осуществляется за счет коллиматорных и фокусирующих линз. Чтобы избежать проблем, связанных с процессом смещения фокуса, вызванного тепловым расширением линз, начали переходить от линз «F-Theta» и систем предобъективного сканирования к системам постобъективного сканирования с системой динамической фокусировки. Для повышения производительности доступны установки, имеющие многолазерные системы с 2 или более источниками лазерного луча.



Также существуют гибридные системы селективного лазерного сплавления, представляющие собой сочетание фрезерного станка ЧПУ и установки СЛС. Предлагаемые компаниями «OPM LAB» и «MATSUURA», гибридные установки позволяют производить последовательную фрезеровку по контуру слоя, после его сплавления. Для улучшения качества поверхности изделия после селективного сплавления слоя, фреза, установленная внутри камеры построения, обрабатывает контуры данного слоя. Благодаря этой стратегии вся поверхность аддитивно построенного изделия может быть отфрезерована. Однако такая гибридная обработка приводит к снижению производительности селективного лазерного сплавления. Также возможность проведения процедуры фрезерования сильно зависит от формы изделия. На сегодняшний день эти системы используются почти исключительно в производстве пресс-форм и инструментов, где требуется высокое качество поверхности.

Детали, изготовленные по технологии СЛС, не обладают такими же свойствами, как и изделия, изготовленные обычными методами. Поверхность имеет большую шероховатость из-за эффекта лестницы или налипших частиц порошка. Функциональные поверхности обычно требуют последующей обработки для уменьшения шероховатости поверхности.

Из-за высоких температурных градиентов во время охлаждения в детали образуется мелкозернистая микроструктура. По сравнению со свойствами обычных материалов СЛС демонстрирует в целом статические механические свойства с очень высокой прочностью. Может наблюдаться хрупкое поведение с относительно низким удлинением при разрыве. Используя обычные термические обработки, можно по желанию влиять на свойства материала.

Сопротивление усталости во многом зависит от качества поверхности, то есть дефектов поверхности и остаточной пористости. Детали демонстрируют хорошую усталостную прочность, если после обработки было

достигнуто высокое качество поверхности и остаточная пористость была уменьшена за счет горячего изостатического прессования.

К материалам, используемым в СЛС процессах, предъявляются требования по гранулометрическому составу, по форме и геометрии частицы, по способности поглощать и отражать лазерное излучение, и конечно же такое свойство как свариваемость. К данным материалам можно отнести нержавеющие стали (17-4PH, 15-5PH, 316L), инструментальные стали (1,2709, 1,2344), кобальтохромовые сплавы (CoCr28Mo6), титановые сплавы (Ti6Al4V), никелевые сплавы (IN625, IN718, IN939), алюминиевые сплавы (AlSi12, AlSi7Mg0.6, AlSi9Cu3). При этом используемые порошки должны иметь фракцию от 20 до 60 мкм и с таким соотношением, которое обеспечивало бы необходимую плотность заполнения.

Особую значимость в аддитивном построении трехмерных металлических изделий нужно отдать технологии Электронно-Лучевого Порошкового Сплавления (ЭЛПС - EB-PBF – electron beam powder bed fusion) [3]. Данная технология хорошо показала себя в авиации и медицине: как в процессах производства лопаток турбин, так и в создании имплантатов для замены костей человека [4].

Данная технология основана на СЛС технологии, только в качестве источников энергии для сплавления используются электронные излучатели, электронные пушки. С помощью электронных пучков высокой мощности в вакуумной камере происходит послойное сплавление металлических порошков, что и приводит к получению контуров исходной цифровой модели.

Этот процесс можно описать следующим образом:

- 1) на специальную платформу насыпают или распыляют металлический порошок и разравнивают его при помощи ножа или валика;
- 2) по координатам, полученным с компьютерной модели, поверхность материала бомбардируется электронами из электронно-лучевой пушки.

Немаловажным здесь является и то, что в одно время можно «облучать» сразу несколько участков материала. Это существенно ускоряет процесс производства изделия.

Вакуум, созданный в камере, имеет давление меньше  $1 \times 10^{-4}$  Бар и способствует процессу нагрева металла, ведь любая газовая или воздушная среда создает для электронов слишком высокое сопротивление. В такой вакуумной среде сохраняются свойства материала, утрачиваемые во время сплавления.

Температура в камере при построении составляет  $640-700^{\circ}\text{C}$ . Это позволяет достигать равномерного разогрева детали, а процесс охлаждения происходит одновременно по всей поверхности после окончания печати.

Для печати используются наиболее распространённые в аэрокосмической и медицинской сферах титановые сплавы. Материал представлен в виде гранул размером 20-60 мкм. Используется сплав на основе кобальта. Особенно он распространён при производстве элементов газовых турбин и медицинских протезов и имплантатов. Также используются порошки нержавеющей, инструментальных и быстрорежущих сталей, различные сплавы на основе меди.

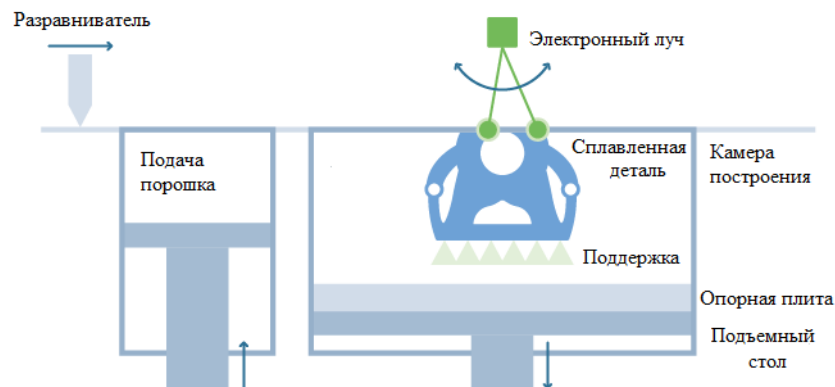


Рисунок 1.3 - Схема установки ЭЛПС

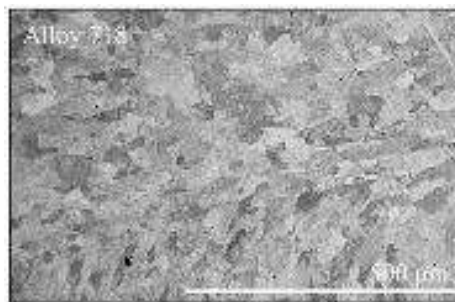


Рисунок 1.4 - Микроструктура изделия, полученная методом ЭЛПС [5]

Структура изделий, полученных в результате электронно-лучевого сплавления отличается от структуры деталей, изготовленных методом литья. А погрешность составляет  $\pm 0,2$  мм на длине 100 мм. Она вызвана размером электронного пучка, который составляет 0,2-1,0 мм и приводит к небольшой шероховатости готовых изделий.

Directed Energy Deposition – технология «Прямого Нанесения Энергии» (ПНЭ) - это группа процессов аддитивного построения, в которых производство изделий производится путем одновременного добавления материала и подводимой тепловой энергии сплавления. Энергия может подводиться либо лазером, либо электронным лучом, либо плазменной дугой. В качестве исходного материала используется металлический порошок или проволока. Порошки приводят к более низкой эффективности осаждения по сравнению с металлической проволокой, поскольку только часть всего порошка будет расплавлена и прикреплена к подложке [6]. Как и ЭЛПС, электронно-лучевые системы в ПНЭ требуют вакуума и не будут иметь серьезных проблем с окислением. А в случае с лазерной системой в ПНЭ, существует проблема введения инертных газов. В порошковых ПНЭ установках часто выдувается инертный газ вместе с порошком из форсунок, таким образом покрывая расплавленную область, снижая скорость окисления [7]. Порошковые системы ПНЭ могут использовать одно или несколько сопел для выброса металлических порошков [8]. Использование нескольких форсунок позволяет смешивать различные материалы для получения функционально дифференцированных материалов [9], [10].

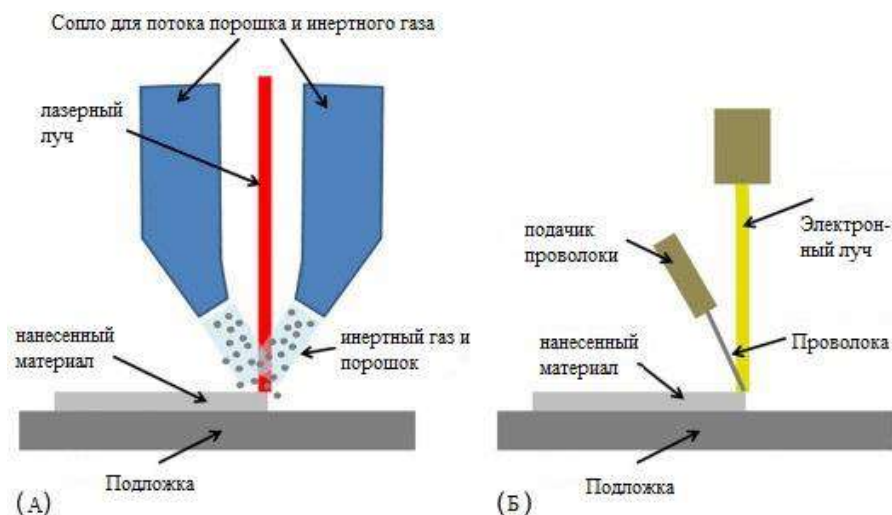


Рисунок 1.5 - Схемы построения ПНЭ: А) с подводом порошка, В) с подводом проволоки[11]

Системы ПНЭ могут отличаться от системы лазерного порошкового сплавления в слое, поскольку используемые порошки часто больше по размеру и требуют более высокой плотности энергии [1.12], [1.13]. Это приводит к более высокой скорости сборки по сравнению с такими системами. Однако это приводит к ухудшению качества поверхности, что может потребовать дополнительной обработки. Опорные конструкции, обычно используемые в системах лазерного порошкового сплавления в слое, редко или никогда не используются в ПНЭ, где часто используются многоосевые поворотные столы для вращения платформы сборки для достижения различных функций. Без порошковой подушки системы ПНЭ могут производить наплавку на поверхности существующей детали.

К процессам спекания относятся следующие технологии:

- Технология экструзии материала
- Технология нанесения связующего вещества
- Технология нанесения материалов

Технология экструзии материала подразделяется на две технологии:  
 Инжекционное Формование Металла Методом Послойного Наплавления

(ИФММПН) и Моделирование методом послойного наплавления (МПН), отличающихся друг от друга лишь формой исходного материала, состоящего из соединения полимера и металла, гранулы и металлическая проволока, соответственно.

Технология экструзии материала - это новый метод аддитивного построения изделия, основанный на полимерной МПН технологии, в котором входной материал имеет форму гранул или нитей, состоящих из композита металл/полимер с высоким содержанием металлического порошка, а принтер дополнительно оптимизирован на основе обычного принтера МПН.

Первичное напечатанное изделие называют «Зеленая деталь», очищенное изделие называют «Очищенная деталь» и финальное спеченное металлическое изделие называется «Изделие МПН» соответственно. Во-первых, «Зеленые детали» печатаются из композитной нити металл/полимер методом МПН, во время которого полимер плавится как связующее, но частицы металла остаются твердыми. Затем получают «Очищенные детали», подвергнув «Зеленые детали» процессу удаления большей части полимерного связующего. Оставшееся полимерное связующее в «Очищенных деталях» не дает предотвратить рассыпание металлических частиц и, таким образом, сохраняет форму деталей. Наконец, их спекают для сплавления металлических частиц вместе, образуя плотные «Изделия МПН». По сравнению с другими процессами аддитивного построения, которые позволяют изготавливать металлические детали только при температурах выше, чем точки плавления печатных металлов, которые обычно превышают 1000 °С, данная технология позволяет строить «зеленые детали» при температурах немного выше, чем точки плавления полимеров, которые обычно ниже 300 °С. Кроме того, хотя спекание «коричневых деталей» необходимо при относительно высокой температуре, процесс спекания, а также процесс удаления вяжущего материала можно производить партиями.

К технологии нанесения связующего вещества относится металлическая струйная печать связующим веществом (BJ - Binder Jetting). Она представлена на рисунках 1.6 и 1.7.

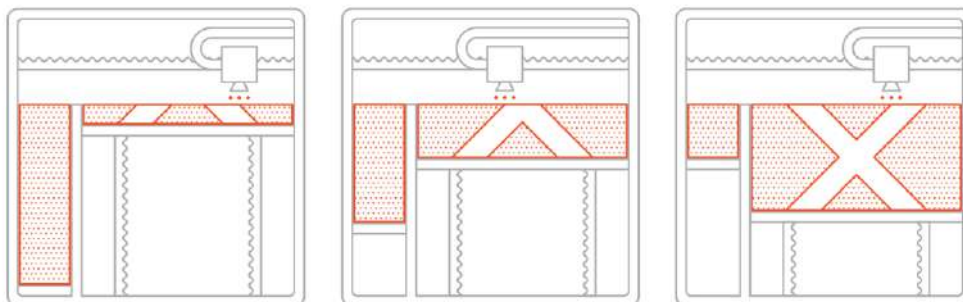


Рисунок 1.6 - Принцип металлической струйной печати связующим веществом

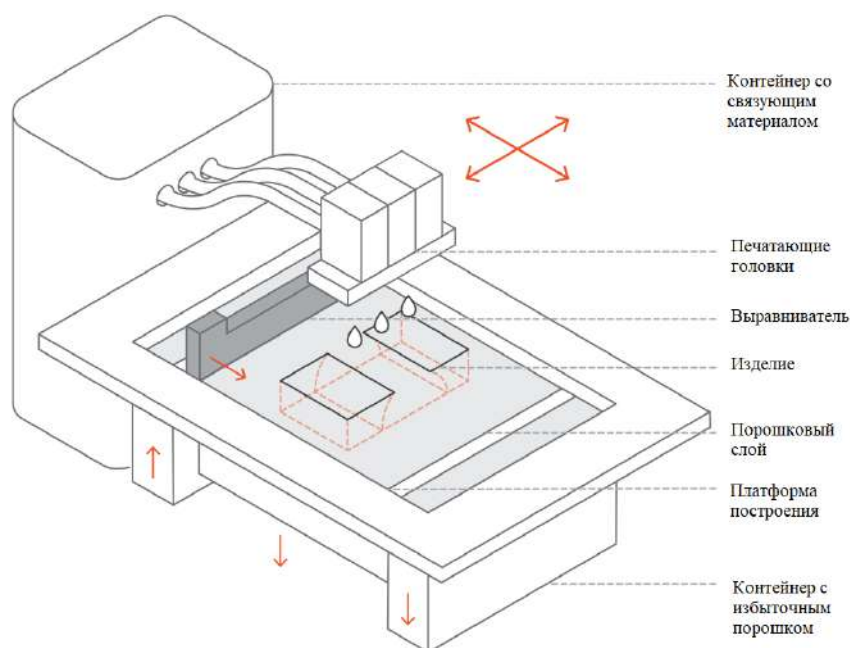


Рисунок 1.7 - Схема работы металлического принтера струйной печати

При металлической струйной печати жидкое связующее селективно применяется для соединения частиц металлического порошка слой за слоем.

Процесс начинается с распределения тонкого слоя металлического порошка по поверхности печатной платформы, затем печатающие головки селективно наносят капли связующего на поверхность слоя порошка, склеивая

частицы порошка. Затем печатная платформа опускается и наносится следующий слой порошка.

Процесс повторяется слой за слоем до тех пор, пока деталь не будет готова, неиспользованный порошок перерабатывается.

При металлической струйной печати построенные детали, которые только что были напечатаны, остаются в хрупком сыром состоянии и требуют последующей термической постобработки, такой как спекание и инфильтрация, для укрепления детали.

**Инфильтрация:** после печати деталь помещается в печь, где связующее вещество выгорает, оставляя пустоты. В этот момент деталь становится пористой на 60%. Для заполнения полостей в детали за счет капиллярного воздействия применяют инфильтрацию расплавом бронзы, в результате чего получаются детали с низкой пористостью и хорошей прочностью.

**Спекание:** после завершения печати детали помещаются в высокотемпературную печь, где связующее выгорает, а оставшиеся частицы металла спекаются (связываются) вместе, в результате чего получаются детали с очень низкой пористостью. Идет усадка детали.

Помимо металлов, струйная очистка связующего может работать с рядом других материалов, например, с песком и керамикой.

Также к технологиям нанесения материалов относится Технология нанесения наночастиц (NPJ - nanoparticles jetting).

Этот подход основан на дисперсии наночастиц из металла или керамики, взвешенных в жидком растворе. Детализированные детали могут быть созданы с толщиной слоя 10 мкм и разрешением струи 1200 точек на дюйм (20 мкм).

В процессе печати блок, состоящий из 24 печатающих головок, каждая из которых содержит 512 сопел, пересекает поверхность конструкции в горизонтальной плоскости с использованием двухосевого позиционера x – y. Двенадцать печатающих головок используются для нанесения материала детали, остальные 12 печатающих головок используются для нанесения



материала поддержки. Эти печатающие головки, перемещаясь по области построения откладывают мелкие капли раствора, жидкости-носителя, содержащей наночастицы материала или материала поддержки. Этот раствор оседает на нагретой рабочей пластине, температура которой равна 160–230 °С. Когда капли соприкасаются с горячей поверхностью, жидкость-носитель начинает испаряться, оставляя после себя частицы, покрытые тонким слоем связующего. Чтобы дополнительно поддерживать процесс испарения, за блоком сразу же следует нагревательная лампа, состоящая из шести галогенных ламп, в дополнение к обдуву горячим воздухом. Как только жидкость-носитель полностью испарится, оставшиеся частицы теперь могут связываться друг с другом. После завершения четырех проходов ролик перемещается по вновь напечатанному слою, чтобы точно определить высоту слоя. С этого момента блок определяет заданное расстояние по вертикали при подготовке к печати следующего слоя.

После печати всех необходимых слоев для обеспечения окончательной микроструктуры следует период охлаждения, который происходит, пока изготовленные конструкции все еще находятся внутри камеры построения. Рабочая пластина с деталями после охлаждения вынимается из принтера и помещается в сушильный шкаф, чтобы обеспечить полную прочность в сыром виде. Затем, процесс удаления подложки завершается в емкости с растворителем, где материал подложки растворяется. Наконец, готовые детали транспортируются в печь для спекания, где деталь подвергается воздействию высоких температур для достижения почти полной плотности и достижения конечных свойств материала.

## 1.2 Физико-химические методы обработки металлических изделий аддитивного построения

В зависимости от метода аддитивного построения металлических изделий возникает необходимость проведения дополнительной термической

обработки для снятия внутренних напряжений, изменения микроструктуры, уменьшения шероховатости и увеличения эксплуатационных свойств поверхности. В связи с широкой распространенностью установок, работающих на основе процессов селективного лазерного сплавления, рассмотрим существующие методы физико-химического воздействия на данный тип изделий. Можно выделить три типа задач, которые необходимо решить в получаемых изделиях: устранить наличие внутренних напряжений, уменьшить пористость, уменьшить шероховатость поверхности, увеличить эксплуатационные характеристики поверхностного слоя.

Для решения первой задачи необходимо использовать термическую обработку, для решения второй - изостатическое термопрессование, для решения третьей - группу воздействий, включающих ультразвуковые, электрохимические, электроэрозионные, гидроабразивные методы.

Рассмотрим термические методы обработки СЛС-изделий.

Термообработка необходима для гомогенизации и рекристаллизации микроструктуры, а также снятия остаточных напряжений [14, 15]. Различные виды термической обработки влияют на размеры и ориентацию зерен, выделение фаз, пористости и механических свойств. Нагрев СЛС-изделия в печи для изменения микроструктуры есть основная цель термической обработки. Воздействие на зерна происходит в результате таких процессов, как восстановление, растворение, осаждение, рекристаллизация и рост.

Процесс снятия внутренних напряжений предполагает восстановление, при повышенных температурах диффузия атомов увеличивается. Атомы в областях с высоким напряжением могут перемещаться в области с более низким напряжением, что приводит к снижению энергии внутренней деформации. Для снятия остаточного напряжения СЛС- и ПНЭ-детали перед снятием с подложки отжигаются. Термическая обработка снятия напряжений должна выполняться при высокой температуре, обеспечивающей подвижность атомов, но в коротком промежутке времени для предотвращения процесса рекристаллизации (если не требуется) и роста зерен (что обычно

связано с потерей прочности). Рекристаллизация может быть желательной, в целях формирования равноосной микроструктуры из столбчатой. Для структуры железа, полученного СЛС методом, при рекристаллизации термическое остаточное напряжение действует как движущая сила (в отсутствие холодной обработки). [16] Подобное наблюдалось и для Ti - 6Al - 4V в ПНЭ с подачей проволоки.

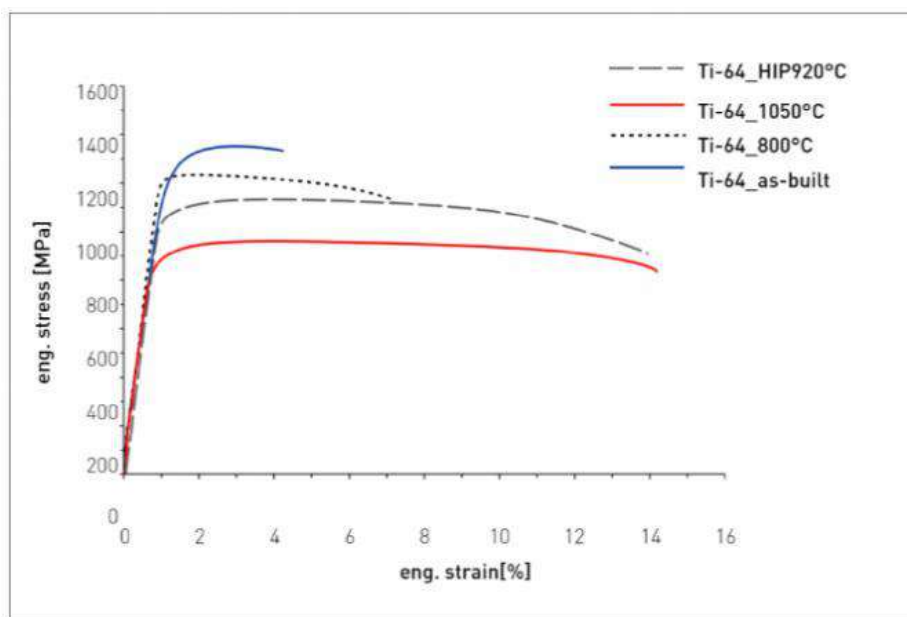
Одним из важных показателей термообработки является зернистость материала. В исследованиях СЛС-процесса [16] и ПНЭ-процесса [17, 18] была обнаружена рекристаллизация микроструктуры во время отжига. Для сплава IN718, полученного методом СЛС, частичная рекристаллизация происходит при отжиге и приводит к неоднородной зеренной структуре.

В работе [19] исследуется влияние термической обработки на нержавеющую сталь 2205, полученную СЛС-методом. Микроструктура в исходном состоянии была почти полностью ферритной, но желаемая двухфазная микроструктура была получена путем последующей термообработки. После отжига при температурах от 950 до 1100 ° C образовалось более 40 об.% аустенитной фазы. Отжиг снизил высокую текучесть и предел прочности материала, но значительно повысил пластичность. Микротвердость (255–280 HV1), предел текучести (520–560 МПа) и предел прочности (810–870 МПа) термообработанных образцов были выше, чем у стандартного сплава 2205. Измерение остаточного напряжения показало, что термообработка имеет важное значение для создания двухфазной микроструктуры и для изменения состояния остаточного напряжения поверхностных слоев с растяжения на сжимающий. Электрохимические циклические потенциодинамические испытания поляризации в 0,6 М растворе NaCl при комнатной температуре показали, что термообработка улучшила стойкость к точечной коррозии.

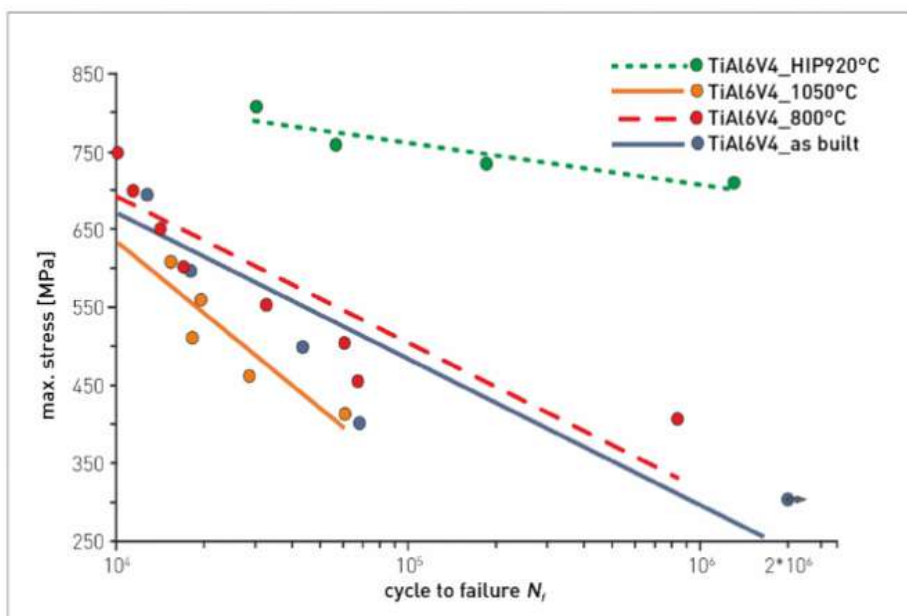
Для решения проблемы снижения пористости и устранения внутренних дефектов СЛС-изделий используется горячее изостатическое прессование (ГИП). Уплотнение материала происходит за счет воздействия высокой

температуры и высокого изостатического давления газа, которое равномерно воздействует на все поверхности и во всех направлениях. Механизмами уплотнения при ГИП являются пластическая деформация, ползучесть и диффузия. Пластическая деформация является доминирующим механизмом, так как приложенное внешнее давление выше, чем предел текучести материала при температуре процесса ГИП. Величина уплотнения зависит от трех параметров ГИП: температура, давление и время выдержки. Температура ГИП находится в диапазоне от 70 до 90% температуры солидуса обрабатываемого материала, давление находится в диапазоне 100-200 МПа, в качестве рабочей среды используется аргон. Время выдержки зависит от толщины обрабатываемого изделия.

В работе [20] Leuders с соавторами провели сравнение предела текучести, пластичности и усталостной прочности СЛС-изделий сплава Ti-6Al-4V при различных термо- и ГИП обработке. Было установлено, что усталостная прочность стала намного лучше после ГИП обработки (Рис.1.8, б) и практически не повлияла или стала даже хуже после отжига на твердый раствор. При этом происходит уменьшение предела текучести для отожженного и обработанного ГИП СЛС-изделия по сравнению с исходным образцом, а также возникает значительное улучшение пластических свойств (Рис.1.8, а). Высокая скорость охлаждения, около  $10^5$  °C/сек, присущая СЛС-процессу приводит к формированию мелкозернистой структуры материала, которой соответствует высокий предел текучести. Проведение отжига и ГИП с более длительными скоростями охлаждения по сравнению с СЛС, микроструктура становится крупнозернистой, что приводит к уменьшению предела текучести, но увеличению пластичности за счет устранения пор.



а



б

Рисунок 1.8 – Данные о СЛС-изделии из Ti-6AL-4V [20]: а) кривые растяжения для различных температур, б) данные по усталости

Наличие принципа послойного построения в СЛС процессе приводит к эффекту направленного охлаждения и кристаллизации, который формирует рост зерен в направлении построения через слои и образует столбчатую микроструктуру. Возникает анизотропия механических свойств: свойства в направлении оси (z) могут сильно отличаться от свойств в плоскости осей (x, y) [21]. Исследования по получению равноосной микроструктуры СЛС-

изделий методом ГИП представлены в работе [22]. Изделия Ti-6Al-4V полученные методом электронно-лучевого сплавления обрабатывались при следующих режимах:

1. Стандартный цикл ГИП с температурой 920 °С, давлением 100 МПа, 120 минут выдержки и быстрым охлаждением;
2. Аналогичный цикл ГИП, но при температуре выше температуры  $\beta$ -перехода 1120 °С, время выдержки 120 минут и с медленным естественным охлаждением;
3. Цикл ГИП с температурой 1120 °С, коротким временем выдержки 30 минут и быстрым охлаждением.

В результате при режиме №1 наблюдается столбчатая зернистая структура, но без пор. Для режимов №2 и №3 формируется однородная микроструктура с равноосными зёрнами. Низкая скорость охлаждения для режима №2 - 85 °С/мин, привела к образованию больших  $\alpha$ -колоний. При использовании режима №3 материал приобрел равноосную зернистую структуру, но с очень мелкими выделениями  $\alpha$  кристаллов, которые распределены в виде сетчатой микроструктуры, а не крупных  $\alpha$ -колоний, как во втором режиме.

В работе [23] исследуется влияние ГИП на СЛС-изделия из интерметаллического сплава NiAl–Cr–Mo и сравнение механических свойств с образцами, полученных литьем и технологией порошковой металлургии. Установлено, что ГИП укрепляет материал, устраняет трещины и значительно снижает пористость. Испытания на сжатие при различных температурах показали, что предел текучести снизился с 750 МПа до 260 МПа при повышении температуры с 700°С до 1100°С соответственно. Несмотря на это предел текучести для СЛС-изделий после ГИП на 25% и 15% ниже, по сравнению с отлитыми и порошковыми образцами, соответственно.

Таким образом при ГИП структура зёрен может быть значительно изменена в дополнении к снижению точности размеров детали. А наличие открытых пор на поверхности при высоком давлении и температуре может

привести к образованию оксидов [24]. Это, наряду с высокой стоимостью процесса, указывает на то, что ГИП следует применять разумно в соответствии с потребностями.

Для решения третьей задачи – уменьшения шероховатости поверхности применяют широкий спектр методов. Высокая шероховатость поверхности формируется при налипании нерасплавленного порошка к изделию, удалении поддерживающих и отводящих тепло конструкций, а также из-за самой природы послойного формирования приводящей к образованию «ступенчатой» поверхности [25]. Шероховатость поверхности внутренних каналов значительно выше, чем для наружных поверхностей [26]. Известно, что в соответствии с нормативами аэрокосмической отрасли для литых или кованных деталей требуется шероховатость ниже  $R_a - 3,2$  мкм. Таблица 1.1 показывает, что шероховатость поверхности в исходном состоянии обычно не соответствует стандарту [27].

Методы снижения шероховатости СЛС-изделий можно классифицировать в зависимости от типа энергии по трем основным группам (Рис. 1.9): основанные на механическом воздействии; химо/электрохимическое воздействие; за счет теплового воздействия.



Рисунок 1.9 - Классификация способов снижения шероховатости поверхности СЛС-изделий

В таблице 1.1 приведены сравнительные характеристики методов финишной обработки для снижения шероховатости изделий, полученных методом СЛС. Отличительной чертой СЛС-изделий является их сложная геометрия, для обработки которой применение отдельных видов финишной обработки может быть неэффективным. Способность комбинировать отдельные методы обработки позволяет повышать производительность и решать более широкий спектр задач. В работе [28] описывается техника обработки, совмещающая химическую и абразивную полировку, которая может сократить время полировки на 60%. Также рассматриваются подходы по селективному подбору метода финишной обработки исходя из места и функционального назначения зоны изделия. Перспективным в применении является метод термохимической полировки [29], который сочетает в себе лазерное воздействие и электрохимическую полировку.

Лазерная полировка - один из широко используемых методов обработки улучшения качества поверхностей металлических аддитивно изготовленных изделий. Лазерный луч сканирует шероховатую металлическую поверхность, расплавляя её и выравнивая за счет эффектов поверхностного натяжения и силы тяжести. Микровыступы плавятся или испаряются, а впадины заполняются расплавом металла. После смещения лазерного луча из зоны расплава, происходит резкое падение температуры, вызывающее высокоскоростную кристаллизацию и охлаждение, что обеспечивает улучшенное качество поверхности. Лазерную полировку СЛС-изделий впервые применил Lamikiz и др. (2007). Величину шероховатости уменьшили с 7,5 мкм до ~ 1,49 мкм, это привело к улучшению качества поверхности примерно на 80%. Полированные поверхности не имели трещин, были менее пористыми, более твердыми и однородными по сравнению с СЛС-изделиями. Yasa и др. (2011) исследовали лазерное переплавление каждого слоя при СЛС-печати вторично сканируя слой. Это привело к улучшению качества поверхности на ~ 90%. А полученная в результате лазерного переплава однородная и мелкодисперсная микроструктура увеличила микротвердость.



Гора и др. (2016) исследовали лазерную полировку сплавов  $Ti_6Al_4V$  и  $CoCr$ , полученных в СЛС-процессе, и получили снижение шероховатости на  $\sim 85\%$ . Было установлено, что конечное качество поверхности зависит от исходного состояния поверхности. Бхадури и др. (2017) провели испытания лазерной полировки на мезомасштабных СЛС-изделиях AISI 316 L, и получили снижение шероховатости поверхности на  $\sim 94\%$  при оптимальных параметрах процесса (плотность энергии и перекрытие импульсов). Уменьшилась пористость, это привело к уплотнению приповерхностных слоев и увеличению микротвердости. В работе Zhihao и др. (2018) выполнили полировку образца из сплава Inconel 718, полученного методом СЛС, используя волоконный лазер и снизили шероховатость поверхности со значения  $Ra \sim 7$  мкм до  $\sim 0,1$  мкм. Измельчение зерен и выделение упрочняющих фаз привело к повышению микротвердости и износостойкости. Yung и др. (2018) предложили новую технику многослойной лазерной полировки, в которой расстояние расфокусировки непрерывно регулируется в зависимости от сложности геометрии поверхности СЛС-сплава  $CoCr$ . Было достигнуто максимальное уменьшение шероховатости  $\sim 93\%$ . Микротвердость поверхности увеличилась на  $\sim 8\%$  Worts и др. (2019) исследовали фемтосекундную лазерную микрообработку изделий из сплава  $Ti_6Al_4V$ , изготовленных с использованием метода ПНЭ, результаты показали, что качество поверхности было улучшено с  $4,23$  мкм до  $\sim 0,8$  мкм. Лазерная полировка может улучшить целостность поверхности, ее механические свойства, но устройство может быть неспособно проводить финишные обработки сложных поверхностей. Кроме того, размер пятна лазера мал, что значительно увеличивает время обработки. Лазерная полировка не может использоваться для чистовой обработки деталей большего размера и, следовательно, экономически нецелесообразна.

Для достижения равномерного уменьшения шероховатости в независимости от сложности детали аддитивного построения была предложена химическая полировка. Первоначально Scherillo и др. (2019)

предпринял попытку обработки СЛС-деталей с использованием химикатов для алюминиевого сплава ( $AlSi_{10}Mg$ ). Процесс обработки включал два основных этапа: химическая обработка и осветление. Эти операции уменьшают неровности поверхности и улучшают качество поверхности. Не мало важно, химическая полировка сохраняет исходный состав сплава. Далее Jain и др. (2019) предложили метод электрохимической полировки (ЭХП) деталей из материала Inconel 718, изготовленных СЛС-методом. Предлагаемым методом была достигнута чистота поверхности  $\sim 0,25$  мкм при оптимальных настройках плотности тока, рабочего цикла и времени обработки / полировки. Но этот метод мог растворять только более мелкие интерметаллические включения Inconel 718, и, следовательно, дальнейшая обработка была невозможна из-за непроводящих фаз и дефектов, присутствующих в материале. Vaicheng и др. (2017) также провели ЭХП на СЛС-изделиях из материала Inconel 718, первоначальная шероховатость поверхности была уменьшена с 6,05 мкм до  $\sim 3,66$  мкм, а неровности поверхности, такие как ямки и игольчатые наконечники, были устранены после процесса полировки. Но этот метод вызвал снижение нанотвердости и модуля упругости за счет снятия остаточных напряжений, растворения выделений  $\gamma$  и образования выделений  $\delta$  и карбидов. Tuagi и др. (2019) исследовали химическую полировку сплавов AISI 316 L с целью обработки внутренних и внешних поверхностей. Этот метод смог успешно минимизировать значение шероховатости образца с 5 мкм до  $\sim 0,4$  мкм. Они также провели сравнительное исследование химического и электрохимического полирования, и установили, что последнее преобладало над первым в улучшении качества поверхности. Оба метода могут снизить начальное значение шероховатости ( $S_a$ ) с более чем 20 мкм до  $\sim 0,3$  мкм. Но использование противоэлектрода при электрополировке затруднило доступ к узким пространствам сложной формы и было менее эффективным для улучшения внутренних поверхностей по сравнению с химической полировкой. Несмотря на то, что химическая полировка может использоваться

для обработки сложных деталей, этот метод можно применять только для ограниченных материалов. Кроме того, точность размеров и геометрия теряются из-за удаления лишнего материала. Этот метод не является экологически чистым из-за токсичности используемых химикатов.

Помимо лазерной и химической полировки, другой альтернативой, предложенной исследователями для полировки металлических аддитивно построенных деталей, стала полировка с использованием абразивных частиц. Тан и Йео (2017) предложили инновационный метод ультразвуковой кавитационной абразивной обработки (УКАО) поверхности деталей из Inconel 625, изготовленных с использованием прямого лазерного спекания металла (DMLS). В УКАО образец подвергается ультразвуковой кавитации в суспензии абразивных частиц. Кавитационные пузыри образуются на шероховатых поверхностях, и их последующее схлопывание в поле ультразвукового давления удаляет частично сплавленные порошки с поверхности. Попадание микроабразивов в суспензию также способствует улучшению качества поверхности и проявляется в виде микротрещин на поверхности. При использовании процесса УКАО значение шероховатости ( $S_a$ ) 8,6 мкм на готовой поверхности было снижено до ~ 5,6 мкм. Тан и Йео (2020) подробно расширили это исследование и установили, что, после полировки УКАО, значение микротвердости поверхности Inconel 625, равное ~ 310 HV, увеличилось до ~ 360 HV (улучшение ~ 15%). Этот метод также эффективен при обработке внутренних поверхностей, где было достигнуто улучшение качества на 20%. Обработка абразивным потоком (ОАП) Peng и др. (2018) алюминиевого сплава, изготовленного аддитивным методом (AlSi<sub>10</sub>Mg), показало, что этот метод позволял удалять дефекты на поверхности, возникающие из-за эффекта комкования и адгезии порошка, и позволял минимизировать значение шероховатости 13–14 мкм на готовой поверхности до ~ 1,8 мкм. Кроме того, было обнаружено, что процесс ОАП создает желаемые остаточные напряжения сжатия. Karakurt и др. (2018) предложили технику магнитно-абразивной финишной обработки (МАО), в

которой для создания относительного движения абразивов по отношению к заготовке применяется внешнее магнитное поле к суспензии, состоящей из абразивных и магнитных частиц. Данный процесс может успешно улучшить чистовую обработку образцов меди, изготовленных с использованием ЭЛПС, с 35 мкм до 4 мкм. Это было достигнуто посредством 3 этапов полировки с использованием порошка SiC и последующей окончательной полировкой порошком оксида алюминия. Сравнительное исследование, проведенное Wu и Yamaguchi (2018), также подтвердило превосходные характеристики магнитно-абразивной чистовой обработки по сравнению с обычными абразивами в улучшении качества поверхности. MAO был исследован Zhang и др. (2019) для обработки СЛС-изделий AISI 316 L и смог успешно устранить такие дефекты, как эффект комкования и эффект «ступеньки». Этот метод также был эффективен при удалении частично связанных частиц порошка с поверхности образца, что способствовало улучшению качества поверхности на ~75%. Несмотря на это, абразивные методы полировки имеют ограничения при обработке металлических деталей сложной формы. Кроме того, эти методы могут вызвать накопление абразивов, что приведет к ухудшению качества поверхности материала.

Механическая обработка поверхности всегда помогает выполнить легкую и экономичную очистку металлических деталей аддитивного построения. Vagehorn и др. (2017) провели сравнительное исследование фрезерования, струйной обработки, микрообработки и вибрационного шлифования, чтобы определить их эффективность при чистовой обработке деталей из  $Ti_6Al_4V$ , после лазерного сплавления. Было обнаружено, что процесс фрезерования превосходит другие методы за счет улучшения чистовой обработки до ~0,3 мкм с начальной шероховатости поверхности 17,9 мкм. Обработка методом фрезерования значительно минимизировала частички расплавленных частиц порошка и другие неровности поверхности. Кроме того, Kaupak и Tascioglu (2018) выполнили традиционную чистовую обработку круглых прутков Inconel 718, изготовленных СЛС-методом.

Средняя шероховатость поверхности 19–24 мкм была снижена до ~ 1,85 мкм за счет чистовой обработки. Помимо этого, процесс может улучшить микротвердость поверхности с ~ 322 HV до ~ 375 HV при минимальной скорости подачи. Профили рентгеноструктурного анализа образца также изменились после чистовой обработки из-за уменьшения зерна и увеличения плотности дислокаций. В более поздней работе Кайнака и Китая (2019), чистовая обработка (ЧО) и вибрационная чистовая обработка (ВЧО) также была изучена для обработки круглых прутков из AISI 316 L. Было обнаружено, что чистовая обработка может обеспечить лучшие характеристики по сравнению с другими методами с точки зрения улучшения чистоты и микротвердости поверхности. Для оценки улучшения трибологических характеристик с ВЧО и ЧО были проведены на СЛС-образцах Inconel 718, Каунак and Tascioglu (2019). Коэффициент трения снизился с ~ 0,66 до ~ 0,59. В другой работе Tascioglu и др. (2019) выполнили аналогичные операции чистового фрезерования СЛС-изделий из материала Inconel 625. Средняя шероховатость поверхности снизилась до ~ 1,28 мкм, увеличилась микротвердость внешнего слоя на ~ 30%, скорость износа снизилась примерно на 50%. Скорость подачи была основным фактором, определяющим качество поверхности и износостойкость. Sun и др. (2019) использовали поверхностную механическую обработку истиранием (ПМОИ), СЛС-изделия AISI 316 L, в котором стальные шарики бомбардируются по поверхности образца для улучшения целостности поверхности и механических свойств. Процесс ПМОИ хорошо сглаживал поверхность, пластически деформируя частично сплавленный порошок и ненужные выступы, заполняя впадины данными деформированными материалами. ПМОИ снизил среднюю шероховатость поверхности образца с 15 мкм до ~ 0,5 мкм. Деформационное упрочнение, вызванное ПМОИ на поверхности образца, повысило твердость поверхности примерно с 300 HV до 400 HV. Сглаживание поверхности методом ПМОИ снижает трение в условиях высоких контактных нагрузок, а также повышает износостойкость. Lesyk и др. (2020) попытались исследовать другие методы

чистовой обработки, которые включают дробеструйную обработку, ультразвуковую дробеструйную обработку, чистовую обработку и обработку ультразвуковым воздействием. Было обнаружено, что дробеструйная обработка неэффективна для минимизации шероховатости поверхности, но может придать детали высокую микротвердость поверхности (66,5%). В отличие от других процессов, метод обработки ультразвуковым воздействием превзошел в минимизации остаточной пористости (84%) и улучшении качества поверхности (57,4%). Хотя вышеупомянутые методы механической обработки имеют успех в улучшении целостности поверхности и механических свойств поверхности, они совершенно не подходят для чистовой обработки сложных геометрий и конструкций.

Многие исследователи проводили параллельные исследования, комбинируя два или более процессов обработки для улучшения качества поверхности и свойств поверхности металлических деталей аддитивного построения. Ямагути и др. (2017) попытались объединить полировку в магнитном поле (ПвМП) с полировкой с помощью магнитного поля (ПспМП) с последним, а затем с первым для улучшения качества поверхности и остаточных напряжений на AISI 316 L, изготовленным СЛС-методом. ПвМП помог снизить значение Rz более 100 мкм до 0,1 мкм за три этапа процесса грубой, средней и тонкой чистовой обработки. В отличие от ПвМП, ПспМП использует шарики подшипников для устранения остаточных напряжений при растяжении, а также для создания остаточных напряжений сжатия. Mohammadian и др. (2017) исследовали полировку с использованием жидкости, содержащей химические вещества и абразивные частицы, образцов Inconel 625, изготовленных методом наплавления в лазерном порошковом слое. Метод позволил удалить сплавленные частицы с поверхности и снизить шероховатость (Ra) на ~ 45%. Iqbal и др. (2017) выполнили продольное фрезерование с последующей обработкой тонким абразивом для чистовой обработки деталей из сплава AISI 316 L. Предложенная стратегия чистовой обработки минимизировала пористость на ~ 89% и улучшила чистоту до менее

40 нм. Позже Бай и др. (2020) выполнили сухую механо-электрохимическую полировку для финишной обработки деталей из AISI 316 L. Этот метод также снизил значения шероховатости более 8 мкм и 12 мкм на верхней и боковой поверхностях деталей SLM соответственно до ~ 1 мкм. Хотя гибридные методы могут обеспечить хорошую целостность поверхности и свойства поверхности, настройка, необходимая для выполнения отделки, сложна и дорога. Недавно Бобан и др. (2020) провели исследования по полировке электрическим разрядом (ПЭР) металлических компонентов аддитивного построения. Авторы провели периферийное исследование изменений, происходящих после полировки металлического СЛС-образца методом ПЭР. Электроэрозионная обработка проволокой - это в основном нетрадиционный метод обработки, который широко используется для отделки или резки материалов независимо от их твердости с хорошей целостностью поверхности. В работе [30] предлагается метод полировки с помощью проволочного электрического разряда. Эксперименты проводились на СЛС-образцах AISI 316 L. Данный метод показал высокую эффективность.

Таблица 1.1 – Сравнительные характеристики различных методов финишной обработки

Технология	Основные преимущества	Основные недостатки	Размер частиц и сложность	Шероховатость поверхности, мкм
<b>Механическая обработка</b>				
Ручное шлифование или полировка	Высокая гибкость. Бюджетный вариант обработки. Подходит для небольших объемов	Неравномерность обработки поверхности. Образование пыли.	Малый-средний, Низкая сложность	0.1-0.16

Продолжение таблицы 1.1.

Массовая обработка: обработка деталей путем относительного движения абразива и поверхности детали. [31] [32] - [37]	Низкая стоимость сводит к минимуму подповерхностную пористость. Позволяет автоматизировать процесс.	Длительное время обработки	Малый-средний, Низкая-средняя сложность	0.21-0.76
Уплотнение: использование лазера или сферических ударов для улучшения шероховатости поверхности за счет удара. [38] - [40]	Простой процесс. Улучшает механические свойства поверхности.	Возможное повреждение тонких деталей	Малый-средний, Низкая сложность	0.6-0.83
Пескоструйная обработка материалов: на поверхность заготовки направляется интенсивный поток среды. [39] - [41]	Применимо к широкому спектру материалов Доступен широкий спектр абразивных материалов	Низкая производительность съема материала. Ограничения в сложности детали, например, глухие отверстия	Малый-средний, Низкая сложность	9.08-10.2
Полировка: Поверхностная пластическая деформация твердым или гладким валиком. [42] - [44]	Повышает устойчивость деталей к усталостной и стрессовой коррозии.	Не подходит для мелких и хрупких деталей из-за приложения большого усилия во	От среднего до большого, Низкая сложность	0.20-0.80



Продолжение таблицы 1.1.

		время процесса.		
Чистовая обработка с ЧПУ: использование режущего инструмента для удаления внешней поверхности детали. [31] [40]	Относительно недорогой и понятный процесс	Не применимо к очень сложным деталям	От среднего до большого, Низкая сложность	0.3-0.4
Ультразвуковая нанокристалльная модификация поверхности: использование наконечника из карбида вольфрама для удара по поверхности в сочетании с эффектом полировки при статической нагрузке. [45] [46]	Повышает коррозионную стойкость и износостойкость деталей.	Отсутствие коммерческой доступности Не подходит для хрупких деталей	От среднего до большого, Низкая сложность	0.21-1.00
Ротационная ультразвуковая обработка: Сочетание традиционного фрезерования с ультразвуковой обработкой. [47]	Экономически эффективен для обработки высокопрочных материалов, таких как титан.	Большое время обработки. Низкая зрелость процесса для применения в промышленных целях	От среднего до большого, Низкая сложность	0.26-1.21
<b>Химическая обработка</b>				
Химическая полировка: использование химического	Подходит для сложной геометрии	Длительное время полировки	От маленького к большому,	0.29-0.51

Продолжение таблицы 1.1.

раствора для растворения шероховатой поверхности. [26] [28]			высокая сложность	
Электрополировка: Удаление материала анодным растворением поверхностного слоя. [48] - [52]	Экономичный метод улучшения поверхности хрупких деталей Повышает коррозионную стойкость деталей	Часто используется опасные химические вещества в качестве электролита	От маленького к большому, высокая сложность	0.10-1.30
<b>Термическая поверхностная обработка</b>				
Электроэрозионная обработка: Разряд из апертуры инструмента используется для нагрева и плавления неровностей поверхности. [53] [54] [55]	Применимо к широкому спектру электропроводящих материалов.	Низкая скорость съема материала	Малый-средний, средняя сложность	0.17-0.4
Термическая зачистка кромок: Использование горячего газа для устранения дефектов поверхности. [56]	Быстрый процесс	Проверено для удаления заусенцев, но нет известных исследований по использованию на металлических СЛС-деталях	Малый-средний, средняя сложность	-

Продолжение таблицы 1.1.

Лазерная полировка. [57] - [62]	Выборочная полировка небольших участков (<0,1 мм <sup>2</sup> )	Дорого в эксплуатации, и стоимость увеличивается с увеличением сложности.	Малая, от низкой до средней сложности	0.4-1.2
---------------------------------	---	---	---------------------------------------	---------

### 1.3 Газовые разряды с жидкими электродами в процессах обработки металлических изделий.

Совокупность процессов, возникающих при протекании электрического тока через газ между электродами один из которых является жидким принято называть газовым разрядом с жидкими электродами. Основными процессами, обеспечивающими возможность протекания электрического тока, является ионизация и образование плазмы. Интерес к данной системе обусловлен сложным взаимодействием между плазмой и жидкостью, которое обусловлено специфическим физико-механическим механизмом, создающим обратную связь на границе раздела между плазмой и жидкостью. Следует отметить, что данные разряды являются самостоятельными и могут инициироваться в следующих формах: 1) объемной (диффузионной) 2) в виде ансамбля микрозарядов в жидкости на поверхности твердого электрода 3) в пузырьках газа в толщине жидкости 4) в виде диафрагменного разряда 5) в виде фигур Лихтенберга

Первым исследованием, связанным с изучением взаимодействия плазмы с жидкостью, можно считать работу Кавендиша от 1875 г. “Эксперименты в атмосфере” [63], связанной с получением азотной кислоты в воздухе. Более направленные исследования были проведены в конце XIX века независимо друг от друга Слушковым [64, 65] и Плентэ [66].

Слугиновым Н.П. было отмечено существование двух типов свечения. Свечение I-го типа возникает при подаче напряжения на анод, находящегося в

электролите, с образованием пленочного кипения. Свечение II-го типа наблюдается при большой плотности тока и при контакте электрода с электролитом. Наблюдаются акустические колебания газа, происходит разбрызгивание электролита и интенсивное отскакивание пузырьков газа от электрода. Изменяя условия горения разряда можно переходить от I-го типа к II-му типу. Отмечается сходство со свечением вольтовой дуги. Было экспериментально определено то, что жидкость не добирается до поверхности электрода и ток в виде искр проходит через образовавшийся пар. Плантэ показал в своей работе, что электрод располагался над поверхностью электролита. Зажигание разряда происходило между водным раствором хлорида натрия - катодом и графитовым анодом. В представленной работе проводились исследования шаровых молний и возможности их создания.

В начале 20-го века А. Клеменк [67] начал систематически исследовать взаимодействия газового разряда с растворами электролитов. 50-е годы 20 века являются началом современного этапа исследований газовых разрядов с жидкими электродами, именно в этот момент появилось огромное количество публикаций и патентов исследователей из различных школ, число которых продолжает расти. Среди данных исследователей следует отметить работы групп ученых М. Инграма, К. Хоуга, А. Хиклинга, А. Денаро, Р. Дейвиса, Д. Линакра из Англии (Ливерпульский университет); группу ученых К. Харада, Й. Канзаки, Т. Мизомо (Япония); группы ученых Д. Воодман, П. Гупта, Е. Мелетис, М. Вебб (Америка); группу ученых из Англии - А. Ерохин, Х. Ние, А. Вилсон; группа ученых из Венгрии – Т. Цсерфалви, П. Мезей, австралийских ученых (Д Бел, Т Паулмер); группу индийских ученых из Индии под руководством С. Сенгупта; группу ученых из Китая - В. Айхиянг, Г. Джинханг,; молдавскую группы ученых (В.Н. Дураджи, П.Н. Белкин, Б.Р. Лазаренко,); международную группу П.Дж. Брюггеман, М.Дж. Кушнер, Б.Р. Локк , JGE Gardeniers, WG Graham, DB Graves, RCHM Hofman-Caris, D Maric, JP Reid, E Ceriani, D Fernandez Rivas, JE Foster, SC Garrick, Y Gorbanev, S Hamaguchi, F Iza, H Jablonowski, E Klimova, J Kolb, F Krcma, P Lukes, Z

Machala, И Маринов, Д Мариотти, С. Медедович Тагард, Д Минаката, ЕС Neyts, J Pawlat, Z Lj Petrovic, R Pflieger, S Reuter, DC Schram, S Schröter, M Shiraiwa, B Tarabová, PA Tsai, JRR Verlet, T von Woedtke, KR Wilson, K Yasui и Григорий Зверев; группу ученых из Новосибирска, Россия - Л.Ф. Бахтурова, А.М. Бадалян, О.В. Поляков; группы ученых из Украины - Е.В. Кривичкий, В.В Шамко, , а также нескольких российских групп ученых руководителями которых являются С.Д. Терентьев, Д.И. Словецкий, А.В. Хлюстова А.И. Максимов и Э.Е. Сон, в которую входит группа ученых из Республики Татарстан - И.Ш. Абдуллин, Ф.М. Гайсин, Н.Ф. Кашапов.

Тема исследований, направленная на изучение газовых разрядов с жидкими электродами, вызывает огромный интерес ученых во всем мире. Изначально столь большой интерес был вызван электролизом тлеющим разрядом [67], процессом пробоя диэлектрической жидкости при высоковольтном переключении [68], влиянием на окружающую среду, на основании того, что плазма является богатым источником химически активных веществ, таких как  $\bullet\text{OH}$ ,  $\text{O}\bullet$  и  $\text{H}_2\text{O}_2$ , а также УФ-излучения [69]. Использование плазмы в качестве передовой технологии окисления, позволяющей проводить разложение неорганики и органики в водных растворах [70]. Этим вопросам посвящено множество исследований микросекундных импульсных разрядов в воде [71]. За последние 20 лет сфера исследований взаимодействия плазмы с жидкостями расширилась и охватила множество областей применения: системы переключения электрических сетей [68], аналитическая химия [72, 73], восстановление окружающей среды (очистка и дезинфекция воды) [70], стерилизация и медицинское применение (заживление ран, абляция тканей, свертывание крови, литотрипсия) [69, 78], синтез материалов (наночастицы) [74], формирование функциональных покрытий, химический синтез ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2$ ) [77], обработка материалов (удаление фоторезиста, функционализация полимера, плазменная обработка поверхности, термообработка) [75, 76].

Эту область исследований также условно делится на определенные направления:

- 1) Газовый разряд между жидким электролитическим анодом и твердым катодом из металла (с проведением контакта или без контакта с электролитом);
- 2) Горение газового разряда в аэрозолях электролитов;
- 3) Газовый разряд в многофазной среде (газовая фаза, диспергированная в жидкости - пузырьки);
- 4) Газовый разряд, горящий на поверхности жидкости между металлическими электродами.

В контексте данной диссертационной работы интерес вызывает использование газовых разрядов с жидкими электродами с точки зрения применения для термической обработки, формирования микрорельефа поверхности, модифицирования поверхностного слоя и финишной полировки поверхности. Проведем обзор исследований горения газового разряда с применением жидких электродов в данной интересующей нас области.

Академик Б.Р. Лазаренко [79-84] на основе работ А.Н. Губкина, Л.В. Писаржевского и Вина в 70-х годах прошлого века начал исследования. Были проведены серии экспериментов по исследованию явления прохождения электрического тока через водный раствор - электролит при напряжениях от 0 до 300 В. В качестве катода выступал стержень из вольфрама, имеющий диаметр около 2мм, а анодом являлась свинцовая пластина. В результате исследований, авторами были сделаны следующие выводы [85-90]:

1. Прохождение тока через электролит при горении разряда в жидкости является ионным процессом только для определенных случаев, таких как когда плотность тока на электродах, катоде и аноде, не превышает критической величины. Выше определенного значения происходит образование электронной проводимости, влияние которой в данной смешанной проводимости постоянно растет.

2. Появление данного электрического тока при горении разряда в жидкости в зависимости от значения напряжения происходит в три этапа: первый этап — это этап ионных процессов, для которых справедлив закон Ома, второй этап — это этап искрового электрического разряда, и на конец третий этап — это этап дугового электрического разряда.

3. Этап ионных процессов полностью соответствует электрохимическим законам. Для описания явлений, которые возникают на втором и третьем этапе данного процесса, необходимо привлечь законы физики газового разряда.

4. В момент изменения процесса протекания тока через электролит при горении разряда в жидкости происходит смена фазового состояния системы. Это описывается ее переходом из 2-х фазной системы жидкость - твердое вещество (первый этап процесса) во многофазную систему твердое вещество – плазма – газ – жидкость (второй и третий этапы процесса).

Ученики академика Б.Р. Лазаренко в работе [87] проводили исследования процесса нагрева металлов с помощью электролитной плазмы. Было определено, что величина прикладываемого напряжения очень сильно влияет на температуру нагрева электрода, и такие начальные свойства электролита, как температура и состав также влияет на температуру нагрева электрода. Ученый В.Н. Дураджи в своей работе [85] пришел также к выводу, что температура электрода с увеличением погружения на глубину растет линейно, а с увеличением радиуса электрода температура нагрева уменьшается обратно пропорционально  $\sqrt{R}$ . Погруженная часть электрода имеет во всех точках одинаковую температуру. Нагревание пластин с толщиной значительно меньшей диаметра участка нагрева и цилиндрических стержней при использовании концевой нагрева показали, что зависимость температуры от времени в центре участка или у основания цилиндра описывается выражением

$$T(\tau) = T_0 e^{-k\left(\frac{\tau_0}{\tau} - 1\right)} \quad (1.1)$$

где  $T_0$  – это значение максимальной температуры основания или на центре данного участка;  $\tau_0$  – это время за которое устанавливается постоянная температура;  $k$  – это постоянная величина, которая зависит от состава электролита, а также размеров (геометрия) цилиндрического электрода или участка, который нагревается.

Для случая увеличения расстояния от основания погруженной в электролит части данного электрода или от точки центра нагреваемого участка пластины, уравнение для распределения температуры имеет следующий вид:

$$T(x, \tau) = T_0 e^{-k(\frac{\tau_0}{\tau}-1)} - x \cdot grad T(x, \tau) \quad (1.2)$$

где  $x$  – это переменная, которая описывает расстояние от начала основания цилиндра или центра участка.

Выражение для описания распределения температуры вне части где идет нагревание пластины:

$$T(x, \tau) = T_c + (T_1 - T_c) \cdot \frac{1}{2} \left[ e^{-(x-R)\sqrt{\frac{\alpha}{\lambda h}}} erf c \cdot \left( \frac{x-R}{2\sqrt{\alpha\tau}} - \sqrt{\frac{\alpha\tau a}{\lambda h}} \right) + e^{(x-R)\sqrt{\frac{\alpha}{\lambda h}}} erf c \cdot \left( \frac{x-R}{2\sqrt{\alpha\tau}} + \sqrt{\frac{\alpha\tau a}{\lambda h}} \right) \right] \quad (1.3)$$

В ходе исследований были получены следующие результаты: для снижения мощности источника тока, следует осуществлять нагревание катода с последовательным погружением в жидкий электролит. Температура катода растет с увеличением глубины погружения. При концевом и спрейерном нагревании в той части электрода где идет нагрев наблюдается большой градиент температур, который обязательно надо учитывать во время проведения металлической химико-термической обработки.

Работы [91,92,93] ученых из США представляют огромный интерес так как посвящены проведению исследований процессов очистки и нанесения покрытий из металла на поверхность стали путем применения газового разряда между анодом, являющимся электролитом, и катодом из металла. В таких работах как [92, 94] также было приведено описание плазменно-



электролитного процесса с анодом, являющимся электролитом. На рисунке 1.10 как видно, показана вольтамперная характеристика данного процесса, а также два метода для обработки металлических поверхностей: на рисунке 1.10а представлен образец, опущенный в водный раствор электролита, а на рисунке 1.10б представлен раствор электролита, стекающий на образец.

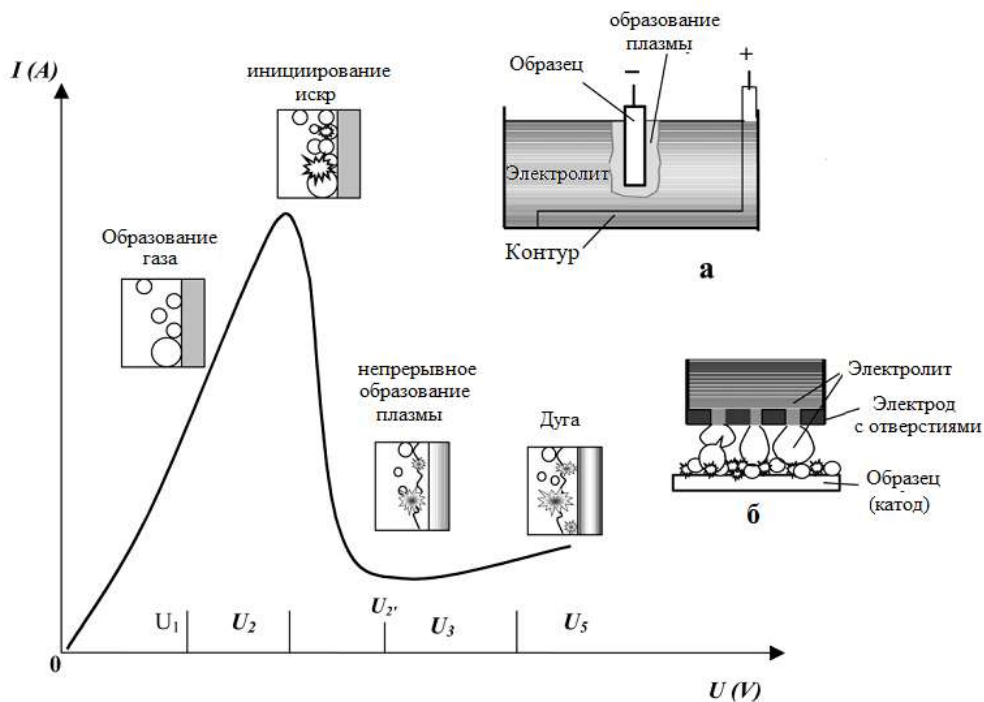


Рисунок 1.10 - ВАХ плазменно-электролитного процесса обработки с электролитическим анодом [94]

На данном ВАХ авторами была выделена зона горения тлеющего разряда  $U_2-U_2'-U_3$ , которая соответствует обработке низкоуглеродистой стали. Режимы процессов обработки и параметры данных полученных поверхностей и покрытий показаны в таблице 1.2. Сама обработка производилась в четыре режима: первый режим – процесс очистки поверхности, второй режим – процесс нанесения цинкового покрытия на сталь, третий режим – процесс нанесения цинкового покрытия на цинковый электрод, четвертый режим – процесс нанесения алюминий-цинковых

покрытий. Также были исследованы следующие характеристики у данных покрытий – это адгезионная прочность, толщина покрытия, твердость поверхности шероховатость поверхности, элементный состав и коррозионная устойчивость.

Таблица 1.2 - Параметры покрытий, а также режимы обработки после ПЭО с электролитическим анодом.

Параметры	Очистка	Zn покрытие I	Zn покрытие II	Zn-Al покрытие
напряжение (V)	170–200	180, 200, 220	180, 200	180, 200, 220
плотность тока (A/cm <sup>2</sup> )	0.23–0.45	0.11–0.78	0.3–0.5	0.8–1.2
материал анода	Stainless steel	Stainless steel	Zn plate	Stainless steel
Межэлектродное рас (mm)	8, 12, 16	8, 12, 16	8, 12, 16	8, 10, 12
электролит (wt.%)	NaHCO <sub>3</sub> 14%	ZnSO <sub>4</sub> 21%, 24%, 27%	ZnSO <sub>4</sub> 24%	[20% ZnSO <sub>4</sub> + 80% Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> ] 10%, 11.5%, 13%
скорость потока (l/min)	3–3.8	1.9–3.8	1.9–3.8	1.9–3.8
температура (°C)	75	73	73	70
время обработки (s)	13	32	32	32

	Очищенная поверхность	Zn покрытие I	Zn покрытие II	Zn-Al покрытие
толщина;	–	12 μm	15 μm	18 μm
скорость осаждения (μm/s)	–	0.37 (0.28–0.53)	0.47 (0.41–0.47)	0.56 (0.41–0.56)
шероховатость (R <sub>a</sub> )	2.5 μm (1.8–3.4 μm)	3.5 μm (2.2–8.2 μm)	2.5 μm (1.5–2.5 μm)	2.3 μm (0.8–3.8 μm)
содержимое элемента	1.38 wt.% O <sub>2</sub> (1.38–7.3 wt.% O <sub>2</sub> )	Zn	Zn	3.0 at.% Al, Zn bal. (0.2–3.0 at.% Al, Zn bal.)
Адгезия (МПа)	–	> 70 (20 to >70)	> 70 (>70)	> 70 (30 to >70)
твердость (GPa)	1.9 (bulk steel)	0.97	1.06	1.30

В результате исследований было определено, что плазменно-электролитная обработка является одним из самых эффективных способов очистки поверхности. Как видно, у стали происходит повышение коррозионной устойчивости, а также данные поверхности становятся наноструктурированными.

Исследования, отраженные в работе [93], показывают как происходит формирование молибденовых покрытий, которые получают путем применения плазменно-электролитного способа нанесения покрытий, а также описываются их характеристики. Покрытия из молибдена были получены из раствора Na<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>, путем добавления порошка молибдена. Обработка происходила при плотности мощности равной 139,5 Вт/см<sup>2</sup>, а время проведения обработки составило 5 минут. Были проведены исследования морфологии, состава и структуры данных покрытий. Результаты, полученные

в результате исследований, показывают успешное осаждение молибдена на поверхности сталей марок Inconel 718 и 4330V. Также авторы в работе указывают на увеличения твердости данных покрытий относительно обычной стали и предлагают возможные перспективные направления и области применения полученного способа нанесения функциональных покрытий.

В работе [95] исследователи предложили изучить параметры плазмы в процессе проведения очистки поверхностных слоев, соответственно это определение распределения потенциала, длины разряда по толщине парогазовой оболочки, температуры газа, а также приведенной напряженности электрического поля в плазме, ну и конечно же провести исследования плотности и энергии электронов. В результате в работе учеными было выдвинуто предположение, что разряд с электролитическим катодом является новейшей формой неравновесного газового разряда при атмосферном давлении.

Также исследования по изучению влияния электрического разряда с электролитическим катодом на поверхность и структуру металлического анода проводились Ичхорном Е, Лазаренко Б.Р, Ясногородским И.З., Мурасовым В.С. [79-84]. Были представлены исследования химического и фазового состава изделий после обработки в электролитической плазме газового разряда. Они показали, что в данном случае происходят процессы нагрева, закалки, очистки и химической модификация (полировки и т.д.) поверхностных слоев обрабатываемых металлов [96]. Авторами из [67] было определено, что влияя на состав электролита можно проводить такие процессы как нитроцементация, азотирование, борирование, сульфидирование, карбидизация, а также другие различные типы модификации с огромными скоростями.

Авторами в работе [88] производились исследования процесса науглероживания стали с применением электролитической плазмы при анодном процессе. Ими определено, что коэффициент диффузии углерода в армко-железо при 860°C равен на различных поверхностях:  $(0.8-1.0) \cdot 10^{-6} \text{ см}^2/\text{с}$

на боковой поверхности и  $(1.1 - 1.24) \cdot 10^{-6} \text{ см}^2/\text{с}$  в основании. В Стали 10 коэффициент диффузии углерода, который определяется по распределению углерода в основании, при температуре обработки  $910^\circ\text{C}$  равен  $1,53 \cdot 10^{-6} \text{ см}^2/\text{с}$ , при  $870^\circ\text{C}$  равен  $1,12 \cdot 10^{-6} \text{ см}^2/\text{с}$  и при  $820^\circ\text{C}$  равен  $0,75 \cdot 10^{-6} \text{ см}^2/\text{с}$ . Энергия активации диффузии углерода в Стали 10 равна 20,3 ккал/моль. Проведение сравнения полученных значений коэффициентов диффузии углерода в Стали 10 и в армко-железе с традиционными методами цементации указывают на то, что коэффициент диффузии углерода повысился в 2 – 2,5 раза, а энергия активации снизилась с 32,4 до 20,3 ккал/моль. Трудно объяснить по какой причине происходит повышение коэффициента диффузии углерода и снижение энергии активации в процессе нагрева в электролитической плазме. Причиной скорее всего, является то, что воздействие электрических разрядов на поверхность электрода инициирует процессы возникновения различных дислокаций, вакансий и других различных дефектов кристаллической решетки, в результате которых происходит возрастание доли объемной диффузии, а, соответственно, и рост общего коэффициента диффузии.

В работе [97] авторами был описан способ проведения очистки поверхности с применением НТП газового разряда с электролитом играющим роль катода. Данный разряд зажигался между изделием, которое обрабатывается, и жидким неметаллическим электродом в режиме: межэлектродное расстояние 1 – 1,5 мм, разрядный ток 0,15 А – 7 А при разрядном напряжении 50В – 100В соответственно. Результаты исследований показывают, что электрический ток, протекающий между струей водного раствора электролита и заготовкой-изделием, можно использовать в технологических целях. Также был успешно проведен процесс очистки внутренних поверхностей трубок из нержавеющей стали имеющие диаметр равный 2 – 12 мм. Авторами было определено, что качество проведенной очистки поверхности имеет сильную зависимость от расстояния между электродами - длины струи. Оптимальной является длина струи равная диапазону 5-8 мм. В результате увеличения этого расстояния происходит

снижение устойчивости разряда, а уменьшение расстояния между электродами вызывает короткое замыкание, которое сопровождается локальным оплавлением поверхности электрода. Данный тип обработки приводит к двукратному уменьшению размеров заусенцев. Также при уменьшении скорости перемещения струи происходит улучшение состояния поверхности дополнительно на 1-2 класса по стандарту ГОСТ 2789-73.

В работе [98] исследуется плазменно-электролитное полирование титановых и ниобиевых сплавов. Установлено, что при рабочем напряжении в районе от 260 до 300 В происходит обеспечение снижения шероховатости поверхности индекса Ra. При значении напряжения 260 В обработка ниобия приводит к еще большему травлению поверхности и значительному увеличению шероховатости. Наименьшие значения размеров шероховатости при ПЭО происходят на следующих режимах: для титана – это напряжение в районе 300 В, а плотность тока равна от 0,18 до 0,30 А/см<sup>2</sup>, для ниобия – это напряжение от 280 до 300 В и плотность тока равна от 0,18 до 0,20 А/см<sup>2</sup>.

В работе [99] исследуются процессы плазменно-электролитной полировки аустенитной нержавеющей стали. При использовании водного раствора электролита, содержащего 4% (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, для формирования стабильной парогазовой оболочки необходимо введение 0,05 – 0,45% соляной кислоты, при температуре электролита 35 - 40°C. Также это значительно увеличивает скорость и равномерность полировки, уменьшает среднее значение шероховатости.

Анодный нагрев образцов и изделий в растворах водного электролита обычно происходит с уменьшением массы этих образцов. Химические и электрохимические реакции являются основной причиной этого явления. Они обусловлены процессом перемещения анионов электролита сквозь парогазовую оболочку. Снижение шероховатости поверхности обрабатываемой стальной детали, закругление кромок и снятие заусенцев являются положительным технологическим результатом данного анодного растворения. Было установлено, что в объеме рабочего электролита происходит

постепенное проникновение гидроокиси железа. В то же время, вместе с этим процессом возможно образование поверхностного оксидного слоя, параметры которого зависят от свойств электролита таких как состав электролита, а также от таких данных как температура нагрева и способ охлаждения. Авторами было определено, что оксидные слои, которые образуются после процесса нитрозакалки среднеуглеродистых сталей, имеют хорошую устойчивость против атмосферной коррозии.

Также учеными были исследованы процессы взаимодействия насыщающей среды с поверхностью обрабатываемого металла и в результате было установлено, что они состоят из следующих стадий: Первая стадия – это процесс образования активных веществ в окружающей среде, а также в реакционном объеме; второй этап – происходит процесс подвода насыщающего вещества к поверхности металлического образца; третий этап – происходит адсорбция активных атомов или молекул на поверхности металла; четвертый этап – происходит химическая реакция на поверхности (рост слоя за счет химической реакции или за счет диффузии), а также образование продуктов реакции, которые находятся в адсорбционном состоянии; пятый этап – происходит десорбция продуктов реакции; шестой этап – это вывод продуктов реакции из зоны взаимодействия в реакционный объем, а также в окружающую среду.

В результате исследований было установлено, что повышение температуры является наиболее эффективным, по той причине, что коэффициент диффузии и константы скоростей реакции связаны экспоненциально. В то же время, эффективно процесс происходит лишь при очень быстром разогреве. Постепенный разогрев приводит к быстрому росту зерна и ухудшению механических свойств на поверхности и в центре обрабатываемого металлического изделия. Снижение константы скорости адсорбции для одинаковых характеристик внешней среды происходит в процессе роста диффузионной подвижности и химической активности. Зависимость скорости роста диффузионного слоя от температуры имеет в

общем случае максимум. Термо-химический процесс обработки при электролитном нагреве происходит на промежутке восходящей ветви этой зависимости по той причине, что повышение температуры электролита инициирует увеличение толщины диффузионных слоев.

Учеными было обнаружено, что при катодном нагреве скорость цианирования в 3-4 раза больше достигаемой при использовании традиционных методов нагрева в печах. Высокие скорости насыщения обуславливаются процессом протекания электролиза, а также присутствием электрических разрядов в объеме парогазовой оболочке. По мнению авторов работы, электрическое поле ускоряет перенос выделяющихся из раствора элементов, которые находятся в ионизированном состоянии. В работах ученого К. Иноуэ была выражена данная точка зрения, хотя была обнаружена диффузия насыщенного компонента как при катодной, так и при анодной режиме обработки детали. Диффузия ионов в электрическом поле дополняет данное обычное уравнение диффузии. Также влияние высокочастотного напряжения, которое является дополнительным к постоянному напряжению, было рассмотрено в этой модели.

Процессы цементации, цианирования, а также азотирования происходят только в тех растворах, где давление паров насыщающего вещества выше, чем у растворителя. Необходимая концентрация насыщающего вещества в растворе определяется соотношением давлений компонентов парогазовой оболочки.

Процесс изучения плазменно-электролитных процессов образования микрорельефа поверхности металлических образцов показан в [100]. Авторами было установлено, что скорость полировки металла сначала повышаясь, а затем опускаясь нелинейно зависит от прикладываемого напряжения. Скорость съема металла максимально была равна  $2,54 \cdot 10^{-3}$  мм/с. В работе приведены значения изменения шероховатости в зависимости от режимов формирования микроструктуры (Таблица 1.3).

Таблица 1.3 - Изменения шероховатости в зависимости от режимов формирования микроструктуры

Конц раств ора	U <sub>без нагр</sub> (В)	t (сек.)	U <sub>ср</sub>	I <sub>ср</sub>	Δm (мг)	ω мм/с	R <sub>a</sub> мкм	R <sub>z</sub> мкм	R <sub>y</sub> мкм	R <sub>m</sub> мкм	R <sub>q</sub> мкм	R <sub>t</sub> мкм	S <sub>m</sub> (мм)	
1 %	A	45	47,1	35	1,8	25	0,231	3,549	12,66	22,16	14,29	4,672	27,9	0,12 9
	B	90	30,5	82,3	4	40	0,571	4,337	12,35	26,69	15,93	5,79	38,7 9	0,21 57
	C	130	31,3	119	7,5	86	1,188	6,775	20,28	39,11	22,42	8,657	51,4	0,17 25
	D	180	30,6	165	8	79	1,124	4,137	16,39	25,06	14,74	5,176	32,8 5	0,11 61
	E	220	30,3	205	22	73	1,048	4,017	16,8	23,21	14,17	4,979	27,5 1	0,09
3 %	A	45	30,6	40	4,3	38	0,540	3,088	11,13	16,92	10,41	3,872	22,3 4	0,12 91
	B	90	30,6	80	9	91	1,294	2,782	6,66	17,43	8,552	3,658	26,8 4	0,28 34
	C	130	30,6	115	15	104	1,479	2,409	10,28	19,71	13,3	3,474	26,1 8	0,12 36
	D	180	30,9	155	19	88	1,239	3,027	12,39	19,8	12,35	3,894	25,2	0,10 42
	E	220	30	200	25	93	1,349	1,785	8,29	12,9	8,57	2,371	17,0 1	0,08 5
5 %	A	45	30,3	39	8	78	1,120	0,74	2,63	4,13	2,076	0,919	5,45	0,11 03
	B	90	30,5	75	24	178	2,540	5,553	21,3	33,53	18,59	7,053	44,0 7	0,11 41
	C	130	30,4	107	27	145	2,076	2,871	12,03	18,63	11,62	3,732	22,8 8	0,08 96
	D	180	30,5	135	30	129	1,841	1,329	6,38	9,5	5,67	1,723	14,0 7	0,05 66
	E	220	30,7	185	25	96	1,361	0,805	4,45	6,11	3,98	1,025	7,34	0,09 78
-	-	-	-	-	-	-	0,409	1,993	3,207	2,151	0,550	4,51 9	0,06 34	

На основании проведенного обзора можно сделать вывод о перспективах использования газовых разрядов с участием жидких электродов для целей финишной обработки металлических изделий, полученных селективным лазерным сплавлением. А именно особенности совмещения процессов термической обработки, модификации поверхностных слоев и финишной полировки.

#### 1.4 Цель и задачи диссертации

В настоящее время отсутствуют систематические работы экспериментальных исследований, изучающих влияния разрядов с жидкими



электродами на структуру и свойства изделий, получаемых методом селективного лазерного сплавления. Не установлено влияние «катодного» и «анодного» режимов плазменно-электролитной обработки на СЛС-изделия. Нет систематических исследований физических процессов разрядов, которые оказывают влияние на формируемую микроструктуру металла. Также отсутствует понимание механизма влияния этого разряда на поверхность металлов. Данные вышеперечисленные причины не дают в полной мере провести разработку инновационной технологии финишной плазменно-электролитной обработки изделий СЛС.

Работа направлена на решение актуальной проблемы создания нового метода плазменно-электролитной обработки поверхности изделий селективного лазерного сплавления и исследованию влияния параметров разрядов с жидкими электродами в процессах плазменно-электролитной обработки на структуру и свойства СЛС-изделий.

Целью работы являлось изучение физико-химических процессов взаимодействия низкотемпературной плазмы разряда с жидкими электродами с поверхностью изделий, полученных методом селективного лазерного сплавления, (СЛС-изделий) и разработка метода финишной плазменно-электролитной обработки деталей энергетических установок, полученных методом селективного лазерного сплавления.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Провести обзор существующих методов аддитивного построения металлических изделий, существующих методов термической и финишной обработки, определить современное состояние известных экспериментальных и теоретических исследований газовых разрядов с жидкими электродами в процессах обработки металлических изделий;
2. Разработать и изготовить экспериментальные установки исследования характеристик плазменно-электролитного процесса при обработке металлических образцов;

3. Установить условия термического, гидроударного и полирующего воздействия газовых разрядов с жидкими электродами на поверхности изделий, полученных селективным лазерным сплавлением;
4. Исследовать зависимость процесса обработки СЛС-изделий от параметров газовых разрядов с жидкими электродами и определить закономерности модификации поверхностных слоев СЛС-изделий от термического, гидроударного и полирующего воздействия;
5. Провести моделирование процесса финишной плазменно-электролитной полировки поверхности СЛС-изделий;
6. Разработать метод плазменно-электролитной обработки деталей энергетических установок, полученных методом селективного лазерного сплавления.

## ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ

В данной главе приведена информация о установке селективного лазерного сплавления и дано описание методики получения СЛС-изделий. Описаны экспериментальные установки плазменно-электролитной обработки, представлена аппаратура для регистрации параметров и характеристик газовых разрядов с жидкими электродами. Приведена методика термической обработки СЛС-изделий, описаны методы проведения исследований параметров разрядов, а также была проведена оценка погрешности измерений. Методы для измерения физико-механических характеристик изделий, полученных с помощью селективного лазерного сплавления, были описаны.

### 2.1 Экспериментальные установки исследования плазменно-электролитного разряда в процессах обработки материалов

Экспериментальные установки, предназначены для исследования параметров газовых разрядов с жидкими электродами в процессах термической обработки, полировки и модификации поверхности металлических образцов, и включают электродную систему, источник электрического питания, насосный комплекс для прокачки электролита, емкости, непосредственно в которых производится процесс горения разряда, оборудования измерения электрических характеристик разряда и параметров процесса нагрева металлических образцов в реальном времени.

Экспериментальные установки предназначены для исследования процессов термической обработки, полировки и модификации поверхности СЛС-изделий в плазме газового разряда с жидкими электродами в диапазоне значений  $U=0\div 400$  В, тока  $I=0\div 30$  А, pH=1-14 и температуры электролита от 5 до 110 °С. Функциональные схемы установок, работающих в данных условиях, представлены на рисунках 2.1 и 2.2. На рисунке 2.1 представлена установка,

позволяющая проводить регистрацию электрических и энергетических характеристик разряда, проводить спектральные исследования низкотемпературной плазмы, осуществлять измерение распределения потенциала между электродами и проводить видеофиксацию процесса горения разряда.

Для задач локальной обработки поверхности СЛС-изделий использовалась установка, представленная на рисунке 2.2. Принцип ее работы заключался в использовании струи электролита, вертикально стекающей на поверхность металлического образца. При этом горение разряда происходит в месте соприкосновения основной струи с металлом, что обеспечивает возможность выборочной обработки путем перемещения струи параллельно поверхности.

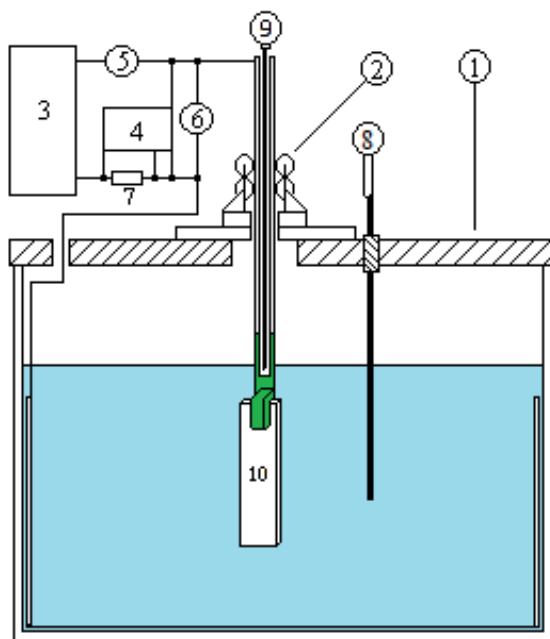


Рисунок 2.1 - Функциональная схема экспериментальной установки плазменно-электролитной обработки

Установка, представленная на рисунке 2.1, состоит из электролитической камеры 1, изготовленной из термостойкого стекла, системы крепления и регулирования уровня погружения образца в электролит 2, источника питания 3, осциллографа 4, амперметра 5, вольтметра 6, шунта 7,

термопары для измерения температуры электролита 8, термопары 9 для измерения температуры обрабатываемого образца 10. Электродная система 2 представляет из себя металлическую трубку, на конце которой расположен захват, покрытый керамикой и удерживающий образец. Внутри трубки установлена хромель-копелевая термопара, позволяющая измерять температуру в месте фиксации образца. Металлическая трубка фиксируется с помощью прижимных силиконовых валиков, вращение которых также позволяет изменять глубину погружения образца в электролит. Глубиной погружения контролировалась обрабатываемая площадь поверхности. Для замыкания цепи второй медный электрод находился в электролите. Подача постоянного регулируемого напряжения обеспечивается источником питания 3. Контроль величины напряжения, силы тока и их формы осуществлялся с помощью осциллографа 4, амперметра 5 и вольтметра 6.

В экспериментах производилось исследование взаимосвязи обрабатываемой площади с параметрами газового разряда. Обрабатываемая площадь образца варьировалась  $S_0 = 0,1 - 9,8 \text{ см}^2$ , площадь контр-электрода  $S_{\text{Э}} = 110,6 \text{ см}^2$ . Для того, чтобы плазменно-электролитный процесс модификации поверхности протекал на поверхности образца соблюдалось неравенство площадей поверхности  $S_{\text{Э}} > 5 S_0$ .

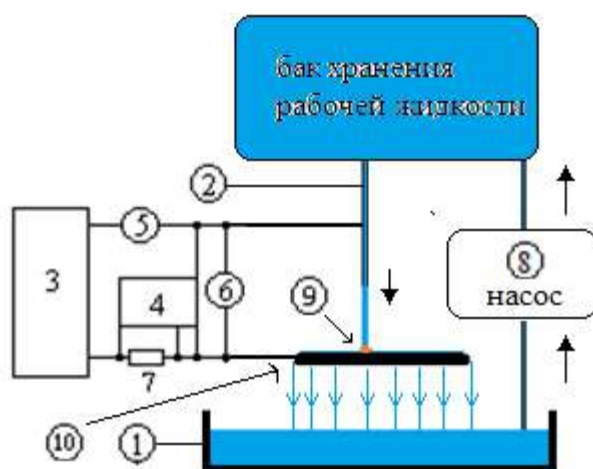


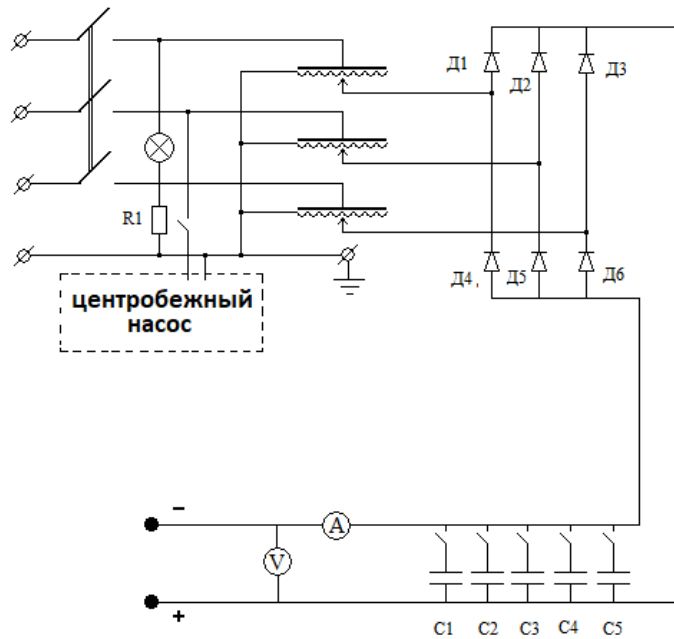
Рисунок 2.2 - Функциональная схема экспериментальной установки, предназначенной для локальной плазменно-электролитной обработки поверхности металлического образца.

Рассмотрим установку, предназначенную для возможности локальной обработки поверхности образцов, представленную на рисунке 2.2. Она состоит из ванны 1, металлической трубки 2, изготовленной из нержавеющей стали и подсоединенной к баку с рабочим раствором электролита, источника тока 3, осциллографа 4, амперметра 5, вольтметра 6, шунта 7, насоса 8 для циркуляции электролита, струи электролита с местом контакта 9 на поверхности образца 10. Под действием силы тяжести электролит через металлическую трубку диаметром 2 мм вытекает из бака хранения рабочей жидкости. Поток жидкости падает перпендикулярно плоскости поверхности образца. Источник питания через токовводы подключен к металлической трубке и образцу. В месте контакта струи с поверхностью (обозначено 9 на рисунке 8) происходит горение разряда с жидким электродом. Образец имеет возможность перемещения в горизонтальной плоскости, тем самым обеспечивая возможность обработки всей поверхности. Перистальтический насос НП-ЛАБ-3 с помощью соединительных шлангов откачивал раствор из ванны и закачивал в бак хранения.

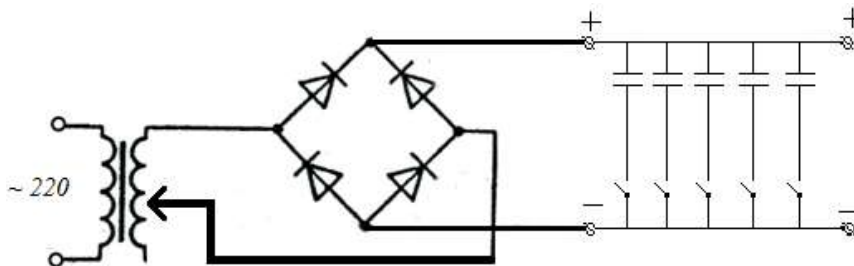
Для исследования процесса плазменно-электролитной обработки использовались водные растворы  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{NaOH}$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$  концентрацией до 5%. В качестве образцов использовалось плоская пластинка, полученная селективным лазерным сплавлением, стали 17-4PH. Процедура получения образцов описана в разделе 2.2.

Представленная на рисунке 2.3, система электрического питания, является источником постоянного тока с регулируемым напряжением. На рисунке 2.3 а представлена схема, работающая от сети трехфазного тока напряжением равной 380 В, а потребляемая мощность равна или меньше 1кВт. Сам источник питания состоит из следующих элементов: лабораторный автотрансформатор ТДГС2-15-В; диодный выпрямитель, который собран по схеме Ларионова из батареи конденсаторов, имеющую емкость равную 4000 мкФ, а также диодов ВЛ 25 Д10.46 . На рисунке 2.3б показана схема, которая

обеспечивает подачу выпрямленного напряжения различной формы, и которая состоит из 1) лабораторный автотрансформатор регулировочного типа 1М с напряжениями 1-250В; 2) диодный мост (диоды СД 246). В зависимости от условий эксперимента, подключается сглаживающий емкостной фильтр емкостью 1560 мкФ к источнику питания.



а



б

Рисунок 2.3 – Схемы двух источников питания: а) схема, работающая от сети трехфазного тока напряжением равной 380 В, а потребляемая мощность равна или меньше 1кВт, б)схема, которая обеспечивает подачу выпрямленного напряжения различной формы

Наличие источника питания батарей конденсаторов общей емкостью 4000 мкФ позволило проводить обработку СЛС-изделий в разряде с жидкими электродами при различных формах напряжения, которые представлены на рисунке 2.4. На верхней части рисунка представлен «пульсирующий» режим, когда было использовано только двухполупериодное выпрямление. А на нижнем рисунке представлен «сглаженный» режим, который реализуется при применении сглаживающих емкостных фильтров. В зависимости от количества используемых конденсаторов и получаемой общей емкости получали различные степени сглаживания формы напряжения.

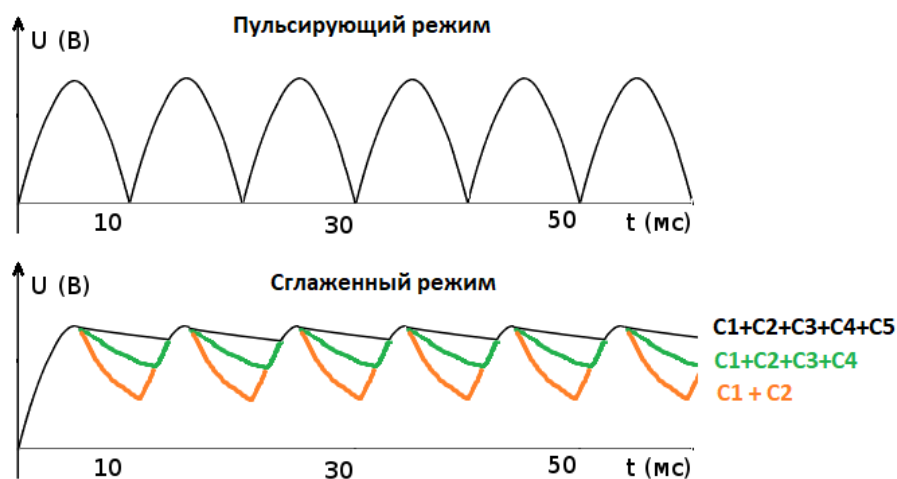


Рисунок 2.4 - Формы напряжения источника питания

Для проведения спектральных исследований низкотемпературной плазмы разряда использовался оптоволоконный спектрометр Flame-T-UV-VIS-ES, настроенный для работы в диапазоне 200-850 нм с установленной дополнительной собирающей линзой детектора (улучшенная чувствительность) с QR600-1-UV-VIS оптическим кабелем и 74-UV коллиматором.



## 2.2 Оборудование и технология селективного лазерного сплавления

Процесс селективного лазерного сплавления открыл новые возможности для производства новых легких компонентов реактивных двигателей с решетчатыми структурами, заменяющими сплошные секции. Предполагается, что данный подход должен привести к снижению веса. Поэтому внедрение данного производственного процесса в авиастроении является важной задачей, требующей проверки на соответствие множеству требований для авиационных изделий. Для этих целей образцы изготавливались методом СЛС.

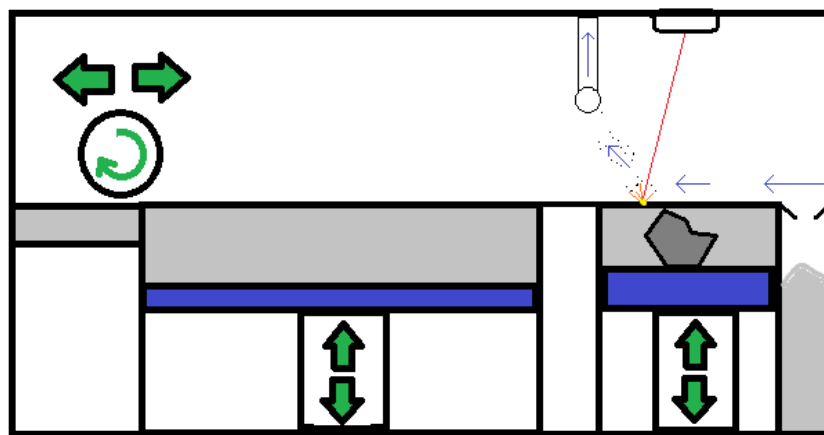
В экспериментах использовалась установка селективного лазерного сплавления ProX300, компании 3D Systems (Рис. 2.5а). На рисунке 2.5б представлена схема внутренней камеры, длина которой составляет 1500 мм, высота 800 мм. Камера герметична и позволяет создавать атмосферу инертного газа, в камере слева расположен металлический ролик для нанесения порошка, он имеет возможность горизонтального перемещения по всей камере. В середине имеется бокс с порошком, внутри которого расположен подвижный поршень, справа располагается зона построения, состоящая из подвижного поршня с платформой и лазером, установленного над ней. Цикл построения одного слоя состоит из следующих этапов: подъем центрального поршня на 60 мкм, спуск рабочей платформы построения на 40 мкм, движение ролика через центральный бокс с перемещением излишков порошка на рабочую платформу построения, сканирование лазером поверхности порошка. В процессе сканирования могут образовываться продукты сгорания, которые уносятся потоком газа в пылесборник.

Установка ProX 300 оснащена волоконным Nd:YAG лазером мощностью 500 Вт, с длиной волны 1080 нм, площадь пятна лазера составила 20 мкм. Размер зоны построения составляет  $x - 250$  мм,  $y - 250$  мм,  $z - 300$  мм, минимальный размер изделия  $x=100$  мкм,  $y=100$  мкм,  $z=20$  мкм. Во время сплавления поддержки изделия мощность лазера составляет 100 Вт, при

сплавлении самого изделия – 150 Вт, скорость сканирования 380 мм/с. В экспериментах использовался порошок нержавеющей стали 17-4PH, дисперсностью от 0,5 до 40 мкм, компании 3D Systems.



а



Б

Рисунок 2.5 – Установка ProX 300: а) внешний вид установки, б) схема рабочей камеры

Процесс селективного лазерного сплавления зависит от разных параметров, таких как мощность и скорость сканирования лазера, толщина порошка, ориентация изготавливаемой конструкции, расположение поддержек. Правильное расположение поддержек необходимо для эффективного удаления, выделившегося тепла при лазерном сплавлении. В процессе сканирования мощность лазера составляет 20% от общей мощности для поддержек, и 30% для самой конструкции. Скорость сканирования лазером поверхности порошка составляла 0,4 м/с.

Оцинкованные нержавеющие стали широко используются в качестве конструкционных материалов и применяются в различных отраслях науки и техники. Они нашли свое применение в кораблестроении, в электротехнической промышленности и в химической промышленности из-за хороших механических свойств и коррозионной стойкости при рабочих температурах ниже 300°C. Нержавеющая дисперсионно-твердеющая сталь марки 17-4 PH (15-17,5 Cr, 3-5 Ni, 3-5 Cu, <1 Mn, Si, 0,15-0,45 Nb, баланс Fe) представляет собой мартенситную сталь, усиленную осаждением сферических частиц, богатых Cu, в мартенситной (S) матрице (ОЦК,  $a = 2,86 \text{ \AA}$ ). Нержавеющая сталь 17-4 PH является наиболее популярным представителем

среди нержавеющей сталей при изготовлении металлургической продукции и одним из наиболее широко используемых материалов в порошковой технологии литья под давлением. В настоящее время технологии изготовления изделий из порошков, в частности, из стали 17-4 PH, недостаточно изучены и распространены по сравнению с литьем под давлением [101, 102].

С помощью программного обеспечения КОМПАС была создана трехмерная модель прямоугольного параллелепипеда с длинами сторон:  $50 \times 10 \times 3$  мм<sup>3</sup>. Полученная трехмерная модель была сохранена в формате STL. Этот формат файла используется для хранения облака точек и треугольников, описывающих поверхность трёхмерных моделей. STL-файл имеет две различных кодировки: текстовый формат (ASCII) или двоичный формат.

Затем, используя программное обеспечение DataBaseEditor – фирменную программу компании 3D Systems, модели были скопированы и расставлены по трехмерной поверхности печатной платформы принтера. Расположение моделей относительно поверхности печатной платформы различалось тремя модами роста, для удобства разделим их на I, II, III тип соответственно (см. Рисунок 2.6). Стрелкой указано направление плоскости сканирования сплавляемого слоя лазерным лучом. Затем проводится ручное проставление подложек и их редактирование. Далее, полученный файл отправлялся на построение в 3D принтер ProX 300.

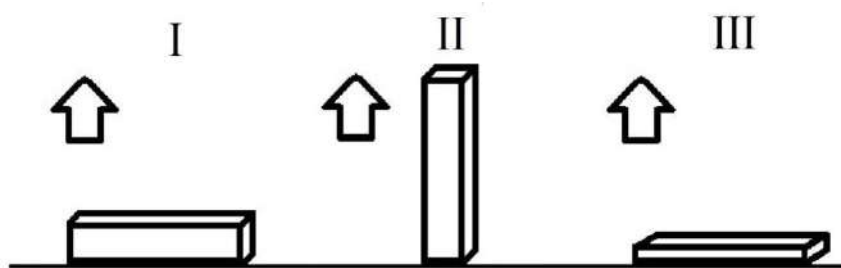


Рисунок 2.6 – Три вида образцов с различными модами роста

Программное обеспечение PX Control предназначено для непосредственного управления настройками и характеристиками ProX 300. Программа автоматически рассчитывает необходимое количество материала – порошка для печати. Также она управляет настройками лазера и системы

зеркал, управляющих лазерным лучом. После загрузки файла происходит послойное трехмерное расслоение моделей и поддержек, необходимое для «определения» принтером слоев построения. Затем, рабочая часть камеры машины заполняется средой высокочистого азота, происходит нанесение первого слоя порошка и калибровка лазерной системы. Во время работы, программа построения образцов на экране отображает основные характеристики системы позиционирования и системы управления лазером.

Время построения образцов составляло примерно 18 часов. На рисунке 2.7 можно увидеть образцы после их построения методом селективного лазерного сплавления.



Рисунок 2.7 – Образцы, полученные селективным лазерным сплавлением.

При СЛС изготовлении изделий выделяют следующие группы параметров: геометрические и центральные.

В геометрические входят параметры сканирования. Эти параметры связаны с четностью номеров слоев; первый слой - это цифра 0. Угол: угол сканирования (в градусах) относительно направления X метки ортонормы в зоне 3D-визуализации. Направление: направление сканирования (положительное или отрицательное) относительно оси сканирования. Пример: угол 90 - Отрицательное направление = Сканирование в соответствии с «-Y».

Приращение угла: приращение, влияющее на угол сканирования между двумя слоями с одинаковой четностью. Геометрическая коррекция: мультипликативные коэффициенты, связанные с координатами объектов относительно направления сканирования слоя № 0. Положение заполнения / Сторона детали: значения расстояния заполнения в микронах по сравнению с геометрическим пределом детали (внешний предел и отверстия). Внутреннее расстояние применяется ко всем ограничениям сечения, окружающим отверстия. Внешнее расстояние применяется ко всем остальным пределам сечения. Эти два значения расстояния, как правило, идентичны по абсолютной величине. Чтобы сплавление выходило за пределы детали, значение должно быть отрицательным для внешнего наполнения и положительным для внутреннего наполнения. Положение контура / Сторона детали: расстояние в микронах координат контура по сравнению с геометрическим пределом детали (внешний предел и отверстия). Чтобы контур выходил за пределы детали, значение должно быть отрицательным для внешнего контура и положительным для внутреннего контура. Разрешение: используется для определения контура детали. Чем ниже это значение (предел значения = 1), тем точнее определяется контур детали. Зазор между опорами: по умолчанию (в микронах) зазор между геометрическими объектами, объявленными как опоры, и объектами, объявленными как части (добавленные или вычтенные), связанные с опорой.

Центральные параметры - это параметры (лазер и сканер), связанные с заполнением участков объектов. Программирование способа реализации раздела разбивается на 3 основных типа параметров:

- Выбрав «Стиль» и установив соответствующие параметры,
- Параметры лазера,
- Параметры сканера.

Параметры стиля соответствуют стратегиям, используемым для заполнения секций, это означает, что будут спроектированы траектории лазерного луча. Это «базовый» стиль: траектории складываются из

параллельных векторов. Угол и направление этих векторов определяются в окне геометрических параметров. Для изменения направления заполнения векторов можно использовать опцию «вернуться назад». Если для этого параметра установлено значение «false», все векторы будут двигаться в одном направлении. Опция «неколлинеарность» сделана, чтобы минимизировать размер траекторий «скачка» (то есть время изготовления), изменяя порядок векторов:

- если опция «ложь», одновременно отмечаются коллинеарные векторы.
- если опция «true», коллинеарные векторы могут быть отмечены отдельно для уменьшения скачков.

Параметры лазера: скорость прыжка - скорость сканирования «неотмеченных» траекторий (в мм / с); расстояние - расстояние между двумя соседними векторами, сделанными последовательно (в мкм); мощность - процент максимальной мощности лазера (в%); скорость маркировки - скорость сканирования лазерного луча (в мм / с); расфокусировка - расстояние (0,1 или 1 мм в зависимости от системы) между планом спекания и планом фокусировки линзы (положительно, если план спекания выше плана фокусировки); задержка - минимальный период между двумя лазерными сканированиями в одной и той же точке (в мс); допуск - допуск на задержку (в мс).

### 2.3 Термическая обработка изделий, изготовленных по технологии селективного лазерного сплавления

Нержавеющая сталь 17-4 PH с дисперсионным упрочнением является материалом, сочетающим высокую прочность и хорошую коррозионную стойкость при температурах до 315 °С. В деформируемой форме эта сталь имеет полностью мартенситную структуру, которая может быть упрочнена выделением мелкодисперсной гранцентрированной кубической фазы с высоким содержанием меди при старении. При СЛС-процессе сталь 17-4 PH

демонстрирует дендритную структуру, содержащую около 50% остаточного аустенита вместе с кубическим объёмно-центрированным мартенситом и мелкими карбидами ниобия, выровненными вдоль междендритные границы. Применяемая в настоящее время, термическая обработка для снятия напряжений при последующей обработке СЛС-изделий стали 17-4 PH оказывает незначительное влияние на дендритную микроструктуру в исходном состоянии.

Известно, что при проведении рекомендованного режима гомогенизационной термообработки согласно «Спецификации аэрокосмических материалов 5355» для СВ7Cu-1, аналога литейного сплава 17-4 PH, дендритная структура затвердевания устраняется. Формируется микроструктура, содержащая около 90% мартенсита с 10% остаточного аустенита.

Для сравнения термического воздействия от применения газовых разрядов с жидкими электродами, необходимо изучить влияния стандартных режимов термической обработки на микроструктуру и фазовые изменения СЛС-образцов. Для этого образцы помещались в капсулы с аргоном. Были подобраны режимы термообработки соответствующие температуре и времени 650 °C и 1050 °C длительностью 1 час и 1150 °C - 2 часа. Данные режимы были взяты из официальных источников: технической спецификации EOS [103], термообработка АК Steel Corporation [104] и термообработка с гомогенизацией AMS 5355 [105]. После термического воздействия образцы закаливали в перемешиваемом солевом растворе без разрушения капсул для достижения скорости охлаждения, аналогичной охлаждению на воздухе.

Также процесс по отпуску образцов с тремя температурными режимами в атмосфере воздуха был проведен. Два образца по типу 1 были отобраны, режимы термообработки были такие температуры: 610°C, 900°C, 1150°C, время обработки равно двум часам, скорость при которой происходило повышение температуры равно 20 °C/мин. По окончании процесса обработки данные образцы остывали в печи. А на поверхности образцов, при 1150 °C,



появилась окалина (рисунок 2.8). Для термических испытаний использовалась муфельная профессиональная печь НТСТ 01/16 Р330.



а



б

Рисунок 2.8 – Образцы после термической обработки: а) образцы в муфельной печи, б) окалина, которая образовалась на поверхности образца.

Термическая обработка по режиму EOS вызывает небольшие изменения в микроструктуре затвердевания дендритов/ячеек. Контуры расплава, формируемые при лазерном сплавлении, все еще наблюдаются в материале. Как и в случае со структурой СЛС-стали наблюдается микросегрегация Nb и С в междендритные области. Термическая обработка для снятия напряжений

с EOS увеличивает твердость до 328 HV, это близко к твердости деформируемой стали, несмотря на наличие значительной доли кубического гранецентрированного аустенита. Такое увеличение твердости, возможно, связано с несколькими факторами, включая небольшое уменьшение остаточного аустенита (и увеличение ОЦК мартенсита) или выделение вторичных фаз, богатых медью, что наблюдается во время старения деформируемой стали при температуре выше 580 °С.

Для режима 1050 °С термической обработки по сравнению с термической обработкой для снятия напряжений микроструктура представляет собой преимущественно мартенситную структуру без следов лазерного расплавления. Доминирующей фазой в стали является мартенсит, при этом количество остаточного аустенита теперь снижено примерно до 15-20%. Микросегрегация все еще присутствует вдоль прежних направлений дендритов. Карбиды ниобия стали более крупными. Эти результаты показывают, что температура отжига и время выдержки недостаточны для растворения карбидных фаз и гомогенизации мелких изменений. Достигается твердость 320 HV, примерно равной твердости деформируемой стали, что можно объяснить преобладанием мартенсита в микроструктуре и снижением количества остаточного аустенита СЛС структурой стали.

Известно, что в литых сплавах происходит как макро-, так и микросегрегация, в зависимости от скорости затвердевания сплава, режима теплопроводности и размера отливки. Для аналога литого сплава стали 17-4 PH CB7Cu-1, AMS 5355 рекомендуется проводить гомогенизирующую термообработку при температуре 1150 °С в течение более 90 мин перед растворением при 1050 °С, чтобы уменьшить эту сегрегацию и добиться более однородной микроструктуры и химического состава. Сходство СЛС-структуры стали 17-4 PH с литым сплавом данная методика термообработки гомогенизацией может дать хороший результат. Преобладающим микроструктурным компонентом является мартенсит с уменьшенным до 10% количеством остаточного аустенита. полное устранение микросегрегации.

Также наблюдается наличие укрупненных карбидов вдоль границ дендритов. Несмотря на присутствие остаточного аустенита, материал имеет микроструктуру соответствующую для обычного деформируемого материала. Достигается твердость 292 Н. Дополнительная обработка при 1050 °С в течение 30 мин повысила твердость до 315 НV без изменения фазового состава. Данный вид обработки позволил создать однородную микроструктуру. 10% оставшегося остаточного аустенита, вероятно, вызвано азотом, захваченным в твердом растворе в результате процесса распыления порошка и среды.

В идеале гомогенизация после СЛС-построения должна выполняться при температуре выше 1250 °С, где карбиды NbC растворены, и в вакууме или в атмосфере с низким содержанием азота, чтобы удалить как можно больше азота из материала.

В температурном окне (от 1050 °С до 1250 °С) термообработка в низкотемпературном режиме может не дать однородной микроструктуры из-за более медленной кинетики диффузии, тогда как в высокотемпературном режиме укрупнение уже существующих карбидов может быть неизбежным. Следовательно, важно оптимизировать как температуру, так и время гомогенизационной термообработки СЛС-стали 17-4 PH для достижения полностью мартенситной структуры, состоящей из мелких карбидов Nb.

#### 2.4 Методы исследования механических, физико-химических характеристик поверхности изделий и разряда в электролите

Напряжение на электродах, формы напряжения и тока, величина разрядного тока, pH электролитического катода, температуры электродов, плотность тока на активном электроде – это главные рабочие параметры плазменно-электролитной системы (ПЭС).

Вольтметр и амперметр постоянного тока, термометр, зонд для измерения распределения потенциала в электролите, термопар а также зонд

для измерения распределения потенциала в плазме входят в комплекс для проведения контроля разряда в этой системе.

Для проведения исследований по измерению напряжения и тока были использованы два цифровые универсальные измерительные устройства ММН930 и АРА109N.

Автоматизированная система измерений состоит из модуля ввода МВ-А8 и универсальной измерительной установки АРРА305, которые были подключены к ПК. Принципиальная схема измерений представлена на рисунке 2.9. К модулю ввода подключается 3 первичных преобразователя для анализа и контролирования основных физических параметров плазменно-электролитной системы, а также их преобразования в электрические сигналы, которые будут оптимальны для дальнейшей обработки сигнала. Основными входными датчиками являлись следующие компоненты::

- 1) Преобразователи с выходным аналоговым сигналом,
- 2) Термопара на эффекте Зеебека ГОСТ Р 8.585-2001. В приборе предусмотрены средства для линеаризации показаний.

Период опроса сигналов с датчика установлен на уровне 0,3 с [106].

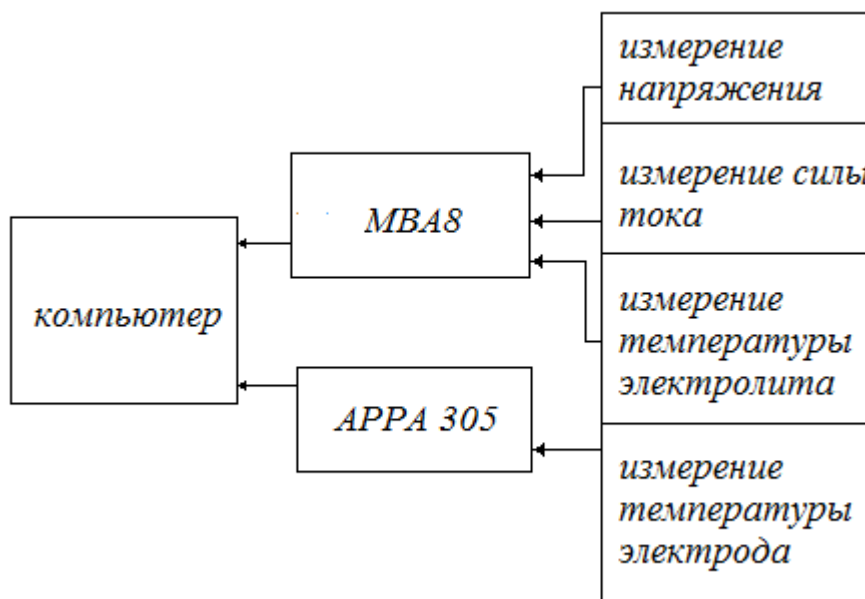


Рисунок 2.9 - Принципиальная схема измерений параметров ПЭС.

Информация с модуля ввода пересылалась на ПК и сохранялась. ПО программировалось на «Конф МВА-8».

pH измерялось с помощью pH-метра pH-410.

Формы тока и напряжения разряда были получены с помощью осциллографа FLUKE 105 SCOPERMETER SERIES II.

Взвешивание образца до (M) и после (m) обработки было использовано для определения средней линейной скорости  $\omega$  удаления металла:

$$\omega = \frac{\Delta m}{\rho \cdot S_a \cdot \Delta t} \quad (2.1)$$

где  $\Delta m = M - m$ ;  $S_a$  – площадь анода;  $\Delta t$  – время обработки;  $\rho$  – плотность нержавеющей стали 17-4 PH была равна 7800 кг/м<sup>3</sup>.

*Методика измерения распределения потенциала в электролите при условии горения плазменно-электролитного разряда.*

Основными характеристиками электростатического поля является потенциал  $\phi$  и напряженность поля  $\vec{E}$ , заданные в каждой его точке. Эти две характеристики однозначно связаны соотношением  $\vec{E} = -grad\phi$ , поэтому для описания поля достаточно знать одну из них.

Так как потенциал является скалярной величиной и легко измеряется экспериментально, а напряженность является векторной величиной, экспериментальное измерение которой связано с известными трудностями, обычно предпочитают характеризовать поле заданием значений потенциала в различных его точках.

Измерение потенциала производится методом зондов. В работе использовались вольфрамовые зонды диаметром 0.3 мм (Рис. 2.10). Изменяя потенциал зонда, можно добиться того, чтобы протекающий через него ток стал равен нулю. Потенциал зонда равен в этом случае потенциалу, который имелся в исследуемой точке до введения зонда.

Измерительные зонды не вызывают искажений лишь в том случае, если они располагаются вдоль линий напряженности поля, которые и до внесения зонда обладали одинаковым потенциалом. Удобно исследовать с помощью

зондов плоские поля, не зависящие от какой-нибудь координаты (например, оси  $Z$ ). Зонд, расположенный параллельно оси  $Z$ , в этом случае заведомо не искажает распределение электрического поля.

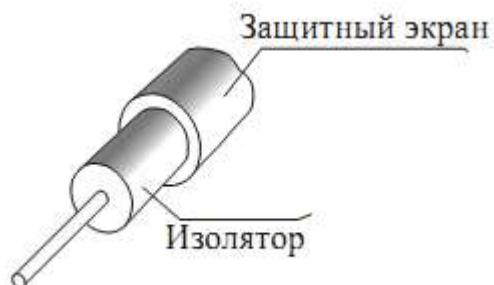


Рисунок 2.10 - Внешний вид вольфрамового зонда.

Небольшие искажения поля всегда происходят из-за того, что зонд не может быть сделан бесконечно тонким. Влияние толщины зонда зависит от соотношения между его диаметром и шириной области, на протяжении которой происходит существенное изменение потенциала электрического поля.

Условие обязательной однородности среды нарушается при протекании постоянного тока через электролит. В результате разложения электролита происходит поляризация электродов, связанная с выделением пузырьков водорода и кислорода и других продуктов электролиза в приэлектродных областях. Электролит становится неоднородным, что приводит к искажению поля.

В работе [107] показана возможность предотвращения искажения поля при условии питания электролитической ячейки переменным напряжением. Так же переменный ток легче усиливать, что дает возможность значительно увеличить чувствительность схемы.

Для достоверного измерения потенциала необходимо:

значение потенциала вблизи электродов необходимо измерять при постоянном токе (двухполупериодного выпрямления в нашем случае);

значение потенциала на расстоянии от электрода значительно большем линейных размеров электрода можно измерять при переменном токе.

Электроды, между которыми изучается поле, подключены к источнику, который состоит из диодного моста и лабораторного автотрансформатора регулировочного типа 1М с диапазоном напряжения от 1 до 250В, частотой 50Гц (Рис.2.11). Напряжение с источника тока подается на потенциометр R (внутреннее сопротивление 100 кОм). В цепь зондов подключается чувствительный гальванометр (в случае постоянного тока), или гальванометр, последовательно с которым подсоединен выпрямитель (переменный ток). Ток через гальванометр будет равен нулю в том случае, когда разность потенциалов между данной точкой поля, в которую помещен зонд, и одним из электродов равна разности потенциалов между электродом и движком потенциометра. Последняя фиксируется вольтметром V и может изменяться с помощью движка реостата.

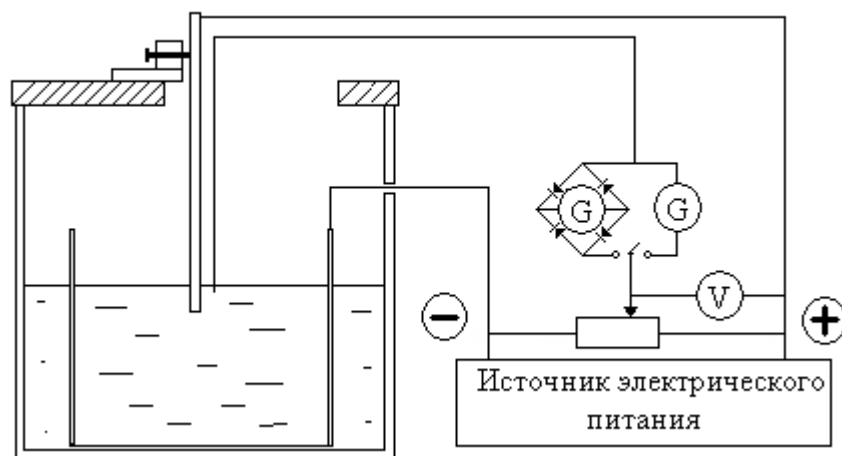


Рисунок 2.11 - Схема зондовых измерений разрядной системы.

### *Калориметрические измерения*

Для определения количества тепла, уходящего на нагрев электролитического катода, использовались: лабораторный ртутный термометр (ГОСТ 215-73 ТЛ-2), мерный лабораторный цилиндр емкостью 0.25 л, лабораторная колба емкостью 1 л, секундомер.

Измерения проводились во время горения разряда по следующей методике:

- 1) После зажигания разряда, электролит, циркулирующий через зону разряда, начинал нагреваться. Через 30 секунд температура перестает изменяться и наступает тепловое равновесие.
- 2) Через 40 секунд после зажигания разряда, начинались измерения. Сливной шланг направлялся в лабораторную колбу емкостью 1 литр для сбора воды. Стекающая вода омывала термометр, показывающий температуру воды в реальном времени. Время начала и окончания отбора воды фиксировалось секундомером. Точный объем собранной в колбе воды определялся мерным лабораторным цилиндром емкостью 0,25 л.
- 3) В рабочем журнале записывались значения напряжения и тока разряда и полученные при этих параметрах разряда показания термометра, секундомера и объем собранной воды. Для усреднения полученных значений калориметрические измерения для каждого значения мощности разряда повторялись десять раз.

Энергия электрического тока, вкладываемая в газовый разряд, рассчитывалась по формуле:

$$Q_э = U \cdot I \cdot t \text{ [Дж]}, \quad (2.2)$$

Где (U) – напряжение на электродах, (I) – ток разряда, (t) – время прохождения тока.

Количество тепла ушедшего на нагрев электролита, рассчитывалось по формуле:

$$Q_B = c_B \cdot m_B \cdot \Delta T \text{ [Дж]}, \quad (2.3)$$

Где  $c_B=4190$ (Дж/кг °С) – удельная теплоемкость воды,  $m_B$ (кг) – масса воды нагреваемой за минуту,  $\Delta T$ (°С) – температура нагрева электролита.

Доля энергии разряда расходуемой на нагрев электролита рассчитывались по формуле:

$$\eta = (Q_B / Q_э) \cdot 100\% \quad (2.4)$$



Обработка полученных результатов проводилась с учетом погрешности измерений.

Средние квадратичные отклонения  $S_n$  вычислялись по формуле

$$S_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n-1}} \quad (2.5)$$

Доверительный интервал определялся как

$$\Delta x = \frac{t_{\alpha,n} \cdot S_n}{\sqrt{n}} \quad (2.6)$$

где  $t_{\alpha,n}$  - коэффициент Стьюдента. В работе ограничились доверительной вероятностью  $\alpha=0,95$  и числом измерений  $n=10$  ( $t_{0,95,10}=2,3$  [108]).

В качестве верхней границы суммарной погрешности принималась величина  $\Sigma = \delta + 2y$ , где  $\delta$  – систематическая погрешность измерений,  $y = \lim_{n \rightarrow \infty} S_n$  - статистический предел среднеквадратичного отклонения. Если измеряемая величина  $Z$  является суммой двух величин –  $X$  и  $Y$ , которые измеряются независимо, то суммарная погрешность имеет вид [108]:

$$S_Z = (S_X^2 + S_Y^2)^{1/2} \quad (2.7)$$

#### *Физико-механические методы исследования характеристик поверхности изделий*

После плазменно-электролитной обработки, образцы исследовали с помощью металлографического оптического микроскопа МТІ Corporation Model EQ-MS-XJM213H-3M, позволяющий получать изображения непрозрачных объектов, а также производить микрофотосъёмку данных поверхностей. Съёмка проводилась в трёх точках образца. В качестве объективных параметров оценки изменений структуры измерялись высоты профиля поверхности. Обработка фотографий проводилась с помощью программы PXMeter v 1.0.

Образцы, отобранные с помощью оптического микроскопа для более детального анализа поверхности и значений высоты микропрофиля, были исследованы с помощью измерителя шероховатости TR200 и производилась

запись профиля. Полученные профилограммы, оцифровывались программой DataView и производились автоматическое вычисление основных параметров.

В ходе обработки вычислялось среднее арифметическое значение высоты профиля, дисперсия. В качестве оценочных величин вычислялись значение высоты неровностей профиля по десяти точкам  $R_z$  и среднее арифметическое отклонение профиля  $R_a$ . Величины  $R_z$ ,  $R_a$  выбраны из соображения прямой зависимости данных величин от размера микронеровностей. Данный метод измерения шероховатости был выбран с целью возможности визуальной оценки шероховатостей и получения представления о их форме.

После того как проведена запись профилограммы, производится ее автоматическая обработка и осуществляется расчет параметров шероховатости.

*Расчет параметра  $R_a$ :*

Исходя из параметров вертикального и горизонтального увеличения выбирается величина базовой длины  $l$ . На профилограмме отсчитывается участок равный базовой длине в масштабе горизонтального увеличения, установленного при записи профилограммы. Размер базовой длины вычисляется по формуле:  $L_n = l * (\text{горизонтальное увеличение})$ .

В пределах базовой длины профилограммы  $Z_n$  чертится (происходит вычисление значений) вспомогательная прямая линия, она должна быть параллельна «общему направлению профиля». Данная прямая разбивается на равные интервалы  $\Delta x$ : происходит сохранение значений координат начальных и конечных точек каждого интервала. По характеру профилограмм интервал обычно берется  $L_n/80$ . Затем происходит сохранение ординат профиля  $h_i$  в точках, соответствующих началу каждого интервала.

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |h_i| \quad (2.8)$$

*Расчет параметра  $R_z$ :*

$$R_z = \frac{\sum_{i=1}^5 |y_{pi}| + \sum_{i=1}^5 |y_{vi}|}{5} \quad (2.9)$$

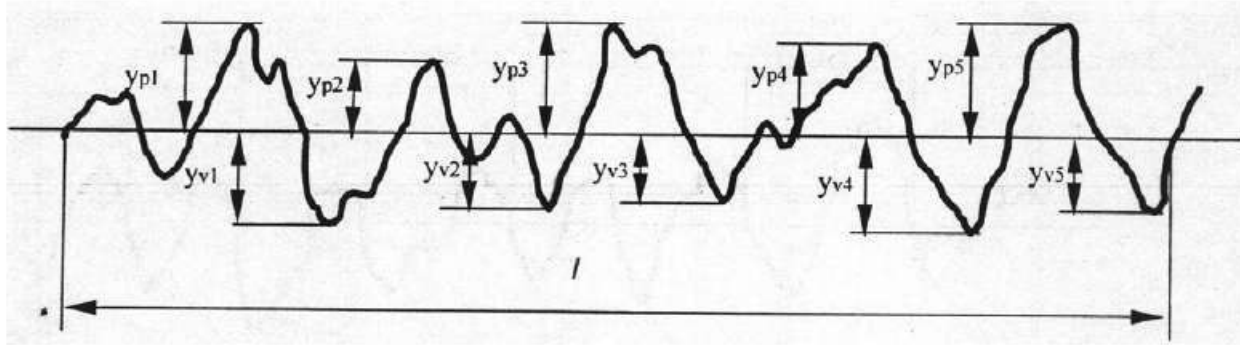


Рисунок 2.12 - Параметры профиля поверхности

$R_Y$  (ISO) наибольшая высота профиля

$R_Y$  – сумма высоты  $R_p$  наибольшего выступа профиля относительно средней линии и глубины  $R_v$  наибольшей впадины профиля относительно средней линии в пределах длины оценки.

$S_i$  – средний шаг неровностей профиля.  $S_m$  – средний шаг точек пересечения выступов со средней линией в пределах длины оценки.

$$S_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i \quad (2.10)$$

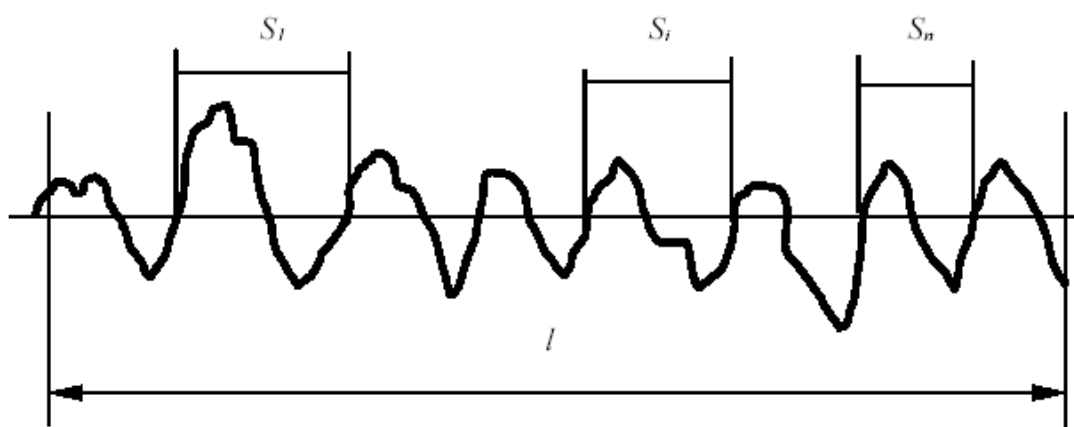


Рисунок 2.13 - Параметры профиля поверхности.

$S$  - средний шаг местных выступов профиля

$S$  – средний шаг по соседним вершинам выступов профиля в пределах длины оценки.

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i \quad (2.11)$$

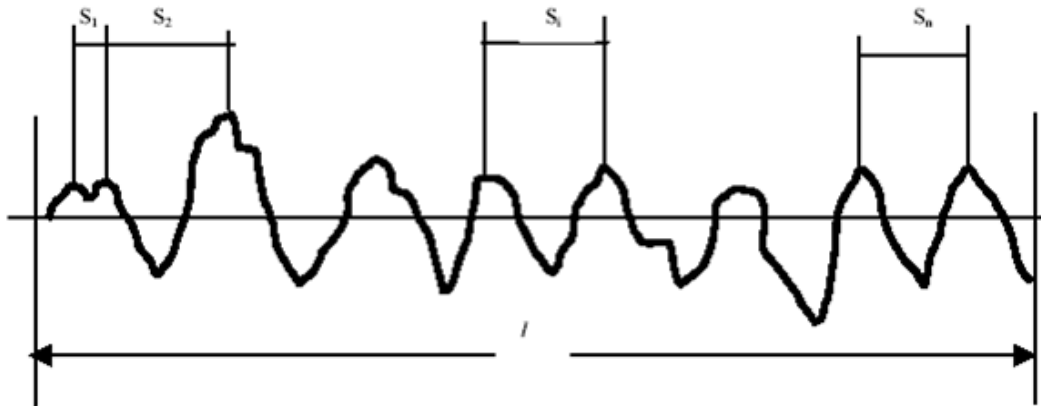


Рисунок 2.14 - Параметры профиля поверхности.

Погрешность измерений TR200 меньше или равна  $\pm 10\%$ .

После проведения процесса селективного лазерного сплавления, а также после окончания финишной обработки нами был проведен процесс пробоподготовки образцов. На рисунке 2.15 представлены образцы которые были отшлифованы с помощью алмазной шайбы, а после были использованы алмазные пасты шести видов с зернистостью 2 - 20 мкм.



Рисунок 2.15 – Образцы после процесса полировки.

Для определения микроструктуры поверхности образцов было проведено химическое травление (Рисунок 2.16) в специальном растворе Swede ( $50 \text{ ml H}_2\text{O} + 5 \text{ ml HCl} + 5 \text{ ml HNO}_3 + 6 \text{g FeCl}_3$ ) [109].

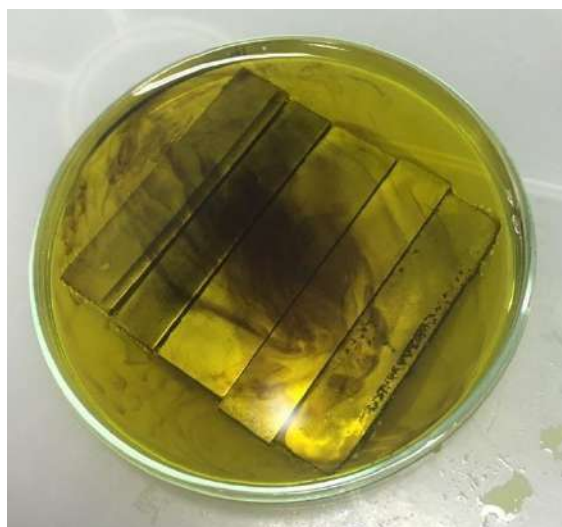


Рисунок 2.16 –Процесс травление образцов

Оптический цифровой микроскоп, нанопрофилометр и сканирующий электронный микроскоп были использованы для изучения морфологии поверхностей.

*Металлографический оптический микроскоп MTI Corporation Model EQ-MS-XJM213H-3M*

Увеличение микроскопа равно от 40х до 500х. Объективы планохроматы: 5×/0.12, 10×/0.25BD, 20×/0.40BD, 40×/0.65, 50×/0.75, 100×/0.90, 100×/1.25 OIL. Возможно применение широкоугольных окуляров - 10×/18мм; 12.5×/15мм. Источником света является галогенная лампа с мощностью 20 Вт. Изображение выводится с камеры на монитор ПК.

*Стилусный нанопрофилометр Bruker Dektok XT*

Данная система позволяет достигать точности измерений по высоте до 0,3 нм, а в основном диапазон измерения по высоте равен 1 мм. Также имеется возможность трехмерного сканирования поверхности.

*Сканирующий электронный микроскоп “EVO 50 XVP” (Carl Zeiss)*

Детекторы, которые применяются для получения изображения:

- 1) SE-детектор использующий вторичные электроны;
- 2) QBSD-детектор на использующий обратно-рассеянные электроны.

*Рентгеновская система PKT Vtome XS 240*

Система предназначена для создания трехмерных компьютерных моделей на основе двумерных результатов РКТ.

- Образец: диаметр – до 230 мм, высота – до 420 мм, вес – до 10 кг
- Разрешение сканирования - от 3 до 150 мкм<sup>3</sup> (зависит от размера образцов)

Оборудование для изучения фазового состава образцов

*Дифрактометр BRUKER D8 Advance*

Bruker D8 ADVANCE дает возможность проводить исследования металлических материалов в различных условиях. Также специальные загрузчики образцов позволяют автоматизировать процесс измерения.

Оборудование для исследования механических характеристик

*Испытательная машина растяжения - модель УТС 110М-100.*

Данная машина предназначена проведения механических исследований образцов различных конструкционных материалов, а также изделий на растяжение, сжатие, изгиб, осадку, сплющивание, остаточную деформацию, отслаивание, расслоение, скалывание, раздирание и др.

Контроль размеров получаемой пресс-формы

Проведение сравнение оптически оцифрованного изделия, полученного селективным лазерным сплавлением и самой электронной трехмерной моделью с помощью оптической системы 3D-сканер ATOS III.

Система ATOS состоит из сенсора с двумя камерами, модулем проектора, контроллером, блоком питания, компьютера и стойки для крепежа ATOS сенсора.

Технология сканирования ..... оптическая, метод Blue Light

Передача цвета ..... нет

Зона сканирования ..... 170 мм x 130 мм; 810 мм x 610 мм

Кол-во камер ..... 2 шт

Разрешение камер ..... 12 мп

Точность сканирования ..... 0,02-0,16 мм

Скорость сбора данных ..... до 12 000 000 точек/сек

Рабочее расстояние ..... 440 – 800 мм

Программное обеспечение ..... Atos Professional

Выходные форматы файлов: CATIA V4, CATIA V5, PRO/E, NX Unigraphics, IGES, STEP, JT-Open, Parasolid, ASCII, CSV, FTA

На рисунке 2.17 представлено сопоставление оптически отсканированной модели и исходной трехмерной модели. Красный цвет поверхность оптически оцифрованной крыльчатки имеет выступ

относительно поверхности электронной модели. Синий цвет – поверхность оптически оцифрованного изделия имеет впадину относительно поверхности исходной электронной модели.

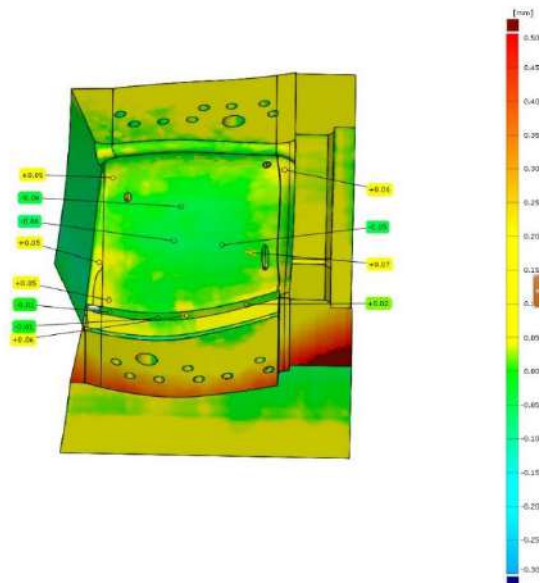


Рисунок 2.17 - Сопоставление цифровой модели и оптически оцифрованной модели.

### Измерение микротвердости

Микротвердомер ПМТ-3 представляет собой микроскоп, предназначенный для измерения микротвердости металлов, стекла, абразивов, керамики, минералов и других материалов.

Увеличение микроскопа равно 130 и 487<sup>x</sup>

Алмазная пирамида:

угол при вершине..... 136°

острие при вершине..... не более 1 мк

пределы нагрузки..... 2-200 г

Пределы измерения диагоналей отпечатков равны 0,05 – 0,25 мм

Предметный столик: пределы угла поворота.....~0 – 180°

пределы продольного перемещения ..... 0 – 10 мм

пределы поперечного перемещения ..... 0 – 10 мм

цена деления шкалы микрометрической подачи - 0,01 мм

Действующее относительное отверстие коллектора осветителя - 1 : 0,7

Питание – через трансформатор от сети переменного тока 127/220 В.



### ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАЗМЕННО-ЭЛЕКТРОЛИТНОГО РАЗРЯДА В ПРОЦЕССАХ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

В данной главе представлены результаты экспериментальных исследований плазменно-электролитного процесса, а именно газовых разрядов с жидкими электродами на водной основе. Описано влияние параметров жидкого электрода (температура, кислотность, концентрация) на процесс инициирования горения разряда. Представлены исследования влияния анодного и катодного режимов плазменно-электролитной обработки на микроструктуру образцов, полученных методом селективного лазерного сплавления, а также проведен их сравнительный анализ. Проведено моделирование процесса воздействия газовых разрядов с жидкими электродами на поверхность металлического электрода. Предложены режимы плазменно-электролитной обработки изделий, полученных селективным лазерным сплавлением, для повышения их эксплуатационных характеристик.

#### 3.1 Электрические и энергетические характеристики плазменно-электролитного разряда

При плазменно-электролитном процессе происходит совмещение различных физико-химических явлений: горение газовых разрядов, ионизация и образование низкотемпературной неравновесной плазмы, электрохимические реакции, преобразование электрической энергии в механическую за счет гидроударов. Данный процесс характеризуется величиной тока, протекающего через электродную систему, напряжением на электродах, относительным соотношением плотностей тока, приходящихся на горение разряда и электрохимические процессы, формой тока и напряжения, акустическими колебаниями, видом электролита и знаком приложенного к нему потенциала.

Плазменно-электролитный процесс следует рассматривать в четырех основных разновидностях:

- при использовании жидкого электролитического катода;
- при использовании жидкого электролитического анода;
- приложенное напряжение имеет сглаженную форму;
- приложенное напряжение имеет пульсирующую форму.

Наличие четырех вариантов связано с тем, что при прохождении через электроды пульсирующего тока, получаемого после двухполупериодного выпрямления, наблюдается кардинально иная картина в отличие от использования сглаженной формы, получаемой при использовании емкостного фильтра. Связано это с тем, что подключение емкостного фильтра к источнику питания позволяет разделить во времени влияние основных физических явлений на обрабатываемую поверхность. Выставляя определенное значение напряжения проводить либо только электрохимические реакции, либо горение газового разряда в паровоздушной оболочке.

Исследования осциллограмм напряжения и тока плазменно-электролитного процесса необходимы для изучения влияния на процесс пульсирующей формы напряжения, когда воздействие производится с частотой 100 Гц. При высоких напряжениях в одном периоде длительностью 10 мс происходит совмещение электрохимических реакций и горение газовых разрядов.

На рисунке 3.1 представлена серия осциллограмм тока и напряжения для жидкого электролитического катода и анода. Для осциллограммы случая с электролитическим анодом (рисунок 3.1а) одна клетка соответствует по времени 5 мс, по напряжению 100 В, по току 10 А. Для случая электролитического катода одна клетка соответствует по времени 5 мс., по напряжению 100 В, по току 5 А. При рассмотрении осциллограмм для электролитического анода в рамках импульсов наблюдаются отдельные всплески значений тока и напряжения, время протекания разряда составляет ~ 1 мс. Для случаев, когда активным электродом является металлический катод

осциллограммы с использованием различных электролитов, имели схожую картину с рисунком 3.1 а.

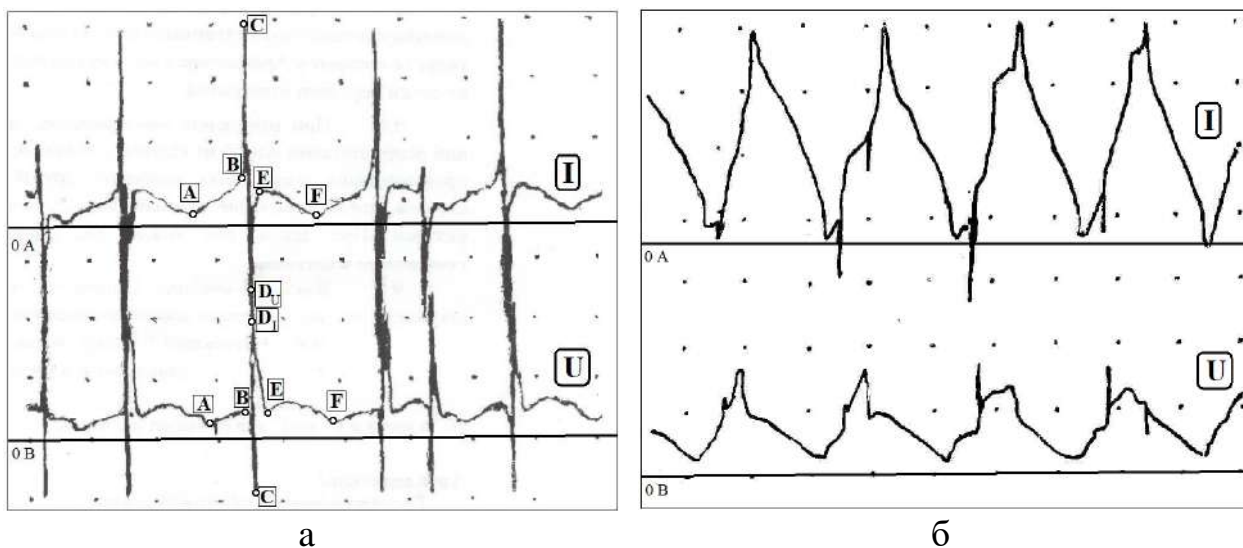


Рисунок 3.1 - Осциллограммы плазменно-электролитного процесса 5%  $H_2SO_4$  с графитовым электродом: а) электролитический анод, б) электролитический катод

Характер импульсов при горении разряда на металлическом катоде весьма своеобразен. Кривую импульса тока и напряжения можно разбить на пять участков: А-В, В-С, С-Д, Д-Е, Е-Ф (рис. 3.1а). На участках кривой А-В и Е-Ф протекают только электрохимические процессы. В точке «В» происходит интенсивный рост силы тока и падение напряжения, наблюдается горение дугового разряда. В точке «С» этот процесс заканчивается и одновременно начинается формирование и рост газового пузыря, вызванного гидродинамическим воздействием плазмы разряда на жидкость. Участок С-Д соответствует процессу роста данного газового пузыря, при этом наблюдается резкое увеличение напряжения и уменьшение силы тока. В точке «Д» прекращается рост газового пузыря или его отрыв от поверхности металлического электрода. После точки «Д» наблюдается возврат напряжения и тока к значениям задаваемым источником питания, которые соответствуют точки «Е», происходит контакт электролита с электродом. Эрозионное разрушение металлического катода происходит на участке В-С. Описанный

выше импульс повторяется с частотой 100 Гц. На участках D-E и E-F реализуется процесс быстрого локального охлаждения места горения микродугового разряда. Процесс похож на комбинацию электроэрозионного и электрохимического способов обработки, отличие заключается в том, что у плазменно-электролитной обработки одним из электродов является жидкость и газовый разряд горит между твердым катодом и жидким анодом.

Рассмотрим осциллограммы тока и напряжения для случая с электролитическим катодом, представленные на рисунке 3.1б. Известно, что горение разрядов при использовании электролитических катодов - растворов кислоты наблюдается при напряжениях, превышающих значения для растворов солей и оснований, но при этом наибольшая проводимость именно у растворов кислот. Это связано с тем, что важную роль поддержания горения разряда играет  $\text{OH}^-$ . Поэтому на данной осциллограмме высокие значения силы тока и напряжения. Также наблюдаются локальные пики напряжения и тока, но в сравнении со случаем металлического катода они намного меньше по амплитуде.

Так как важную роль при горении разрядов играет природа катода также были получены серии осциллограмм плазменно-электролитного процесса для различных электролитических катодов, представленные на рисунке 3.2. Установлено, что осциллограммы напряжения и тока для различных жидких катодов отличаются. Но во всех них прослеживается общая тенденция по пикам, характеризующим инициирование разрядов. Наблюдается противоположная картина, первоначально происходит образование и рост газовых пузырьков, а затем уже их пробой. По интенсивности силы тока и напряжения — это больше похоже на тлеющий разряд.

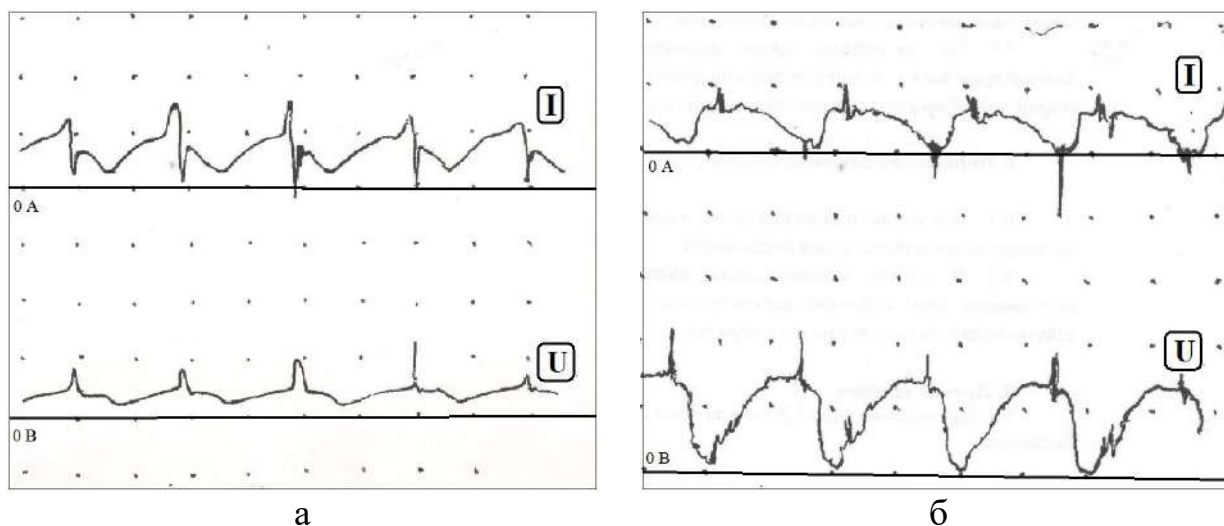


Рисунок 3.2 - Осциллограммы плазменно-электролитного процесса: а) раствор 5% NaOH; б) раствор 5% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Для описания и оценки электрических параметров плазменно-электролитного процесса рассмотрим вольтамперные характеристики катодного и анодного режимов с использованием различных водных растворов электролитов. Для выявления закономерностей влияния свойств электролитов использовали три вида растворов: кислый – водный раствор кислоты H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, нейтральный – водный раствор Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, щелочной – водный раствор NaOH. Также для изучения влияния концентрации раствора использовались 1%, 3%, 5% растворы.

На рисунке 3.3 представлены вольтамперные характеристики плазменно-электролитного процесса при использовании электролитического катода на основе водного раствора H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> с использованием сглаживающего емкостного фильтра (рис. 3.3 а) и без него (рис. 3.3б). На всех вольтамперных характеристиках можно условно выделить три области, соответствующие протеканию различных физико-химических процессов. Первая область (начальная) соответствует протеканию только электрохимических реакций. Вторая (промежуточная) – это переходная область, ее начало определяется изменением угла наклона кривой ВАХ, это связано либо с образованием паровоздушной оболочки для случаев использования сглаживающего

емкостного фильтра, либо с интенсивным газо- и паровыделением вблизи вблизи поверхности металлического электрода. Третья область – это устойчивое горение газовых разрядов.

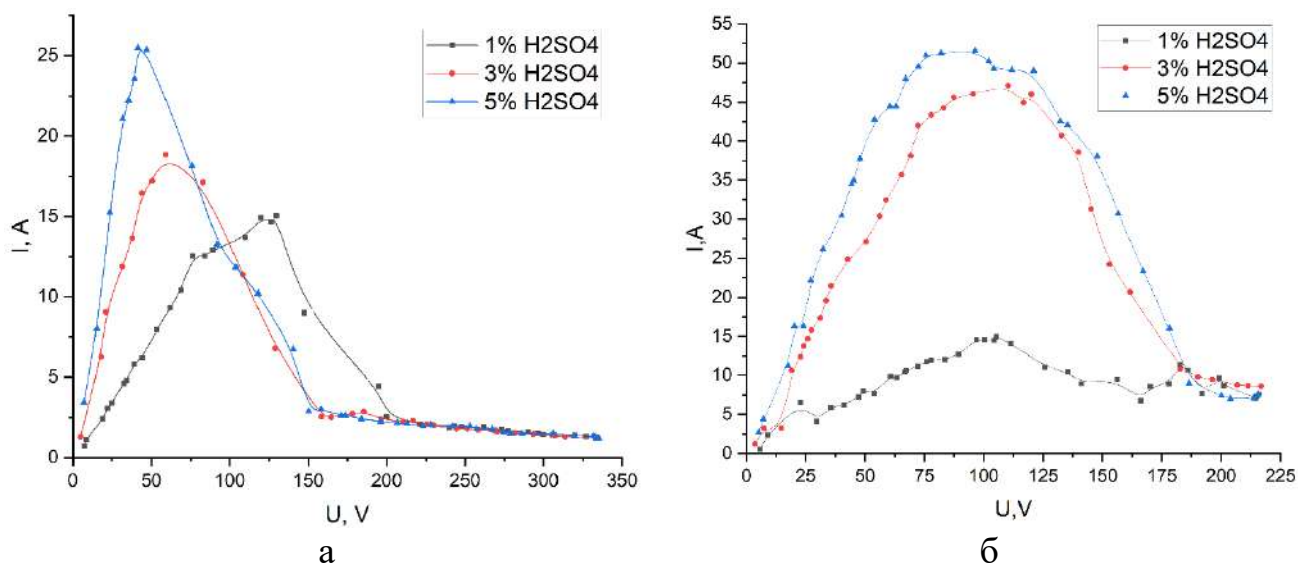


Рисунок 3.3 - ВАХ плазменно-электролитного процесса с электролитическим катодом для – 1%, 3% и 5% водных растворов кислоты H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>: а) использованием сглаживающего емкостного фильтра, б) без сглаживающего емкостного фильтра

Рассмотрим серию кривых ВАХ (рис. 3.3а) плазменно-электролитной обработки при использовании сглаженной формы напряжения. Начальная область кривой ВАХ, в которой происходит протекание электрохимических процессов изменяется в зависимости от концентрации электролита. Для 1% раствора конец первой области при значении  $U = 135$  В, для 3% при 60 В и токе 18,73 А, для 5% при 50 В и 25 А. Также меняется поведение зависимости тока от напряжения, для 5% значения силы тока меняются по линейной зависимости  $I \sim 0.46 \times U$ , для 3% -  $I \sim 0.29 \times U$ , для 1% раствора начальная область кривой ВАХ состоит из двух прямых  $I \sim 0.17 \times U$  и  $I \sim 0.04 \times U + 9.375$  с точкой перегиба при  $U = 75$  В,  $I = 12,5$  А. Наличие данной точки связано с тем, что при концентрации раствора в 1% количество выделяемого тепла намного меньше по сравнению с концентрациями 3 и 5%. Для данной точки кривой ВАХ происходит кипение электролита вблизи поверхности электрода, это

приводит к уменьшению площади контакта жидкости с поверхностью электрода. Сила тока зависит от напряжения и площади контакта электролита с металлическим электродом. Повышая напряжение увеличиваем количество ионов, участвующих в электрохимических реакциях, тем самым реализуя рост силы тока. Однако, увеличение силы тока приводит к нагреву металлического электрода, нагреву и кипению электролита, тем самым увеличению количества пузырьков, экранирующих поверхность. А это в свою очередь уменьшает площадь контакта. Таким образом, имеются два процесса отвечающие за силу тока, которые работают противоположно друг другу: перенос ионов и газо-, парообразование. Наличие точки перегиба показывает нам, что чрезмерное кипение электролита вблизи поверхности металлического анода не позволяет обеспечивать изначальную динамику роста силы тока за счет поднятия величины прикладываемого напряжения. Вторая область характеризуется резким падением силы тока, обусловленное образованием паровоздушной оболочки в результате пленочного кипения электролита. Концы переходных областей ВАХ для концентраций растворов 3 и 5 % одинаковые и соответствуют  $U = 160 \text{ В}$ ,  $I = 2,5 \text{ А}$ . Также для всех концентраций растворов одинаковым является угол наклона кривой ВАХ в данной области. Это обусловлено одинаковой скоростью роста паровоздушной оболочки и экранированием металлического анода. Смещение переходной области ВАХ для концентрации раствора 1% в область больших напряжений связано с описанной выше ситуацией недостаточного нагрева металлического анода в следствие малой силы тока. Третья область ВАХ – горение газового разряда в паровоздушной оболочке, одинаковая для всех трех концентраций. Это объясняется тем, что в электрической цепи лимитирующим участком по проводимости является паровоздушная оболочка, параметры которой одинаковы для всех трех концентраций, используемых в экспериментах. В данной области увеличение напряжения приводит к планомерному уменьшению силы тока. Так при  $U = 160 \text{ В}$ ,  $I = 2,5 \text{ А}$ , а для  $U = 336 \text{ В}$ ,  $I = 1,1 \text{ А}$ . При этом интенсивность излучения с увеличением напряжения растет.

Падение силы тока может быть связано с ростом толщины паровоздушной оболочки и увеличением ее электросопротивления.

Вольтамперные характеристики для случаев с пульсирующей формой напряжения можно также разделить на три участка. В зависимости от концентрации первая область изменяет свои границы, так для 1% раствора она находится в диапазоне напряжений от 0 до 110 В, для 3% раствора в диапазоне от 0 до 90 В, для 5% раствора от 0 до 75 В. В этой области протекают электрохимические реакции и наблюдается рост силы тока с ростом прикладываемого напряжения. Увеличение концентрации раствора приводит к увеличению угла наклона кривой ВАХ относительно оси абсцисс. Для 1 % -  $I \sim 0.67 \times U$ , для 3%  $I \sim 0.51 \times U$ , для 5%  $I \sim 0.125 \times U$ . Вторая переходная область характеризуется постепенным уменьшением силы тока. В данной области наблюдаются интенсивные гидродинамические возмущения, обусловленные пульсирующей формой напряжения. Но постепенный нагрев электрода и приграничного слоя электролита приводит к все большему экранированию металлического электрода. Конец переходной области для концентраций 1, 3 и 5% соответствует одной точке кривой ВАХ – 185 В. Третья область имеет пологую форму, наблюдаем незначительное уменьшение силы тока с ростом напряжения. Для 1 % раствора звуковые колебания наблюдаются при 105 В, свечения разряда не происходило. Для 3 % раствора – звуковые колебания при  $U = 47$  В, свечение разряда фиолетового цвета при  $U = 90$  В. Для 5 % - звуковые колебания при  $U = 20$  В, свечение -  $U = 67$  В.

Схожая картина наблюдается для вольтамперных характеристик 1,3 и 5% водного раствора  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , представленных на рисунке 3.4. При использовании сглаживающего емкостного фильтра наблюдаются более низкие значения силы тока ВАХ (рис. 3.4 а) по сравнению с данными кривой ВАХ для пульсирующей формы напряжения (рис. 3.4 б).



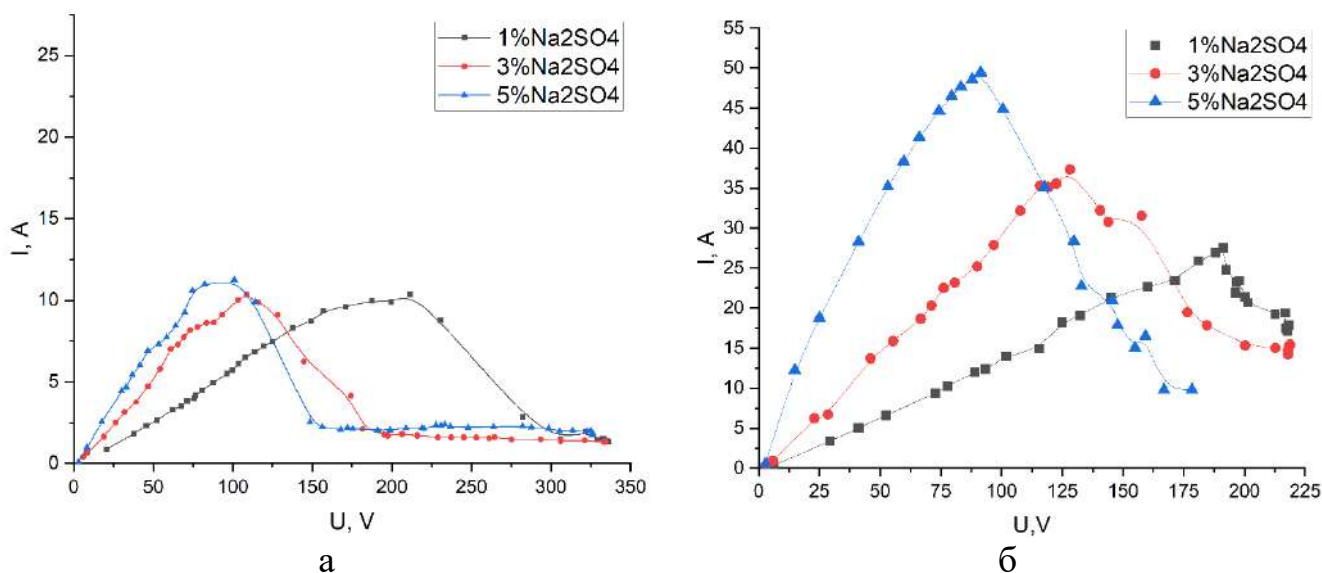


Рисунок 3.4 - ВАХ плазменно-электролитного процесса с электролитическим катодом для – 1%, 3% и 5% водных растворов соли  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ : а) использованием сглаживающего емкостного фильтра, б) без сглаживающего емкостного фильтра

При рассмотрении кривых ВАХ для сглаженной формы напряжения их также можно условно разделить на три участка: протекание электрохимических реакций, образование и рост паровоздушной оболочки – переходная область, горение газового разряда в паровоздушной оболочке. Первая область соответствует протеканию электрохимических реакций и находится в диапазоне напряжений от 0 до 215 В для раствора с концентрацией 1%, от 0 до 110 В для раствора с концентрацией 3% от 0 до 78 В для раствора с концентрацией 5%. В данной области зависимость тока от напряжения  $I \sim 0,13 \cdot U$  для 1% раствора,  $I \sim 0,1 \cdot U$  для 3% раствора и  $I \sim 0,04 \cdot U$  для 5% раствора. Вторая область соответствует напряжениям от 215 до 290 В для раствора с концентрацией 1%, от 110 до 185 В для 3% и от 78 до 150 В для 5%. При этом следует отметить, что угол наклона кривой ВАХ для всех трех концентраций одинаковый. Это, как говорилось выше, объясняется одинаковыми параметрами процесса образования и роста паровоздушной оболочки. Границы третьей области также меняются с изменением концентрации раствора, так для концентрации 1% она начинается при 290 В,

для 3% при 185 В и для 5% при 150В. Для всех трех концентраций растворов с увеличением величины прикладываемого напряжения мы наблюдаем постепенное уменьшение силы тока. Также можно отметить, что значения силы тока при горении разряда в паровоздушной оболочке для всех концентрациях совпадают.

Рассмотрим вольтамперные характеристики для пульсирующего режима, представленные на рисунке 3.4б. Данные кривые можно условно разделить на два участка, первый, на котором происходит увеличение силы тока, и второй, где увеличение напряжения приводит к падению силы тока. С увеличением концентрации раствора граница первой области смещается в область меньших напряжений, так для концентрации 1% - от 0 до 187 В, для 3% - от 0 до 125 В, для 5% - от 0 до 88 В. Это объясняется более интенсивным нагревом электрода и началом процесса интенсивного газо- и парообразования при более низких напряжениях, но более высоких плотностях тока. При этом значения силы тока увеличиваются, что связано с ростом количества носителей заряда и проводимости раствора  $U = 187 \text{ В } I = 28 \text{ А}$ ,  $U = 125 \text{ В } I = 37 \text{ А}$ ,  $U = 88 \text{ В } I = 49 \text{ А}$ . Вторая область ВАХ соответствует преобладанию процессов горения разрядов в паровоздушной оболочке. Столь высокие значения силы тока для пульсирующей формы напряжения по сравнению со сглаженной формой объясняются цикличностью процесса и сочетанием в одном импульсе как электрохимических реакций, так и парообразования с горением разрядов. Для 1 % раствора звуковые колебания наблюдаются при 115 В, свечения разряда не происходило. Для 3 % раствора – звуковые колебания при  $U = 80 \text{ В}$ , свечение разряда фиолетового цвета при  $U = 170 \text{ В}$ . Для 5 % - звуковые колебания при  $U = 30 \text{ В}$ , свечение -  $U = 75 \text{ В}$ . Сравнение ВАХ для пульсирующей и сглаженной форм напряжения показывает, что значения напряжения начала перехода в область горения разряда в паровоздушной оболочке совпадают со значениями напряжения для точек максимума ВАХ пульсирующей формы.

На рисунке 3.5 представлены вольтамперные характеристики плазменно-электролитного процесса для раствора NaOH. На данных зависимостях так же прослеживаются три области. При использовании сглаживающего емкостного фильтра (рис. 3.5а), повышение концентрации раствора приводит к уменьшению области протекания классического электролиза, а именно для 1% раствора она находится в диапазоне напряжений от 0 до 145 В, для 3% - от 0 до 63 В, для 5% - от 0 до 50 В. Вторая переходная область, обусловленная образованием и ростом парогазовой оболочки, для 1% раствора находится в диапазоне  $U$  от 145 до 220 В, для 3% и 5% -  $U$  от 65 до 140 В. Третья область – горение газового разряда в паровоздушной оболочке для всех трех концентраций электролита по значениям силы тока совпадают, отличие только в значениях напряжения для начала горения разряда в паровоздушной оболочке: 1% - 220 В, 3 и 5% - 140 В.

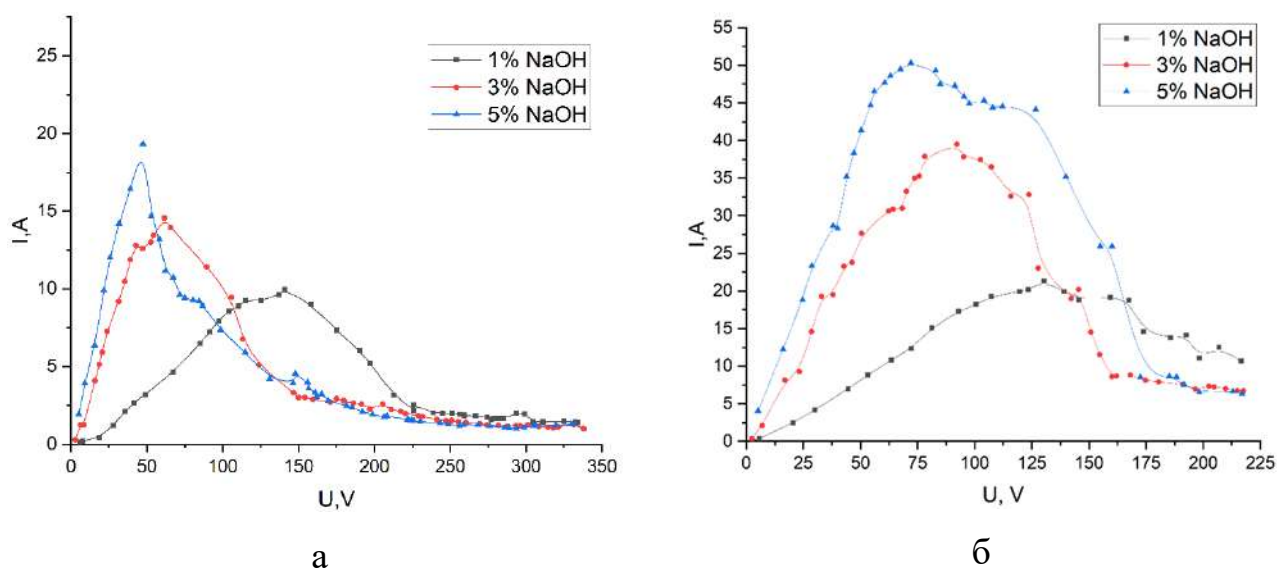


Рисунок 3.5 - ВАХ плазменно-электролитного процесса с электролитическим катодом для – 1%, 3% и 5% водных растворов NaOH: а) использованием сглаживающего емкостного фильтра, б) без сглаживающего емкостного фильтра

В случае пульсирующего режима форма ВАХ существенно изменяется, но сохраняется наличие также трех областей. Пульсирующая форма приводит к смещению вольтамперных характеристик в область больших значений напряжения. Это объясняется изменением напряжения в каждом импульсе от нуля вольт до установленного значения и возвращением в нулевое значение. Таким образом, наличие данного падения напряжения до 0 В приводит к циклическому охлаждению электрода по сравнению с ситуацией, когда мы используем сглаженную форму. Это явление в свою очередь смещает переходную область, в которой происходит интенсивное газо- и парообразование, к большим значениям напряжения и тока. Также сама форма пика ВАХ становится более пологой по сравнению с острым максимумом при использовании сглаженной формы напряжения. В итоге область протекания электрохимических процессов для концентрации раствора 1% соответствует напряжениям от 0 до 130 В, для 3% - от 0 до 86 В и для 5% от 0 до 60 В. Переходная область, в которой наблюдаются интенсивные гидродинамические возмущения и происходит постепенное увеличение площади покрытия металлического электрода газовыми разрядами, заканчивается при  $U = 215$  В для 1% раствора,  $U = 175$  В для 3% раствора и  $U = 160$  В для 5% раствора. В третьей области в следствии нагрева металлического электрода интенсивность гидродинамических колебаний минимальна.

Рассмотрим на рисунках 3.6, 3.7 и 3.8 вольтамперные характеристики плазменно-электролитной обработки для случаев, когда анод является жидким электродом.

Детальное изучение вольтамперных характеристик для растворов серной кислоты при использовании сглаженной формы напряжения показывает наличие двух максимумов. Начало кривой ВАХ характеризуется ростом силы тока с увеличением напряжения, что связано с протеканием электрохимических реакций. Постепенное увеличение газо- и парообразования вокруг металлического катода приводит к уменьшению угла

наклона кривой ВАХ. С достижением максимального значения силы тока кривая идет на спад. Данное поведение можно объяснить интенсивным нагревом катода и уменьшением площади контакта поверхности металла с электролитом. В диапазоне напряжений от 100 до 125 В наблюдается наличие минимума. Дальнейшее увеличение силы тока обусловлено горением дуговых разрядов, возможность реализации данного процесса связана с интенсивным нагревом металлического катода и возможностью явления термоэмиссии. После увеличения силы тока наблюдается характерная кривая ВАХ для дугового разряда, при которой чем выше ток, тем меньшее напряжение разряда. Горение дуговых разрядов приводит к расплавлению металлического катода и прекращению процесса.

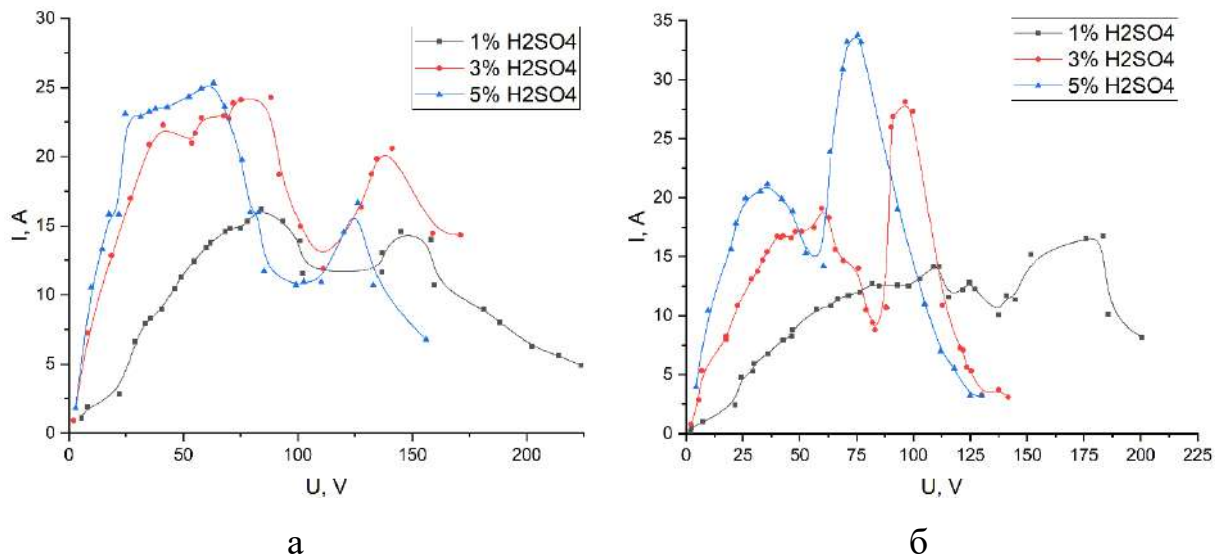


Рисунок 3.6 - ВАХ плазменно-электролитного процесса для электролитического анода 1%, 3% и 5% водных растворов  $H_2SO_4$ : а) использованием сглаживающего емкостного фильтра, б) без сглаживающего емкостного фильтра

При использовании пульсирующей формы напряжения в целом форма ВАХ сохраняется, также можно выделить два максимума, которые с повышением концентрации смещаются в область меньших напряжений, что связано с изменением проводимости раствора электролита. Интерес

представляет сравнение поведения кривых ВАХ пульсирующей и сглаженной форм напряжения для раствора электролита с концентрацией 1%. Так использование пульсирующей формы напряжения приводит к сглаживанию первого пика, смещению второго пика в область больших напряжений и делает кривую ВАХ более полой. Такое поведение кривой ВАХ связано с менее интенсивным нагревом металлического катода по сравнению со случаем использования сглаженной формы напряжения.

Из всех растворов электролитов наименьшие значения силы тока наблюдаются для раствора сульфата натрия, ВАХ которых представлены на рисунке 3.7. Это объясняется наименьшей проводимостью из всех трех видов используемых в экспериментах электролитов. Для натриевой соли серной кислоты кривая ВАХ пульсирующей формы напряжения при концентрации 5% (рис. 3.7б) и концентраций 1%, 3%, 5% сглаженной формы имеют один максимум (рис. 3.7а). А для концентраций 1% и 3% пульсирующей формы напряжения наблюдается наличие двух максимумов. Наличие первого максимума объясняется тем, что при любых условиях в начале протекают электрохимические реакции, при которых увеличение напряжения приводит к увеличению силы тока. Наличие второго максимума объясняется идентично случаю использования водного раствора серной кислоты, описанному выше. Причиной наличия только одного максимума является недостаточный нагрев металлического электрода, не позволяющего при более низких напряжениях реализовать интенсивный процесс газо- и паровыделения. Это в свою очередь позволяет реализовать процесс разогрева и горения разрядов только при напряжениях выше 125 В.

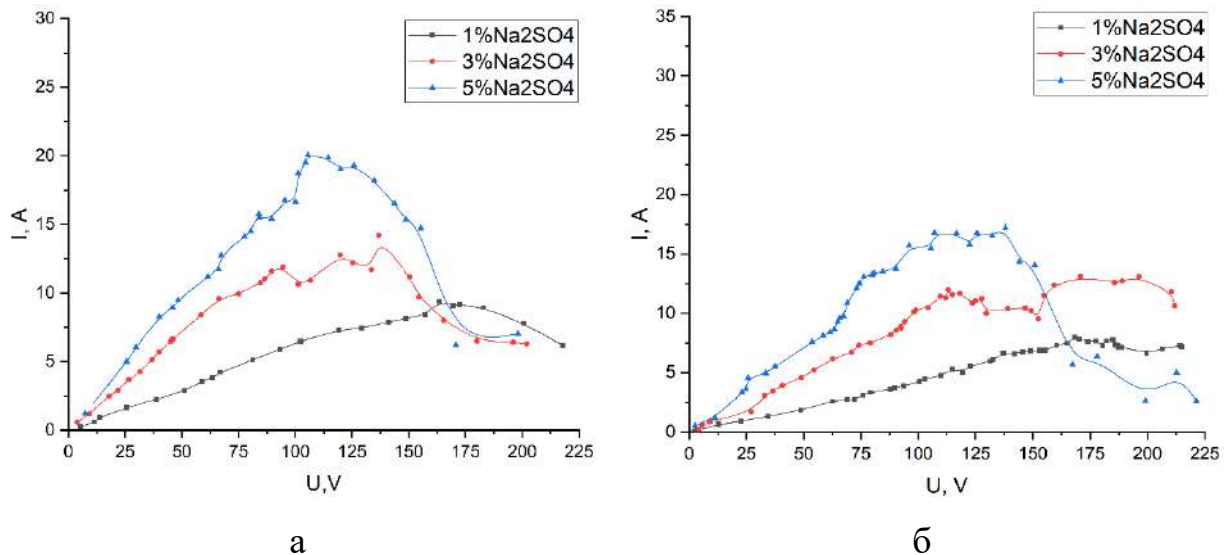


Рисунок 3.7 - ВАХ плазменно-электролитного процесса для электролитического анода 1%, 3% и 5% водных растворов  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ : а) использованием сглаживающего емкостного фильтра, б) без сглаживающего емкостного фильтра

При изучении ВАХ растворов гидроксида натрия можно отметить следующие факты: - значения силы тока сопоставимы со значениями для раствора соляной кислоты; - для сглаженной формы напряжения характерно наличие «ступеньки» при 110 В для 1% концентрации, 75 В для 3% и 50 В для 5%; - для пульсирующей формы напряжения имеется максимум при 150 В для 1%- раствора, 100В для 3% и 70 В для 5%, увеличение концентрации раствора также приводит к увеличению остроконечности максимума.

При достижении определенного значения напряжения 75-80В инициируется горение микроразрядов, в этой точке уменьшается угол наклона ВАХ. В третьей области ВАХ, полученной при использовании сглаживающего емкостного фильтра горит дуговой разряд между металлическим катодом и электролитическим анодом. Ток разряда с увеличением напряжения постепенно убывает (падающая ВАХ).

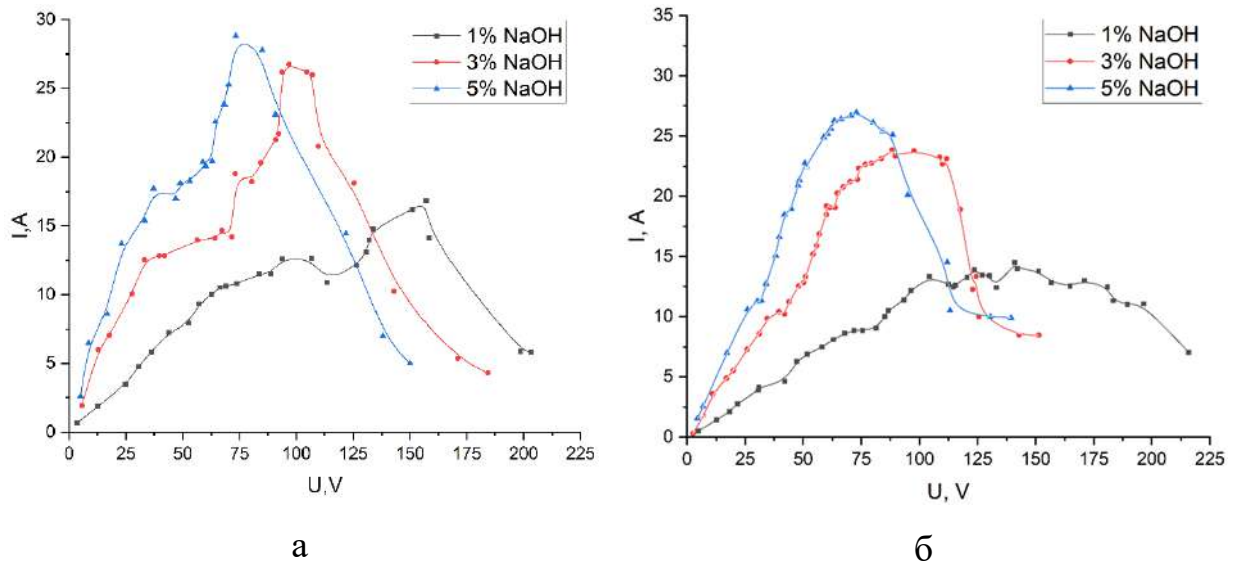


Рисунок 3.8 - ВАХ плазменно-электролитного процесса для электролитического анода 1%, 3% и 5% водных растворов NaOH: а) использованием сглаживающего емкостного фильтра, б) без сглаживающего емкостного фильтра

Рассмотрим кривые ВАХ для пульсирующей формы напряжения, представленные на рисунке 3.8 б. В итоге область протекания электрохимических процессов для концентрации раствора 1% соответствует напряжениям от 0 до 150 В, для 3% - от 0 до 100 В и для 5% от 0 до 70 В. Переходная область, в которой наблюдаются интенсивные гидродинамические возмущения и происходит постепенное увеличение площади покрытия металлического электрода газовыми разрядами, заканчивается при  $U = 215$  В для 1% раствора,  $U = 125$  В для 3% раствора и  $U = 110$  В для 5% раствора. В третьей области в следствии нагрева металлического электрода интенсивность гидродинамических колебаний минимальна.

Проведение зондовых исследований межэлектродного промежутка возможно только для случаев использования сглаживающего емкостного фильтра при условии горения газового разряда в паровоздушной оболочке. Для пульсирующей формы напряжения наблюдаются интенсивное



гидродинамическое воздействие вблизи поверхности электрода, которое в свою очередь не позволяют проводить достоверных измерений распределения потенциала. На рисунке 3.9 указано распределение потенциала по расстоянию от поверхности анода для электролитического катода 5% раствора электролита  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , при напряжении 200 В и силе тока 2,5 А.

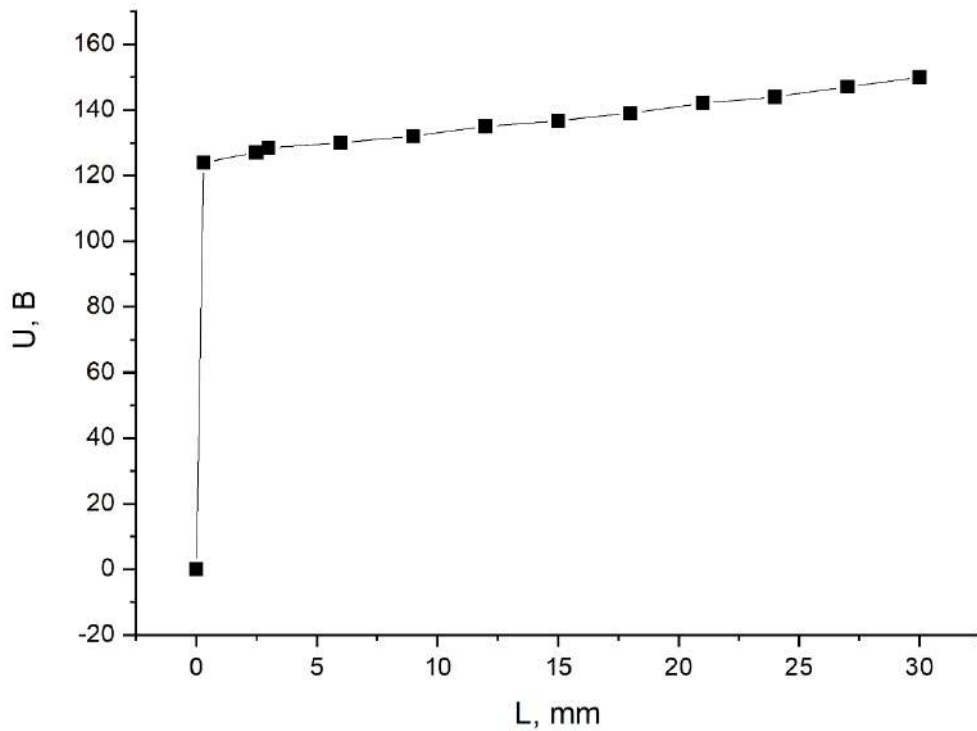


Рисунок 3.9 - Распределение падения напряжения в межэлектродном промежутке.

Также было определено, что падение напряжения на электролите составило 43 В, на паровоздушной оболочке разряда 207 В. Напряженность поля в зоне горения разряда составила  $4,3 \cdot 10^3$  В/см.

При плазменно-электролитной обработке изделий полученных селективным лазерным сплавлением важным является информация о энергетических характеристиках разряда. Энергия разряда распределяется на нагрев металлического электрода, раствора электролита, кипение и испарение жидкости, кинетической энергии электронов и ионов, излучение. Было установлено, что предельная температура нагрева металлического электрода

при горении разряда с электролитическим катодом составляет 1100 °С. Данное ограничение связано с ограниченной эмиссионной способностью раствора электролита. Нагрев металлического катода при плазменно-электролитном процессе с электролитическим анодом может достигать температур, способных расплавлять металлический сплав. Плавление металла реализуется в результате горения дуговых разрядов.

Распределение энергии при плазменно-электролитном процесса, а именно доля на нагрев жидкости и электрода определялась с помощью калориметрических измерений, описанных во 2 главе. Результаты измерений и вычислений приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Результаты измерений.

U, В	I, А	M кг/мин	ΔT, С	Q <sub>э</sub> , Дж	Q <sub>в</sub> , Дж	η, %
Электролитический катод 3% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>						
50	5	0,5	34	214000	56300	26
90	8	0,5	15	67000	19600	29
150	2	0,5	7	44000	6910	15,7
Электролитический анод 3% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>						
50	7,5	0,5	42	231945	71903	31
90	12	0,5	23	93216	27965	30
150	6	0,5	19	107600	23672	22

При протекании только электрохимических реакций 26% энергии расходуется на нагрев жидкости. При горении микроарядов 29% расходуется на нагрев жидкости. При горении разряда в паровоздушной оболочке 15,7 %расходуется на нагрев жидкости. Остальная часть энергии, вкладываемой в разряд, идет на кинетическую энергию электронов, ионизированных атомов, образование паровых струй.

### 3.2 Влияние характеристик электролита на процессы самоподдержания разряда и обработки материалов

При плазменно-электролитном процессе одним из электродов является водный раствор электролита, который в зависимости от полярности может выполнять функцию катода или анода. Поэтому природа и свойства электролита будут оказывать сильное влияние на горение разряда и протекающие физико-химические процессы. В качестве основных факторов можно выделить кислотность ( $pH$ ), температуру и проводимость электролита. Оценим величину влияния каждого фактора на протекание плазменно-электролитного процесса. Водородный показатель,  $pH$  — мера активности ионов водорода в растворе, и количественно выражающая его кислотность, вычисляется как отрицательный (взятый с обратным знаком) десятичный логарифм активности водородных ионов, выраженной в молях на литр:

$$pH = -lg[H^+] \quad (3.1)$$

Обратная  $pH$  величина — показатель основности раствора,  $pOH$ , равная отрицательному десятичному логарифму концентрации в растворе ионов  $OH^-$ :

$$pOH = -lg[OH^-] \quad (3.2)$$

как в любом водном растворе при 25 °С  $[H^+][OH^-] = 1,0 \times 10^{-14}$ , при этой температуре:  $pOH = 14 - pH$ .

В зависимости от того каким электродом является жидкий электролит, будет изменяться и степень влияния его природы на процесс горения разряда. Рассмотрим условия, при которых раствор является электродом анодом и применяется установка, представленная на рисунке 2.1. В данных условиях решающим является металлический катод, его природа отвечает за механизм поддержания горения разряда при плазменно-электролитной обработке. Выше приведенные исследования показывают, что природа жидкого анода может ограничивать силу тока, так как она напрямую зависит от проводимости раствора. Наиболее важным является изучение случаев влияния природы электролитического катода.

Рассмотрим условия, при которых раствор электролита выполняет функцию катода. В данном случае механизм переноса заряда радикально отличается от случая с металлическим катодом. В работе Czerfalvi T. [110] выявлено уменьшение катодного падения с уменьшением рН, и на основе этого предложена модель плазменно-растворной системы. В которой увеличение коэффициента вторичной электронной эмиссии  $\gamma$  связано с уменьшением рН и объясняет участие протонов и сольватированных электронов во вторичной электронной эмиссии. Для случая использования ВЧ-источника (13,56 МГц, 40 Вт, синусоидальный сигнал) в работах [111, 112] описаны протекающие физико-химические процессы в межфазной границе плазма-раствор, и делается предположение, что перенос вещества в плазме в основном происходит за счет испарения, а не за счет распыления под действием ионов. Присутствие элементов ионов солей в плазме также подтверждают авторы других работ [113]. Влияние испарения и температуры электролита на процесс контактного электролиза в тлеющем разряде (КЭВТР) представлено в работе [114]. Повышение температуры электролита или уменьшение поверхностного натяжения способствовало более раннему образованию паровоздушной оболочки и переходу из классического электролиза в режим КЭВТР. Было установлено, что для 100 В при температуре электролита 45 °С переход происходит через 24 минуты, а при 75 °С через 8 минут. Таким образом, температура электролита оказывает существенное влияние на горение разряда.

Исследование инициирования газового разряда методом соприкосновения металлического анода с поверхностью электролитического катода показали, что величина напряжения зажигания разряда для 1 % растворов  $\text{H}_2\text{SO}_4$  -180 В, 1%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  - 130 В, 1 %  $\text{NaOH}$  – 80 В. Можно говорить, что с увеличением рН раствора наблюдается снижение величины напряжения поджига разряда. Также можно отметить на рисунке 3.10 постепенное уменьшение силы тока разряда в области температур 30 – 80°С.

В области значения температуры электролитического катода  $80^{\circ}\text{C}$  происходит резкое снижение силы тока и равно нескольким сотням миллиампер.

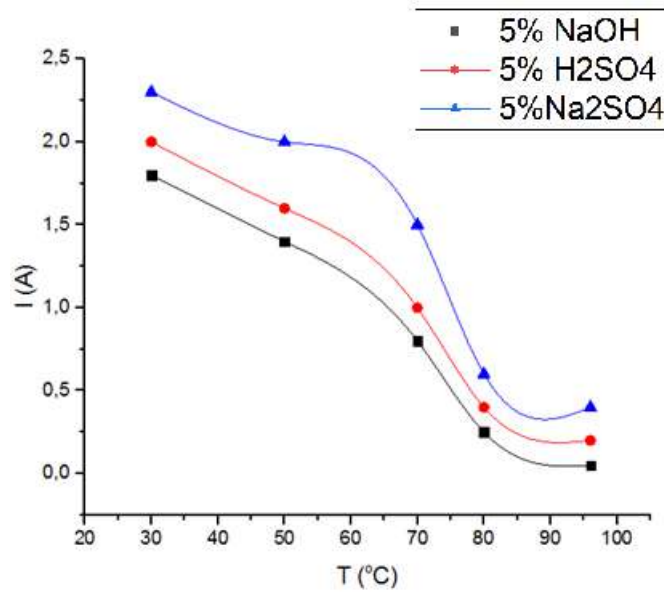


Рисунок 3.10 - Зависимость силы тока разряда от температуры электролитического катода при напряжении 180 В.

Металлический анод торцом подводился к поверхности электролита, при этом величина прикладываемого напряжения для каждого случая увеличивалась с шагом 10 В. В момент контакта, в зависимости от величины напряжения, фиксировалось протекание классического электролиза или возникновение газового разряда. В случае зажигания разряда наблюдается падение напряжения и протекание тока в несколько ампер. Происходит интенсивное разбрызгивание электролита в зоне разряда, что приводит к размыканию контакта и разряд гаснет (рис.3.11). Дальнейшее выравнивание уровня электролита приводит к возобновлению процесса.



Рисунок 3.11 - Момент инициирования разряда методом приведения в контакт анода с поверхностью электролита, температура электролита 50°C.

Увеличение температуры электролита приводит к изменению вольтамперных характеристик, наблюдается снижение силы тока разряда. Визуально наблюдается уменьшение интенсивности гидродинамических возмущений и звуковых эффектов. При температурах электролита выше 80°C происходит кардинальное изменение формы и ВАХ разряда. А именно интенсивного падения напряжения уже не происходит, а сила тока составляет несколько сот миллиампер. Гидродинамических возмущений и разбрызгивания электролита при температурах выше 70°C не наблюдалось. Скорость испарения электролита играет важную роль, ее значения представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 - Скорость испарения \*10<sup>-3</sup> кг/м<sup>2</sup>\*с

T, °C	T <sub>1</sub> 30°C	T <sub>2</sub> 50°C	T <sub>3</sub> 70°C	T <sub>4</sub> 80°C	T <sub>5</sub> 96°C
электролит					
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 1% вод. рас.	0.361	0.551	1.190	2.786	3.081
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 1% вод. рас.	0.372	0.571	1.263	2.837	3,187
NaOH 1% вод. рас.	0,347	0,532	1,154	2,742	3,032

При температуре 80 °C скорость испарения электролита практически на порядок превышают значение при 30 °C. Можно предположить, что испарение электролита играет решающую роль в определении механизма поддержания

разряда. Особый интерес вызывает случай с гидроксидом натрия, наблюдается образование лидерной структуры разряда, представленной на рисунке 3.12. Для водных растворов  $H_2SO_4$  и  $Na_2SO_4$  образование лидерной структуры не наблюдалось. Увеличение концентрации гидроксида натрия в растворе приводит к увеличению длины лидеров. Для концентрации  $NaOH$  – 5% длина лидера 1 мм, для 10% - 2 мм, для 15% - 2,5 мм, для 20 % - 3 мм при напряжении 250 В. Скорость прорастания лидера составила 2 м/с (рис. 3.2а). Прорастание лидеров идет с анода по поверхности электролита. Увеличение прикладываемого напряжения также приводит к росту длины лидеров.



Рисунок 3.12 - Лидерная структура газового разряда на поверхности электролитического катода  $NaOH$ .

Исследование с погруженным металлическим анодом при использовании емкостного сглаживающего фильтра показали сокращение времени перехода из классического электролиза к горению разряда с увеличением температуры электролита, что согласуется с работой [114]. Именно использование сглаживающего емкостного фильтра приводит к образованию паровоздушной оболочки, в которой и происходит горение разряда. В случае использования пульсирующей формы напряжения, без сглаживающего емкостного фильтра, образования паровоздушной оболочки не происходит, в локальных областях поверхности анода возникают пробои (плазменные образования) приводящие к возникновению гидроударов. При

этом параллельно протекает процесс классического электролиза. Все это сильно усложняет процесс изучения горения разряда. Если рассмотреть отдельно взятый полупериод (рис. 3.13), то его можно условно разделить на 4 стадии. В первой стадии АВ происходит протекание электролиза, далее в области ВС в результате локального перегрева происходит интенсивное парообразование, что приводит к падению силы тока и возрастанию напряжения. На участке CD наблюдается явление пробоя образование плазмы разряда, с ростом силы тока и падения напряжения. На участке DE происходит процесс протекания классического электролиза. При этом в том месте металлического анода, где горел разряд образуется гидравлический удар. В данных экспериментах влияние температуры электролитического катода не носит кардинальный характер как для случая использования сглаживающего емкостного фильтра. Увеличение температуры приводит к уменьшению интенсивности гидродинамических возмущений.

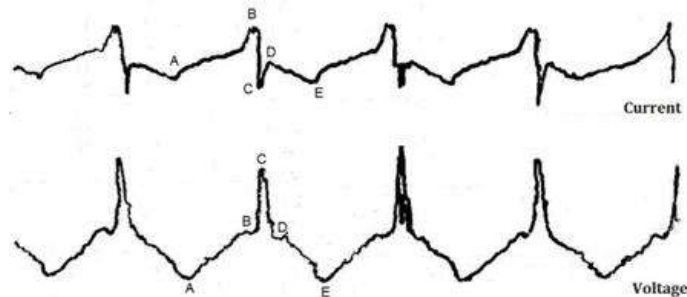


Рисунок 3.13 - Осциллограммы напряжения и тока горения разряда в 1% водном растворе  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  при использовании пульсирующей формы напряжения.

Следует отметить, исследование структуры паровоздушной оболочки разряда при погруженном металлическом аноде в растворе гидроксида натрия также показало наличие лидерной структуры. Перемещение электрода к прозрачной стенке разрядной камеры позволило рассмотреть сечение межэлектродной области (рис. 3.14). Погружение анода в электролит позволило получить лидеры на порядок длиннее, чем на поверхности. Лидеры



прорастают с конца анода по поверхности электролита и достигают поверхности. На поверхности максимальная длина лидера составила 3 мм, при погружении анода в электролит на 25 мм.

В экспериментах был обнаружен эффект аномального роста вспененной паровоздушной оболочки.

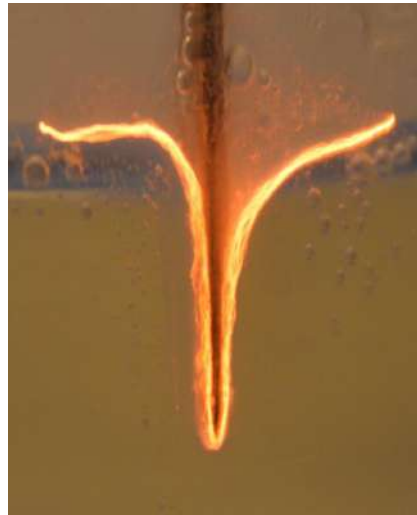


Рисунок 3.14 - Поперечное сечение разряда с лидерной структуры при погружении анода в электролитический катод NaOH.

При напряжениях 80 – 100 В на поверхности электрода может происходить накапливание электролита над зоной горения разряда. Электролит накапливается за счет разбрызгивания электролитического катода разрядом. При напряжениях выше 150 В электролит не накаливается, так как происходит процесс испарения за счет нагрева анода. На рисунке 3.15 показано увеличение размеров накапливаемого электролита над разрядом. Дальнейшее погружение металлического анода приводит к смещению за острием электрода лидерной структуры разряда. При этом наблюдается интенсивное вспенивание электролита над зоной разряда.

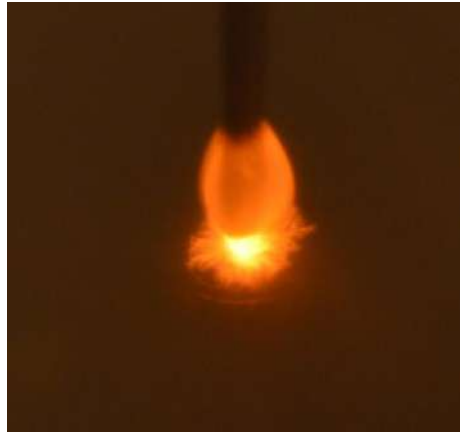


Рисунок 3.15 - Образование паровоздушной оболочки при плавном погружении электрода.

Продолжение погружения электрода приводит к ситуации, когда каналы разряда распространяются от кончика анода между слоем основного электролита и вспененного, находящегося над зоной разряда. При этом можно наблюдать четкую границу свечения, отделяющую вспененную паровоздушную оболочку. Постепенно вспененная оболочка растет, наблюдается ее вращение вокруг металлического анода, но центр остается неподвижным и привязанным к кончику анода. На рисунке 3.16 представлена схема роста оболочки. Она состоит из следующих этапов: А – при погружении анода, вспенивание и стекание капли к кончику электрода в зону разряда, Б – образование вспененной оболочки с центром горения разряда на острие анода, В – рост вспененной-паровоздушной оболочки.

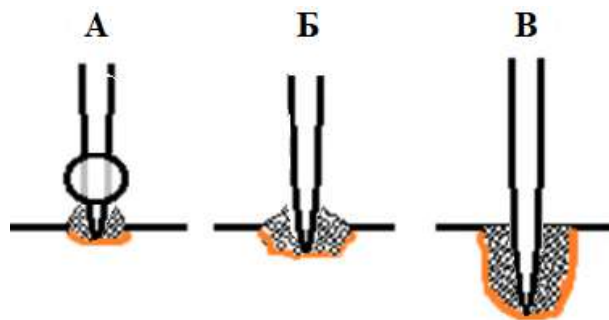


Рисунок 3.16 - Схема аномального роста паровоздушной оболочки в растворе NaOH.

Уставлено, что для плазменно-электролитного процесса в растворах NaOH при сглаженном напряжении, полученного после двухполупериодного выпрямления и с использованием емкостного фильтра 450 мкФ, наблюдается образование паровоздушной оболочки: для 1% раствор при 97 В, 3% раствор – 93 В, 5% раствор – 81 В. «Вспененная» оболочка постепенно растет и заполняет все пространство между металлическими электродами. При этом решающим фактором является величина прикладываемого напряжения.

Обнаруженный эффект внешне очень похож на горение разряда искусственно созданной вспененной среде [115] и представляет интерес с точки зрения горения разряда в многофазной среде.

В более ранних работах [110] выявлена четкая закономерность уменьшения величины катодного падения с уменьшением рН раствора электролита. Это объяснялось зависимостью коэффициента вторичной электронной эмиссии от концентрации  $H^+$ , что хорошо согласуется с механизмом поддержания тлеющего разряда. В наших экспериментах наоборот напряжение зажигания разряда увеличивается с уменьшением рН, и область исследуемых напряжений от 0 до 350 В. Из этого следует, что перенос заряда осуществляется, скорее всего, не за счет вторичной электронной эмиссии. Зажигание газового разряда при контакте металлического анода с электролитом раствора NaOH происходит с уменьшением величины прикладываемого напряжения от 80 до 0 В и возникновение силы тока плотностью 0,95 – 3,2 А/мм<sup>2</sup>. Также анализ полученных осциллограмм показывает, что ВАХ имеет падающий вид характерный для дугового разряда. При температурах электролита ниже 80 °С в момент контакта анода, находящегося под напряжением, происходит локальный нагрев жидкости и интенсивное испарение (парообразование). И в последствии приводят к ионизации и образованию плазмы. Для температур выше 80 оС наблюдается образование лидерной структуры разряда и 10 кратное превышение скорости испарения. При нагретом электролитическом катоде наблюдается более интенсивное испарение раствора, и в приповерхностном слое образуется

большое количество отрицательных ионов  $\text{OH}^-$ . К примеру для разрушения ионов  $\text{O}_2^-$  в сухом воздухе достаточно температуры 1500 К. Во влажном воздухе образуются гидротированные ионы  $\text{O}_2^-[\text{H}_2\text{O}]_n$ , энергия связи электрона  $\text{I}_n^-$  в кластере растет с увеличением  $n$ , а связь молекулы  $\text{H}_2\text{O}$   $E_{n\text{H}_2\text{O}}$  уменьшается. Энергия связи  $\text{I}_3^- = 2,65$  эВ, тогда как для  $\text{O}_2^- \text{I}_0^- = 0,44$  эВ,  $\text{OH}^- \text{I}_0^- = \text{---}$  эВ,  $E_{3\text{H}_2\text{O}} = 0,23$  эВ. Разрушение кластеров сначала идет путем последовательного отщепления  $\text{H}_2\text{O}$  ударами молекул. Происходит ионизация газа, электроны уходят в анод, в канале остается большой положительный заряд, который создает вокруг себя сильное поле. Далее процесс повторяется, новая лидерная корона отходит уже от вершины образовавшегося ранее ионизированного канала.

### 3.3 Характеристика микроструктуры поверхности в зависимости от параметров плазменно-электролитного разряда.

На рисунке 3.17 представлены изображения морфологии поверхности СЛС-образцов, полученных с помощью сканирующего электронного микроскопа EVO 50 Carl Zeiss AG.

Исследовалось влияние пульсирующего напряжения. В процессе инициирования разряда может происходить интенсивное разбрызгивание электрода, и площадь обработки будет различна в разные моменты времени. Поэтому основной упор был сделан на инициирование разряда на зубчиках шестеренок, которые находились на 10 мм ниже уровня поверхности электролита (применялась установка, представленная на рисунке 2.1). Площадь обрабатываемого изделия была в 20 раз меньше площади электрода. Электролитическая ванна заполнялась различными электролитами – водным раствором  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  или водным раствором  $\text{H}_2\text{SO}_4$  концентрации 5% по массе. Для сравнения была проведена обработка стандартным методом с помощью потока частиц оксида алюминия 99.5%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{SiO}_2$  не более 0.06% зернистостью 110 – 150 мкм (Cobra, Renfert) на установке АПО-5У (Аверон,

Екатеринбург). На рисунке 3.18 представлены изображения поверхности полученных образцов.

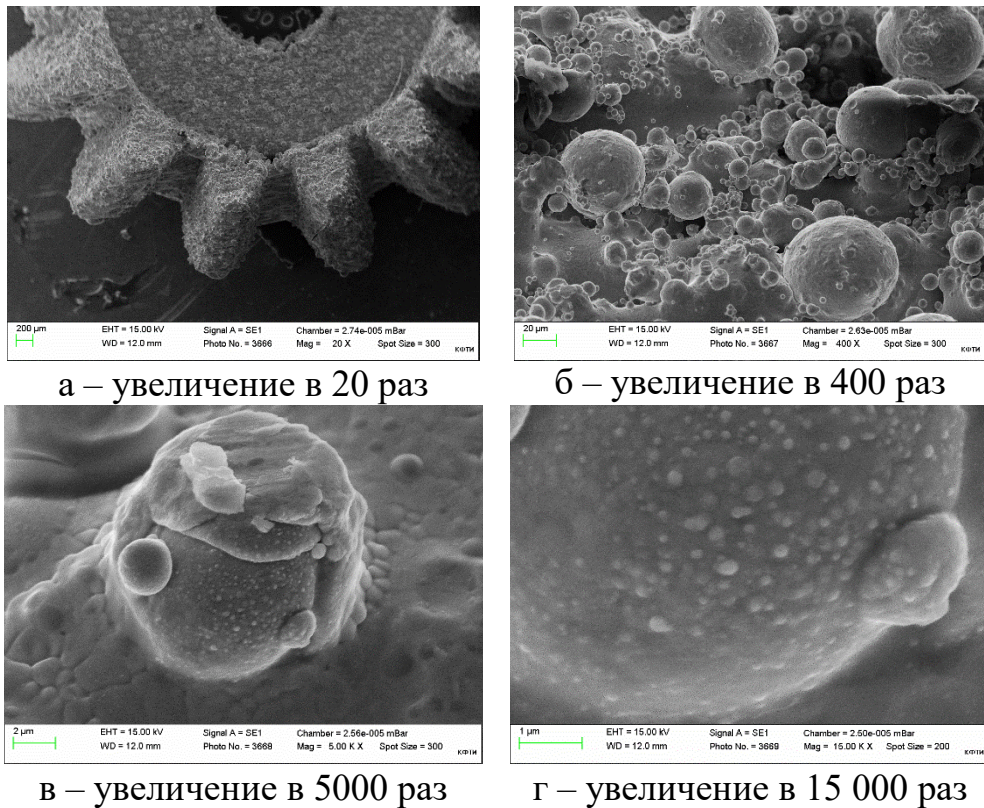


Рисунок 3.17 - СЭМ-изображения поверхности изделий, полученных методом СЛС.

Перед экспериментами по плазменно-электролитной обработке и очистке была получена вольтамперная характеристика горения разряда на обрабатываемом изделии в водном растворе  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , представленная на рисунке 3.19.

Наблюдение свечения разряда происходило при напряжении 130 В. Перед этим при напряжении 30 В фиксируются возникновение шума, который с увеличением напряжения возрастает и перетекает в возникновение гидравлических импульсов при напряжении 60В. Наибольшая интенсивность гидравлических импульсов наблюдалась в области напряжений 120 – 140 В. Далее с увеличением напряжения наблюдается уменьшение силы тока, но при этом свечение разряда увеличивается. При этом стабильное горение разряда протекает в области напряжений выше 190 В. Плазменно-электролитная

обработка и очистка проводились в гидродинамическом режиме, когда разряд зажигался на изделии-аноде и наблюдалось возникновение гидроударов. При иницировании разряда на изделии-катоде наблюдается резкое повышение температуры, которое трудно контролировать, что в свою очередь может привести к оплавлению зубьев шестеренки.

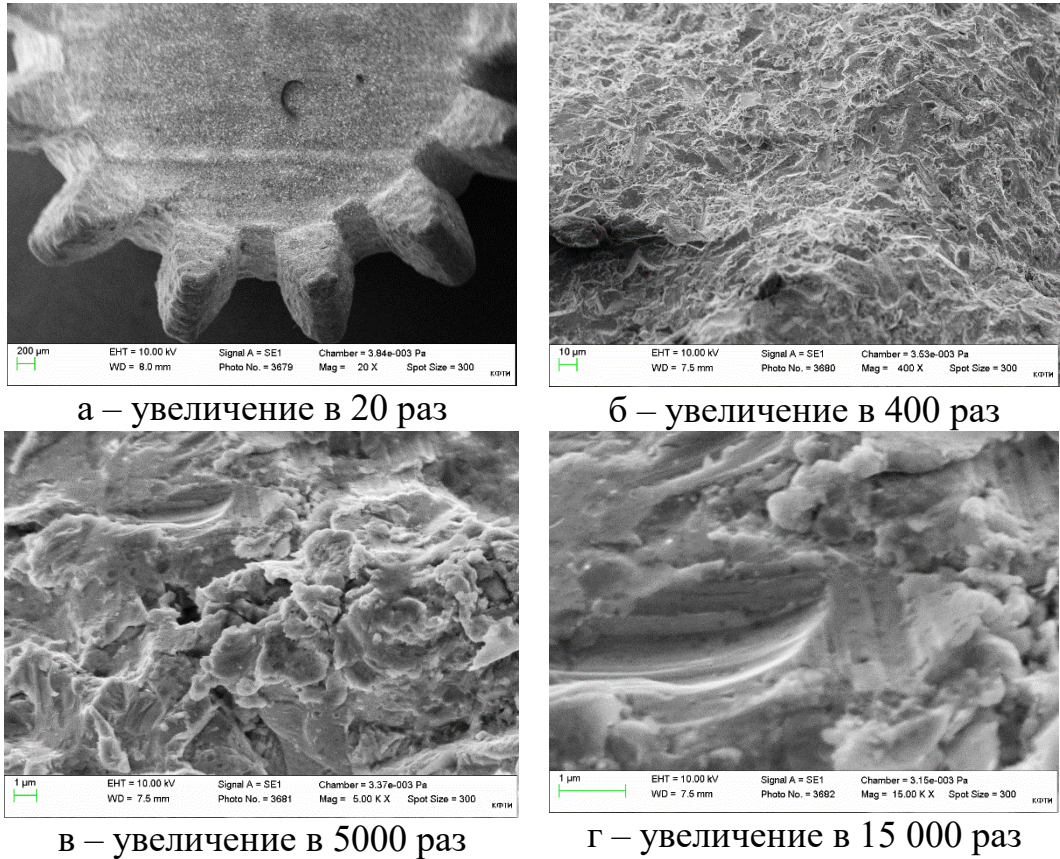


Рисунок 3.18 - СЭМ-изображения поверхности СЛС-изделий, после струйной обработки.

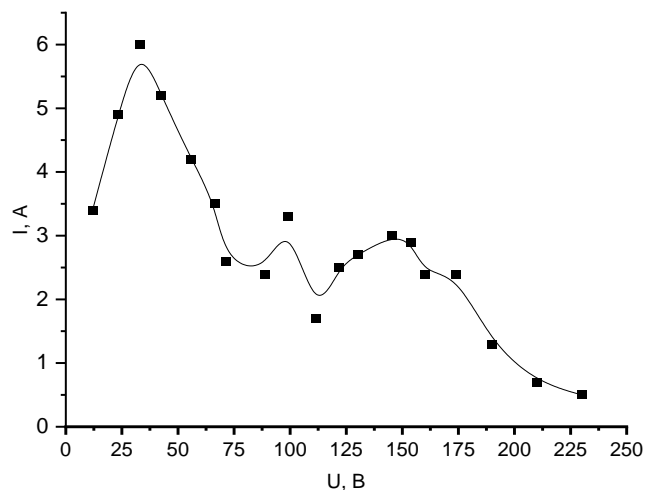


Рисунок 3.19 - Вольтамперная характеристика плазменно-электролитного процесса обработки нержавеющей стали 17-4 PH.

В результате обработки были получены два вида образцов, первый обработанный в  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , представлен на рисунках 3.20а (увеличение в 20 раз), 3.20б (увеличение в 400 раз) и 3.20в (увеличение в 5000 раз), второй, обработанный в  $\text{H}_2\text{SO}_4$  – 3.20г, 3.20д и 3.20е. Обработку в обоих случаях проводили при напряжении 130 В, в случае использования раствора  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  под действием гидродинамических импульсов происходит удаление спеченных частичек порошка, это около 75% всех неровностей, однако сплавленные частички порошка остаются (рисунок 3.20б).

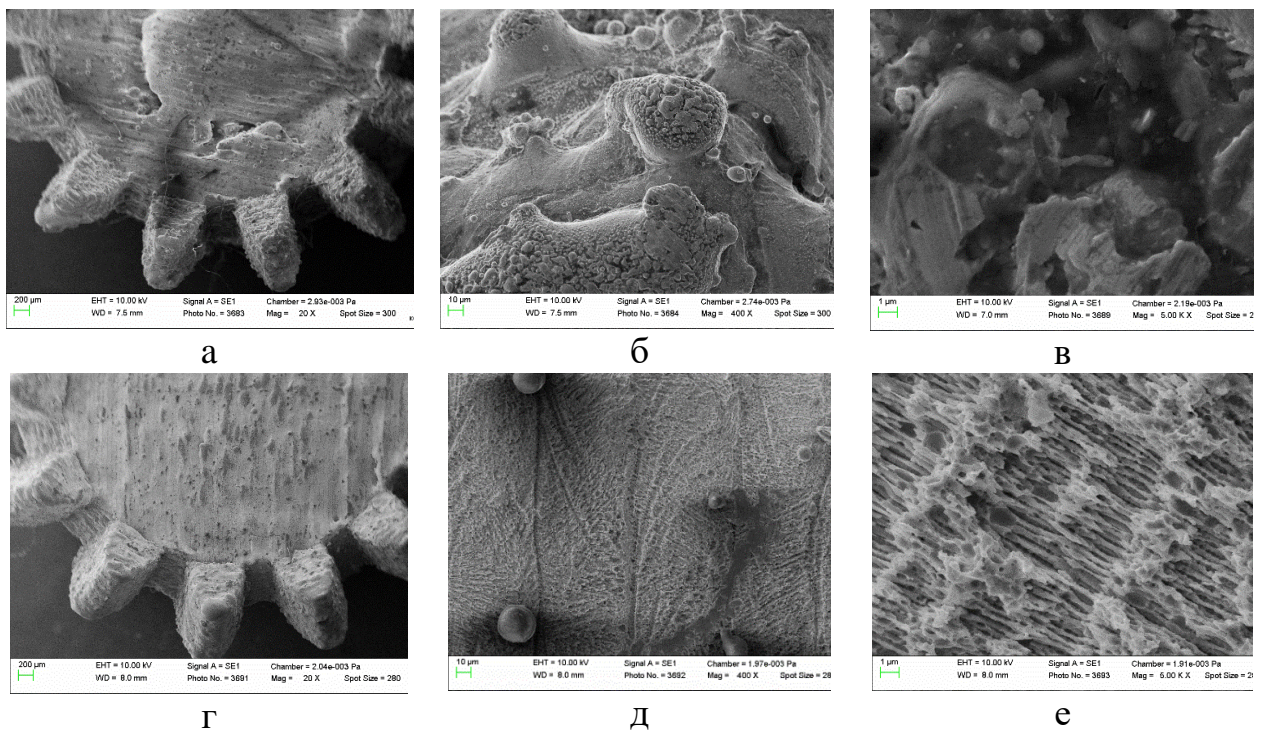


Рисунок 3.20 - СЭМ-изображения поверхности СЛС-изделий, после плазменно- электролитной обработки.

В случаях обработки в растворе  $\text{H}_2\text{SO}_4$  помимо воздействия гидродинамических импульсов также происходит анодное растворение поверхности, что и приводит к более эффективному процессу очистки. А именно отрыву крупных частиц под действием гидродинамических ударов и сглаживанию сплавленных частиц порошка. Это прекрасно видно при сравнении с пескоструйным методом обработки (рисунки 3.18а и 3.20г схожи).

Установлено, что наиболее эффективная очистка от крупных сплавившихся частиц происходит в «гидродинамическом» режиме, когда наблюдается возникновение гидродинамических импульсов. Дальнейшее сглаживание неровностей устраняется при стабильном горении разряда в паровоздушной оболочке. Анализ морфологии поверхности сложнопрофильных изделий, таких как коронные конические шестеренки, после плазменно-гидродинамической обработки показал эффективность и преимущества по сравнению со стандартными методами финишной очистки, таким как дробеструйная обработка.

### 3.4 Математическое моделирование условий формирования микроструктуры поверхности при плазменно-электролитной обработке

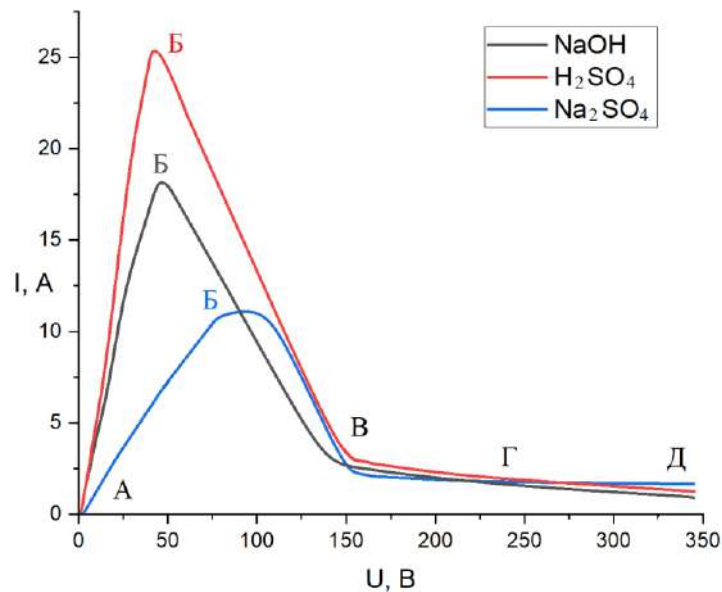


Рисунок 3.21 - Схема типичной ВАХ электролитов для различных растворов (Раздел 3.1).

Рассмотрим представленную на рисунке 3.21 типичную ВАХ [116].

Первый участок АБ представляет собой процесс электролиза, который можно описать с помощью уравнений и моделей классической электрохимии.

Участок БВ на кривой ВАХ соответствует переходу от режима классического электролиза к горению разряда в паровоздушной оболочке. При



переходе рост паровоздушной оболочки приводит к падению силы тока и росту значения напряжений на электродной системе.

Участок ВГ соответствует плазменно-электролитному процессу, когда в стабильной парогазовой оболочке происходит горение разряда и наблюдается полировка металлического анода.

На участке ГД парогазовая оболочка становится неустойчивой. При повышении напряжения выше 400 В вызывает нарушение парогазовой оболочки и остановку процесса полировки.

На участках БВ, ВГ и ГД увеличение напряжения приводит к уменьшению тока из-за увеличения толщины парогазовой оболочки. В то же время на основании [116] можно сделать вывод, что она обладает значительным сопротивлением.

Для моделирования процесса плазменно-электролитной обработки – полировки (ПЭО) поверхностей СЛС-изделий, была применена модель [117, 118] в предположении, что ПЭО рассматривается как электрохимическую полировку. Данная модель используется для моделирования электрических явлений и процесса удаления материала при ПЭО после возникновения стабильной парогазовой оболочки. Настройка модели и расчет производились в COMSOL Multiphysics®. Для этой модели были выбраны интерфейсы Electric Currents и Deformed Geometry. Интерфейс Electric Currents включает в себя формулы, описывающие расчет электрического потенциала в среде в пренебрежении магнитными эффектами сводящийся к решению уравнения закона сохранения тока с учетом закона Гаусса и закона Ома относительно скалярного электрического потенциала:

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = Q_{j,v} \quad \mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} + \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}, \quad (3.3)$$

где  $\mathbf{E} = -\nabla V$ ,  $\mathbf{E}$  - электрическое поле,  $V$  - электрический потенциал,  $\mathbf{J}$  - плотность тока,  $Q_{j,v}$  - источник тока,  $\sigma$  - электрическая проводимость,  $\varepsilon_0$  - диэлектрическая проницаемость вакуума ( $8.85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} \cdot \text{м}^{-1}$ ),  $\varepsilon_r$  - относительная диэлектрическая проницаемость.

Исходный профиль поверхности анода был создан на основании данных о шероховатости поверхности образцов (см. раздел 4.4), полученных с помощью селективного лазерного сплавления, и сгенерирован с использованием метода пространственных частот [119] по уравнению:

$$y = A \sum_{m=-N}^N (m^2)^{\frac{-b}{2}} g1(m) \cos(2\pi ms + u1(m)) \quad (3.4)$$

Это было сделано для имитации полирующего эффекта ПЭП и для анализа распределения плотности тока на поверхности. Параметры, которые для этого использовались, были подобраны для реальной поверхности образца и приведены в таблице 3.3.

Геометрия модели и граничные условия основаны на принципиальной схеме, показанной на рисунке 3.22 и представленной на рисунке 3.23. Ванна с электролитом определяется как катод. Ванна имеет размеры 6 мм x 6 мм. Образец, который является анодом, имеет размеры 2 мм x 1 мм. Анод полностью погружают в ванну на глубину 2 мм. Анод окружен парогазовой оболочкой. Размеры ванны и образца были выбраны для оптимизации времени моделирования процесса.

Таблица 3.3 - Параметры метода пространственных частот

Параметр	Описание	Значение
N	Пространственное частотное разрешение	30
b	Спектральная экспонента	0.5
A	Параметр масштаба по координате y	0.005
s	Координата x	
g1	Гауссовская случайная функция	
u1	Равномерная случайная функция	

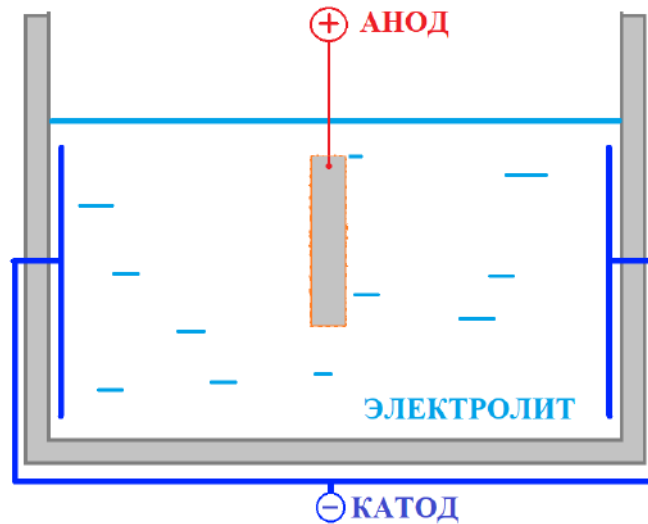


Рисунок 3.22 – Принципиальная схема ПЭП (на основе экспериментальной установки, представленной на рисунке 2.1)

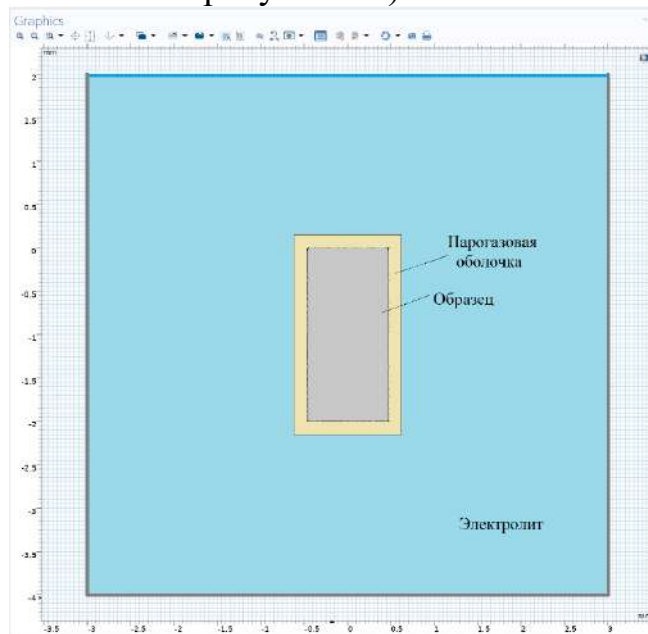


Рисунок 3.23 - Геометрия модели.

Таблица 3.4 - Параметры моделирования, граничные и доменные условия.

Параметр	Значение
Напряжение	200 В
Проводимость анода	$1.02 \cdot 10^7$ мСм/см
Проводимость электролита	110 мСм/см
Проводимость парогазовой оболочки	$2.55 \cdot 10^{-2}$ мСм/см
Толщина парогазовой оболочки	0.15 мм
Коэффициент удаления К	$1.54 \cdot 10^{-11}$ м <sup>3</sup> /(А·с)
Относительная диэлектрическая проницаемость анода	1
Относительная диэлектрическая проницаемость электролита	55

Относительная диэлектрическая проницаемость парогазовой оболочки	1
--	---

Модель имеет 3 домена: электролитный, парогазовый и анодный. Параметры моделирования приведены в таблице 3.4.

Боковые и нижние границы модели определяются как заземленные. На границы заготовки подается напряжение 200 В.

В качестве электролита используется раствор сульфата натрия. Электропроводность равна 110 мСм/см, что соответствует концентрации раствора 50 г/л при 75 °С [120]. Это значение является общим для полировки нержавеющей сталей. В качестве материала для анода была выбрана нержавеющая сталь 17-4 РН. Толщина парогазовой оболочки по литературным данным была выбрана равной 150 мкм [121]. Электропроводность парогазовой оболочки, в которой горит газовый разряд и образуется низкотемпературная плазма, рассчитывалась на основе экспериментальных значений и данных, приведенных в литературе. Приводятся общепринятые значения электрического поля:  $10^4$  В/см -  $10^5$  В/см [120]. Столь высокое значение позволяет предположить, что почти все напряжение падает в парогазовой оболочке. Тогда исходя из толщины 150 мкм и напряжения 200 В можно рассчитать электрическое поле:

$$E = \frac{V}{dh} = \frac{200 \text{ В}}{0.015 \text{ см}} = 13300 \text{ В/см} \quad (3.5)$$

Это соответствует указанному выше диапазону. Плотность тока определяется:  $j_n = \sigma \cdot E$ . Среднее значение  $j_n$  основано на экспериментальных данных [120] для 200 В составила 0,34 А/см<sup>2</sup>. Зная  $E$  и  $j_n$ , проводимость можно рассчитать:

$$\sigma = \frac{j_n}{E} = \frac{0.34 \text{ А/см}^2}{13300 \text{ В/см}} = 2.55 \cdot 10^{-2} \text{ мСм/см} \quad (3.6)$$

Полная сетка состоит из 34895 доменных элементов и 2090 граничных элементов. Параметры сетки приведены в таблице 3.5. Наиболее мелкая сетка реализуется вблизи поверхности анода, где происходит сьем.

Таблица 3.5 - Параметры сетки

Параметр	Электролит и парогазовая оболочка	Образец
Максимальный размер элемента	20 мм	20 мм
Минимальный размер элемента	0.005 мм	0.005 мм
Максимальная скорость роста элемента	1.5	1.2
Коэффициент кривизны	0.2	0.2
Разрешение узких областей	1	1

Моделирование включает два исследования: стационарное исследование, в котором рассчитываются начальные значения электрических переменных, и исследование, зависящее от времени, в котором решаются физика электрических токов и деформация сетки. Деформация сетки рассчитывается в соответствии с приведенным ниже уравнением:

$$V_{deform} = K \cdot (-j_n) \quad (3.7)$$

где  $K$  - коэффициент удаления, рассчитанный на основе экспериментальных данных [120];  $j_n$  - нормальная плотность тока.

$K$  рассчитывается из экспериментальных данных: средней скорости съема материала (MRR) и средней плотности тока для 200 В:

$$K = \frac{MRR}{j_n} = \frac{5.24 \cdot 10^{-8} \text{ м/с}}{0.34 \text{ А/см}^2} = 1.54 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 / (\text{А} \cdot \text{с}) \quad (3.8)$$

Моделирование удаления производилось в течение 120 с.

### Результаты моделирования

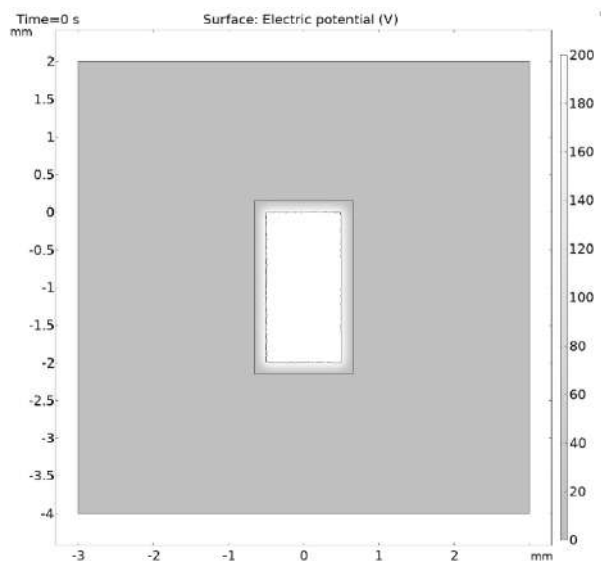


Рисунок 3.24 - Электрический потенциал

На рисунке 3.24 можно увидеть распределение электрического потенциала в камере. Как и следовало ожидать, основное падение напряжения происходит в парогазовой оболочке. Это видно на рисунках 3.25 и 3.26. На рисунках 3.25 и 3.26 показан электрический потенциал вблизи поверхности заготовки на различных временных шагах.

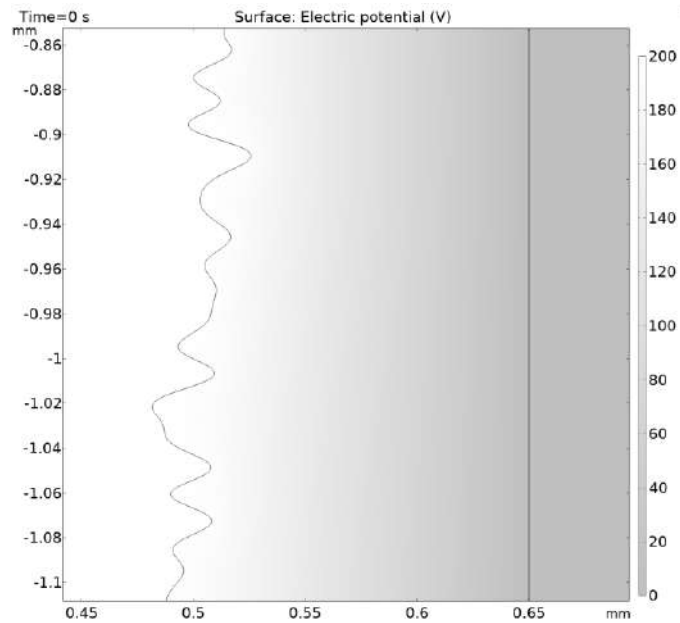


Рисунок 3.25 - Поверхность заготовки и электрический потенциал ( $t=0$  с)

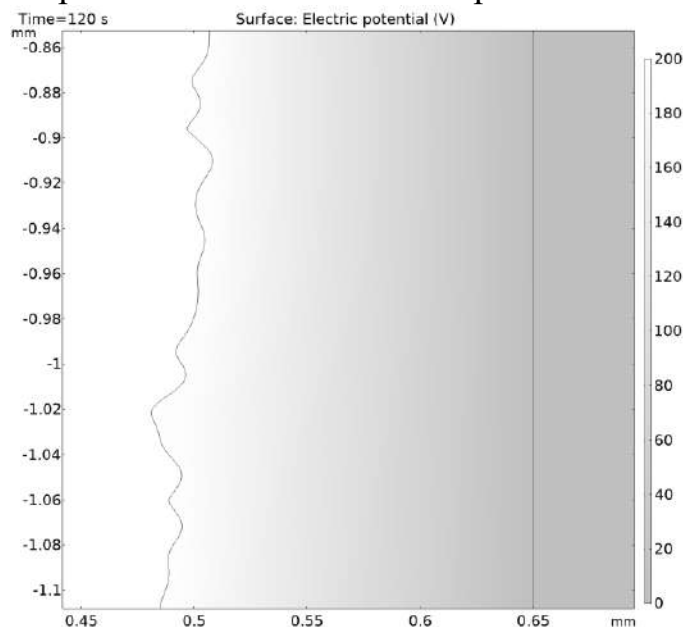


Рисунок 3.26 - Поверхность заготовки и электрический потенциал ( $t=120$  с)

Поскольку внутри него падает практически полное напряжение, парогазовую оболочку можно рассматривать как особую электрохимическую

ячейку, в которой граница между ней и электролитом выступает в качестве катода.

На рисунке 3.27 можно увидеть, что нормальная плотность тока в полостях ниже, чем у пиков. Нормальная плотность тока в основном зависит от формы поверхности. Принимая во внимание электрохимический характер процесса, это приводит к более быстрому удалению материала на пиках.

На рисунке 3.27 также можно увидеть, что при плотности тока на более глубоких полостях повышается время обработки. Средняя плотность тока в модели составляет  $0,339 \text{ A/cm}^2$ , по сравнению с  $0,34 \text{ A/cm}^2$  в эксперименте [120].

На рисунке 3.28 показан профиль поверхности до и после 120 секунд полировки. Видно, что, несмотря на то, что общая форма поверхности сохраняется, пики были заметно удалены. Это можно объяснить более высокой плотностью тока на вершинах.

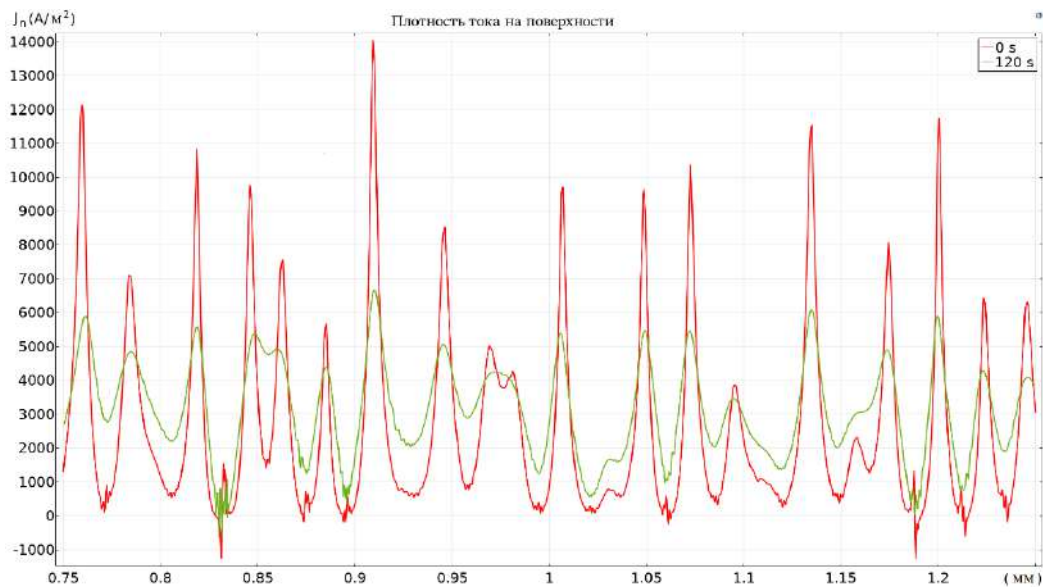


Рисунок 3.27 - Плотность тока на поверхности при 0 с и 120 с

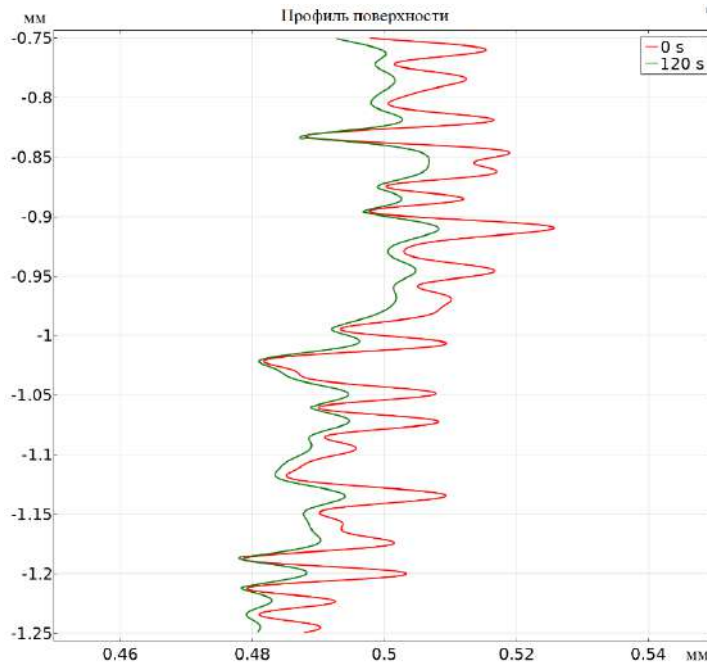


Рисунок 3.28 - Профиль поверхности при 0 с и 120 с

Для анализа полирующего эффекта рассчитывали параметр шероховатости  $Ra$ . Уравнение для расчета  $Ra$  было разработано на основе следующей формулы:

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |h(x)| dx \quad (3.9)$$

где:  $l$  - длина оценки,  $h(x)$  – отклонения от средней линии.

$$h(x) = |y - \bar{y}| \quad (3.10)$$

Для расчета этого в COMSOL использовались следующие связи компонентов:  $\text{intop1}$  - интегрирование по грани 1;  $t1$  и  $t2$  - максимальные функции в точках 1 и 2 соответственно;  $\text{aveop1}$  – среднее по грани 1. Точки и граница показаны на рисунке 3.29.

Для расчета  $l$  использовалось следующее уравнение:

$$l = t2(x) - t1(x) \quad (3.11)$$



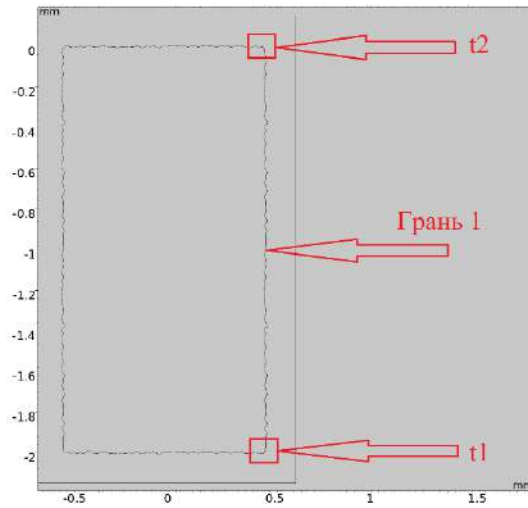


Рисунок 3.29 – Расположение грани 1 и точек t1 и t2 на модели.

Затем средняя линия рассчитывается с функцией aveor1. Применяя все к уравнению для расчета  $Ra$ :

$$Ra = \frac{1}{t2(x) - t1(x)} \int_{t1}^{t2} |y - \bar{y}| dx \quad (3.12)$$

Результаты этого расчета можно увидеть на рисунке 3.30. Видно, что шероховатость уменьшается в соответствии с экспоненциальным затуханием.

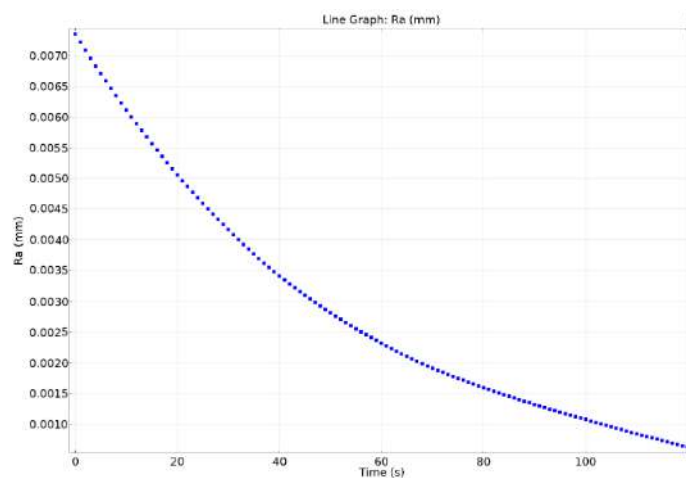


Рисунок 3.30 - Выбранные результаты для Ra как функция времени.

## ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРЕСС-ФОРМ ЛОПАТОК И ДЕТАЛЕЙ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ, ПОЛУЧЕННЫХ ПО ТЕХНОЛОГИИ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ

В данной главе представлено описание процессов СЛС-изготовления пресс-форм, применяемых при производстве авиационных изделий, в том числе лопаток газотурбинного двигателя. Описаны результаты исследования микроструктуры и фазового состава СЛС-изделий до и после термического воздействия. Представлены данные о изменении морфологии поверхности СЛС-структур. Даны результаты экспериментов по определению физико-механических характеристик и закономерностей их изменения в зависимости от внешнего воздействия газовыми разрядами. Представлены результаты испытаний пресс-форм, изготовленных методом селективного лазерного сплавления. Разработана методика плазменно-электролитной обработки СЛС-изделий. Описано роботизированное устройство для локальной обработки газовым разрядом с жидким электродом.

### 4.1 Изготовление пресс-форм для лопаток и деталей газотурбинного двигателя селективным лазерным сплавлением.

Подготовка производства и освоение новых наукоемких изделий – это сложный и трудоемкий процесс, включающий в себя создание макетов изделия для проведения цикла экспериментальных исследований для уточнения расчетных моделей, с последующим изготовлением необходимой технологической оснастки [122-124]. Применение технологий цифрового производства позволяет сократить трудоемкость данного процесса. В данном разделе приведены исследования по снижению времени освоения деталей газотурбинного двигателя с использованием концепций цифрового производства и аддитивных технологий [125-127].

При технологической подготовке производства новых деталей большую роль играет технологическая оснастка. Именно она во многом определяет экономические и технические параметры производства детали, в том числе стоимостные и, в конечном итоге, конкурентоспособность изделия на рынке.

Основной технологией изготовления технологической оснастки является обработка резанием из монолитных заготовок с использованием оборудования с ЧПУ. И поэтому данный вариант изготовления уже практически полностью оптимизирован и не имеет существенного ресурса по уменьшению трудоемкости и себестоимости.

Современное производство характеризуется относительно быстрой сменой продуктов и с помощью селективного лазерного сплавления можно изготовить формообразующие детали оснастки за более короткий срок.

Аддитивные технологии являются частью современных методов создания новых изделий, машин, технологий, продуктов, которые используются на этапе отработки дизайна и конструкции изделия или на этапе подготовки изделия к производству.

Одним из перспективных направлений применения аддитивных технологий является изготовление технологической оснастки для освоения деталей при литье по выплавляемым моделям (Рис. 4.1).



Рисунок 4.1 - Изготовление детали при литье по выплавляемым моделям

Селективное лазерное сплавление – это самый распространённый метод изготовления металлических деталей. Метод позволяет изготавливать детали с большей производительностью, однако он ограничен в выборе материала.

Селективное лазерное сплавление вносит определенные требования к конструкции детали (рис. 4.2).

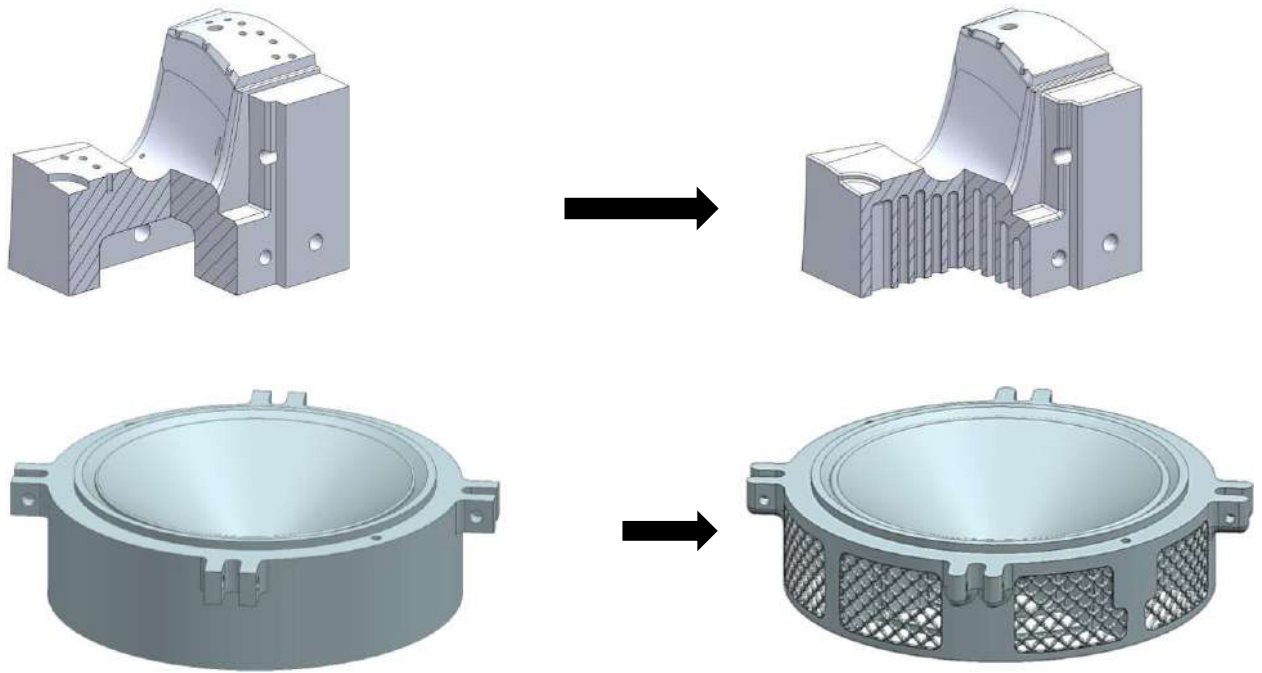


Рисунок 4.2 - Изменение конструкции детали

Для сплавления было выбрано 5 виртуальных моделей частей пресс-формы, все они имеют вертикальные боковые стенки, а формообразующая часть находится в верхней торцевой стороне. Данный выбор был связан с построением сплошных поддержек в нижней части изделия для устранения влияния геометрии на образование трещины. На рисунке 4.3 представлена серия фотографий опытных образцов, полученных селективным лазерным спеканием. Все образцы имеют схожие дефекты, а именно образование трещин вблизи основания. Наблюдался рост имеющихся трещин при остывании опытных образцов. На рисунке 4.3б на границе поддержки и изделия имеется трещина, распространяющаяся в глубь изделия. На фото 4.3а

и 4.3в также наблюдается образование трещин, но уже в самой поддержке, там, где образуется угол  $90^\circ$ . Наличие трещин в поддержке не является отрицательным результатом, если не приводит к искажению геометрии изделия.



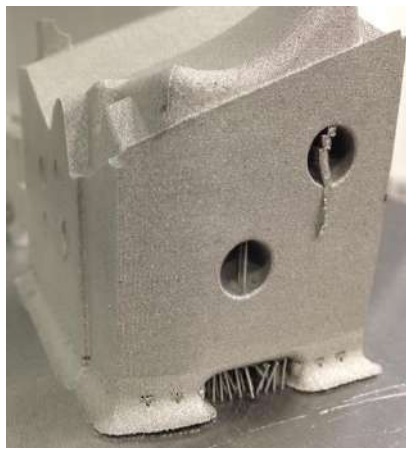
а



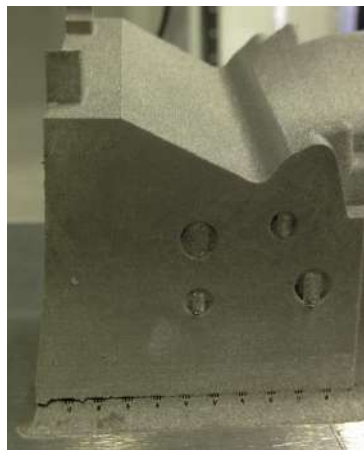
б



в



г



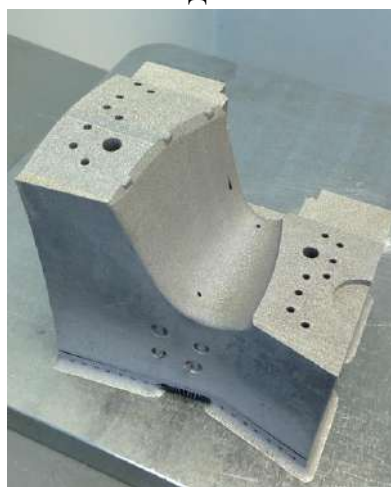
д



е



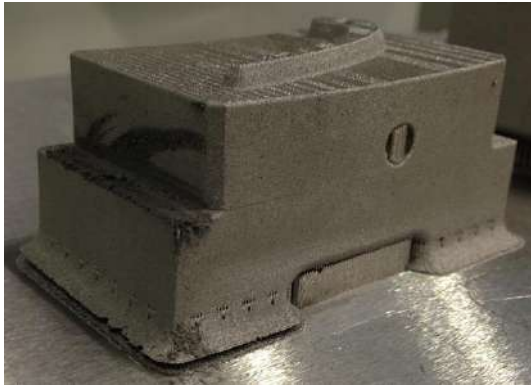
ж



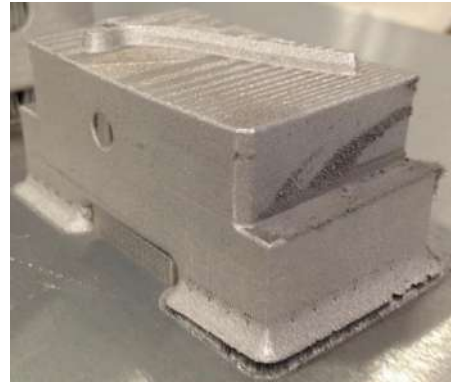
з



и



К



Л

Рисунок 4.3 - Опытные образцы элементов пресс-формы: а)-л) фотографии пресс-формы лопатки газотурбинного двигателя.

Было принято решение осуществить подконтрольное образование и распространение трещин в поддержке. На рисунке 4.3г представлен отрыв поддержки от рабочей платформы. Реализовать данную ситуацию получилось путем неравномерного сплавления порошка. А именно в правой части изделия поддержка начала сплавляться с первого слоя, а в левой части только с третьего слоя. Таким образом, мы добились получения в левой части поддержки слоя с большой пористостью и плохой адгезией к платформе. Второй метод контролируемого распространения трещины был реализован на этом же изделии, только путем формирования в виртуальной модели геометрических пустот в виде треугольников. Как показал эксперимент, данный подход был успешным (Рис. 4.3д, 4.3е, 4.3ж-правая сторона). Третьим методом контролируемого образования и распространения трещины была остановка процесса сплавления на 3 часа, за это время сформированные слои остыли до температуры 35°C, и после этого СЛС-процесс был возобновлен. Результаты данного эксперимента представлены на рисунках 4.3ж и 4.3и, наблюдается плавное расхождение двух слоев. На рисунках 4.3к и 4.3л представлен образец эксперимента сплавления изделия малых габаритных размеров (600\*400\*300 мм), сочетающий в себе первую методику и вторую.

Как видно образование трещин отсутствует, наблюдается отрыв поддержки без искажения геометрии.

Решение проблемы развития трещин может быть найдено в предварительном нагреве платформы до температуры 300°C, однако в установке ProX 300 отсутствует данная возможность. Предварительный нагрев позволил бы уменьшить величину внутренних напряжений. Для борьбы с порами в данном случае подходит только один метод - laser re-melting, позволяющий устранять поры во время сплавления.

В результате проведенных исследований селективного лазерного сплавления толстостенных изделий элементов пресс-форм из металлического порошка 17-4PH на установке ProX 300 выявлено развитие трещин. Предложено четыре метода решения данной проблемы:

- Контролируемый отрыв основания поддержки изделия от платформы.
- Контролируемое развитие трещины внутри поддержке за счет создания внутренних треугольных полостей.
- Контролируемый разрыв двух слоев в результате временной остановки работы установки.
- Устранение образования трещины за счет предварительного прогрева рабочей платформы построения.

Все предложенные методы могут быть успешно реализованы, кроме четвертого, который потребует модернизации установки ProX 300.

Установлено, что для борьбы с порами в данном случае подходит только один способ - laser re-melting.

Детали, выращенные селективным лазерным сплавлением, имеют высокую шероховатость (Рис. 4.4). Поэтому после изготовления детали на 3D принтере была проведена плазменно-электролитная обработка деталей.

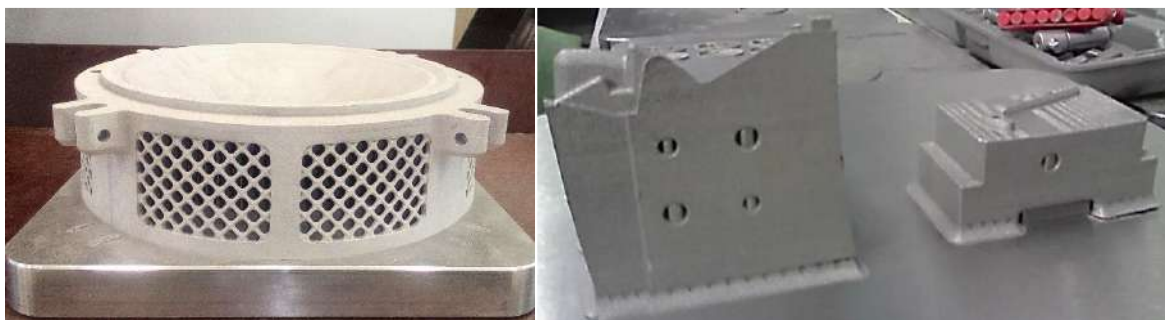


Рисунок 4.4 - Детали пресс-формы, изготовленные методом селективного лазерного сплавления

После обработки деталей проводились измерения на 3D сканере ATOS III Triple Scan XL и при помощи специальных шаблонов (Рис. 4.5). Было проведено сравнение оптически оцифрованного изделия, полученного селективным лазерным сплавлением, с самой электронной трехмерной моделью с помощью оптической координатно-измерительной топометрической системы ATOS III Rev.02.

В результате было выявлено, что структура поверхности изделия с большой точностью повторяет структуру исходной модели как это видно на рисунке 4.5. Красный цвет поверхность оптически оцифрованной крыльчатки имеет выступ относительно поверхности электронной модели. Синий цвет – поверхность оптически оцифрованного изделия имеет впадину относительно поверхности исходной электронной модели.



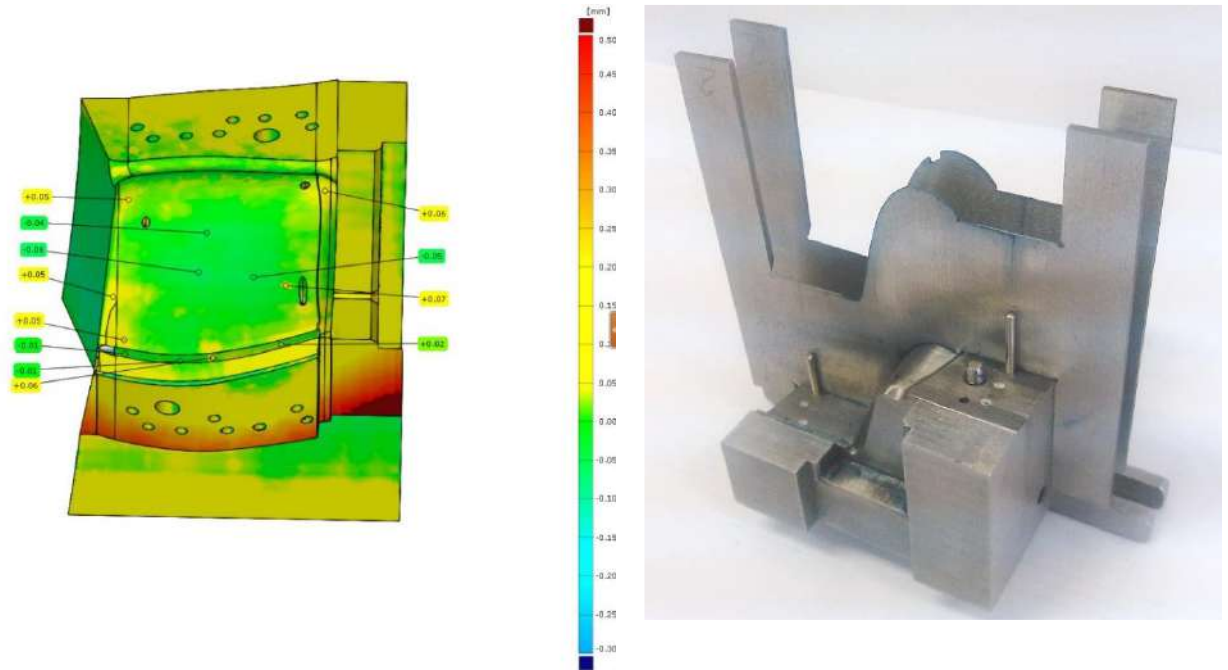


Рисунок 4.5 - Сопоставление цифровой модели лопатки ГТД и оптически оцифрованной модели

После изготовления всех деталей пресс-формы была произведена её сборка и апробация в условиях реального производства (Рис. 4.6).

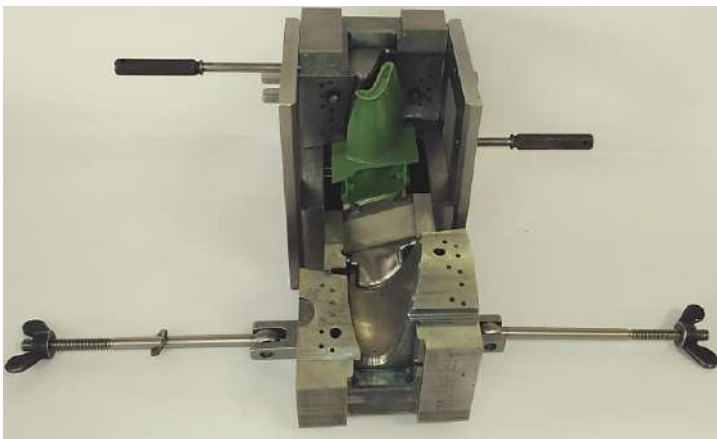


Рисунок 4.6 - Пресс-формы, изготовленные с использованием селективного лазерного сплавления

В ходе проведения опытных работ были достигнуты следующие результаты:

- Длительность выполнения работ по изготовлению средств технологического оснащения не превысила 2 – 2,5 месяца;
- Использование аддитивных технологий позволяет снизить вес конструкции и повысить коэффициент использования материалов в несколько раз;
- В конструкции пресс-формы были использованы различные сетчатые структуры и внутренние каналы и полости, которые невозможно или сложно получить при обычной механообработке;
- Полученные пресс-формы изготовлены из меньшего количества деталей и с меньшим количеством технологических операций, что позволило сократить количество сопрягаемых поверхностей и повысить точность изготовления.
- Опробован процесс проектирования и применена аддитивная технология изготовления многофазовой оснастки, что позволило сократить цикл подготовки производства в условиях реального производства.

## 4.2 Исследование структуры и фазового состава изделий

По данным спектрального анализа материал 17-4 РН по химическому составу близок к отечественной марке стали 07Х16Н4Д4Б-Ш, второй близкой маркой является сталь 08Х15Н5Д2Т-Ш (ВНС2, ЭП410). Распределение элементов на поверхности образцов представлено на рис. 4.18-4.20. Количественный химический состав приведен в таблице 4.1.

Таблица 4.1. – Количественный химический состав

Массовая доля элементов %														
Обр.	C	Cr	Mo	W	Ni	Nb	Fe	Mn	Si	S	P	V	Cu	Ti
<b>Образцы</b>														
№ 1 (тип I)	0,040	16,0	0,12	0,04	3,90	0,20	осн	0,67	0,70	0,01	0,027	0,04	3,95	-
№ 2 (тип II)	0,050	16,0	0,12	0,05	3,90	0,20	осн	0,70	0,75	0,01	0,025	0,04	3,97	0,01
17-4РН	≤0,07	15- 17,5	≤0,5	-	3,0- 5,0	0,15- 0,45	осн	≤1,0	≤0,75	≤0,025	≤0,035	-	3,0- 5,0	-
<b>08Х15Н5Д2Т-Ш (ВНС2, ЭП410)</b>														
	0,08	13,5 - 14,8	-	-	4,8- 5,8	≤0,45	осн	≤0,58	≤0,7	0,018	0,020	-	1,75 - 2,5	0,03 - 0,15
<b>Сталь 07Х16Н4Д4Б-Ш</b>														
НТД	≤0,07	15,0- 17,0	≤0,3	-	3,0- 5,0	≤0,45	осн	1,0	≤1,0	≤0,03	≤0,045	-	3,0- 5,0	≤0,1 5

Точки в которых происходило измерение твердости находились на расстоянии 10 мм друг от друга, и в 5 мм от краев образца.

Твердость по длине образца, измеренная по Роквеллу до плазменно-электролитной обработки составляет:

- вертикальное построение: обр.№1 - HRC 27 -33 - 34 - 35 - 36;
- горизонтальное построение: обр. №2 - HRC 32 - 34 - 32 - 34 - 35.

Отмечается некоторый разброс значений по твердости.

Для повышения твердости была применена плазменно-электролитная обработка.

Применялся следующий режим обработки:

В растворе 5% сульфата натрия при напряжении 130В (анодом является образец) в течение 30 секунд происходило гидродинамическое воздействие, удаляющее крупные не сплавившиеся частицы с поверхности образца. Затем, повышалось напряжение до 200В образовывалась паровоздушная оболочка

вокруг образца и в течении 2 мин происходила обработка при стабильном горении разряда.

После плазменно-электролитной обработки твердость для обоих образцов выровнялась и стала несколько выше: HRC 33 - 35 - 36 - 39 - 40.

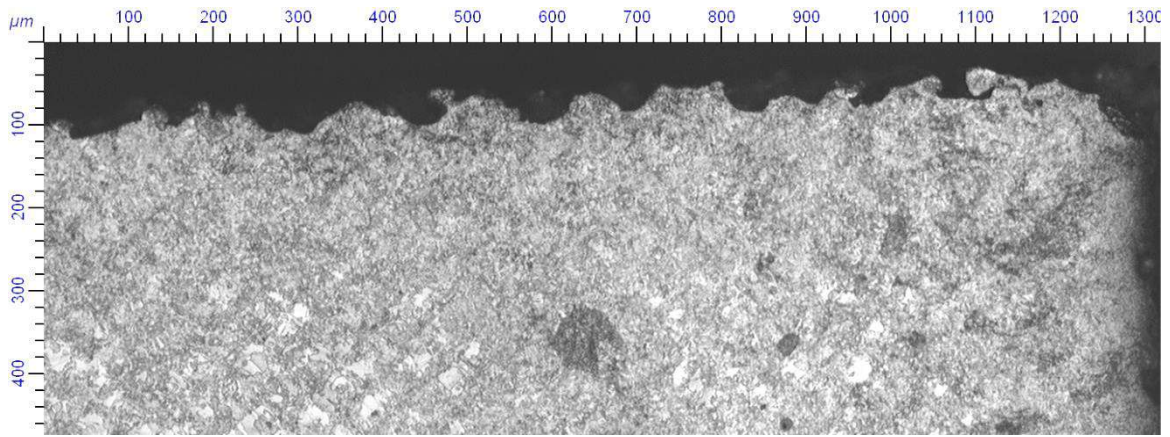
Микроисследование проводилось с помощью оптического микроскопа OLYMPUS GX-51 x25- 1000крат на микрошлифах до и после плазменно-электролитной обработки.

При визуальном осмотре при x16 кратном увеличении отмечается, что на поверхности видны направления “роста” образцов, так на боковом торце – направленность под углом 45°.

Микроструктура образцов, изготовленных сплавлением в горизонтальном (обр.№ 1) и вертикальном (обр.№ 2) направлениях в поперечном сечении по малой стороне образцов, различается морфологией структуры (см. рис. 4.7-4.10). При изготовлении микрошлифов в долевом направлении (перпендикулярно первоначальному), структура изменилась на противоположную. После плазменно-электролитной обработки структура образцов №1 и №2 одинакова т.е. у вертикально выращенного образца стала аналогичной горизонтальному.

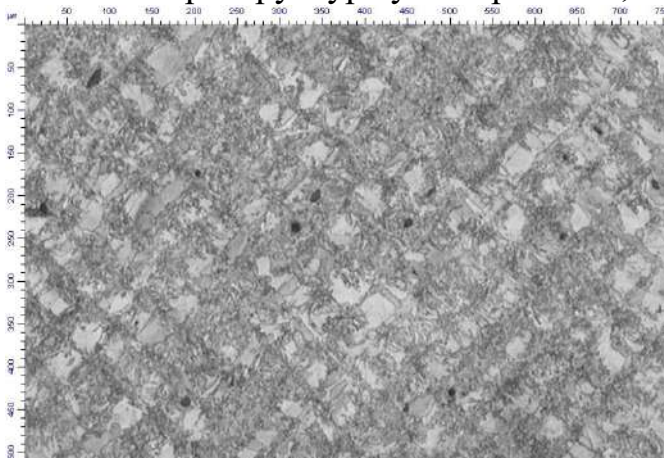
В микроструктуре образцов по сечению отмечают незначительная пористость и микровключения.

После плазменно-электролитной обработки видно окисление до 60 мкм по границам не сплавившихся гранул на поверхности (рис. 4.11).

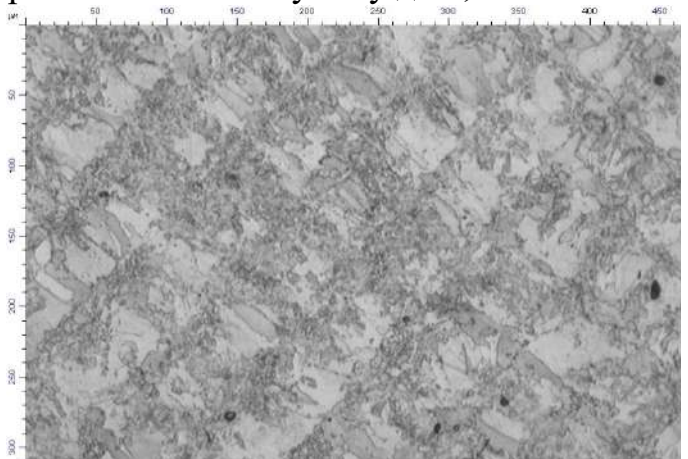


x100

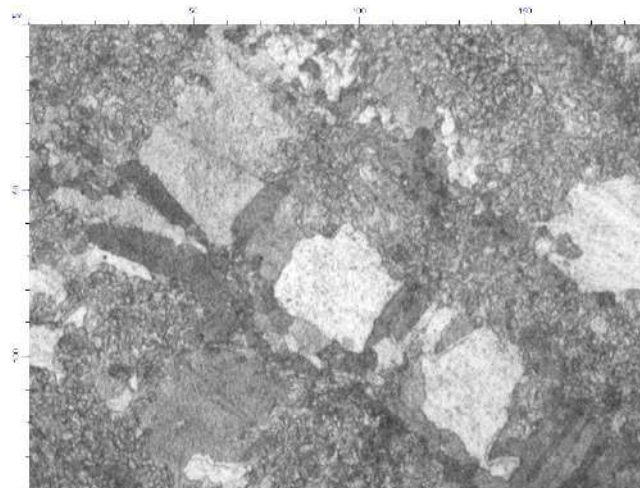
микроструктура у поверхности, шероховатость на глубину до 0,05мм



x100

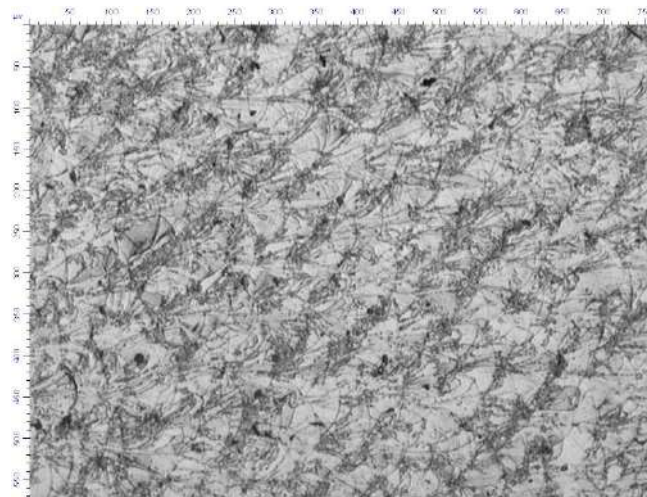


x200

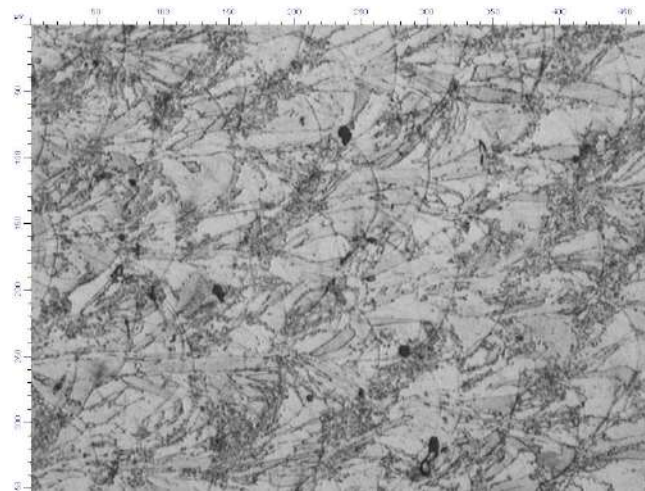


x500

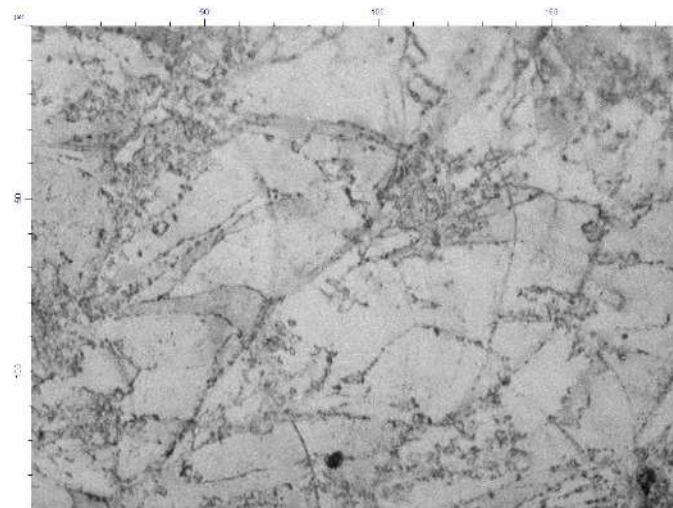
Рисунок 4.7 - Образец №1 без плазменно-электролитной обработки с вертикальным лазерным сплавлением (микрошлиф поперек образца по высоте) ячеистая структура, под углом 45)



x100

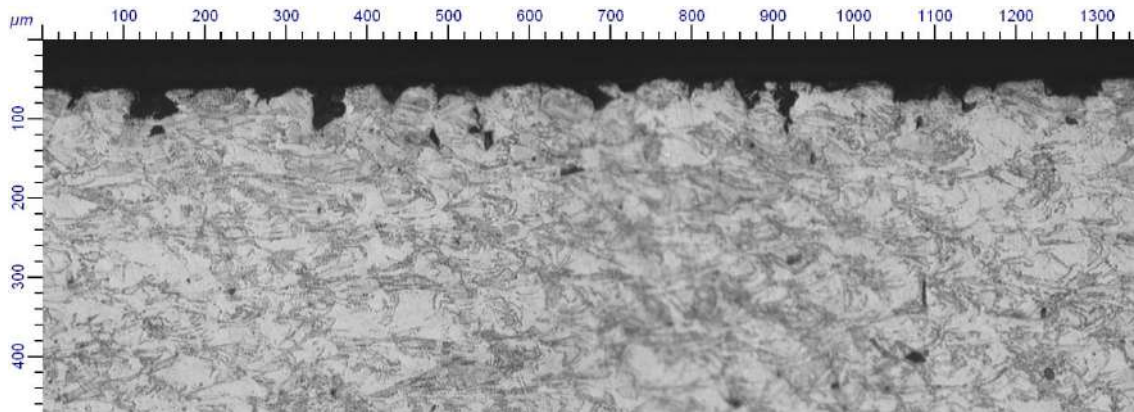


x200



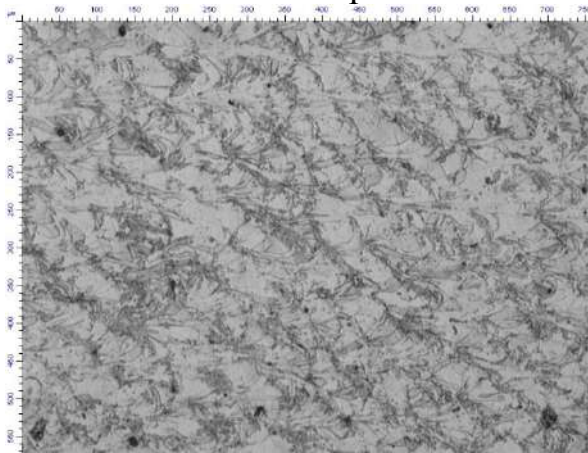
x500

Рисунок 4.8 – Образец №1 без плазменно-электролитной обработки с вертикальным лазерным сплавлением (микрошлиф вдоль образца) ячеистая структура, под углом  $45^\circ$

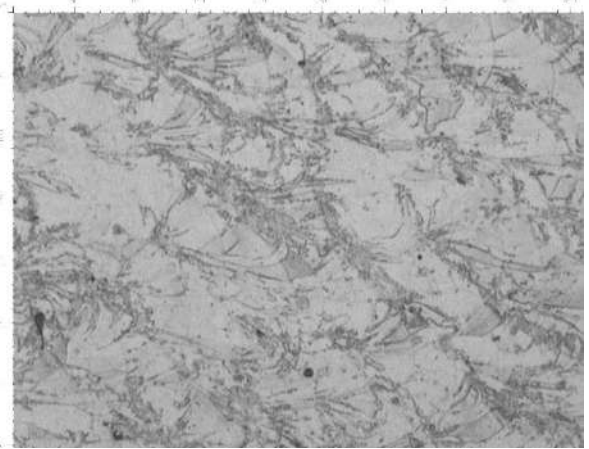


x100

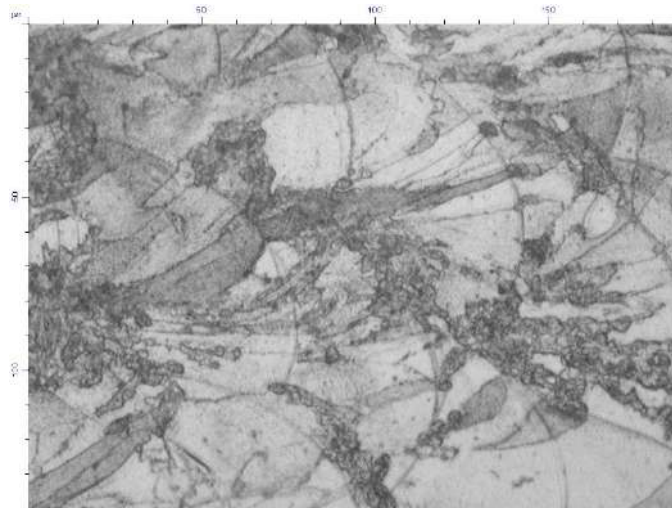
микроструктура с поверхности образца  
шероховатость на глубину до 0,05мм



x100

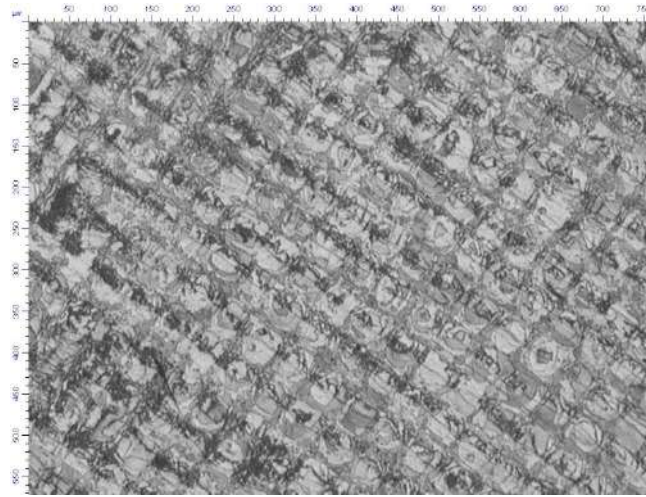


x200

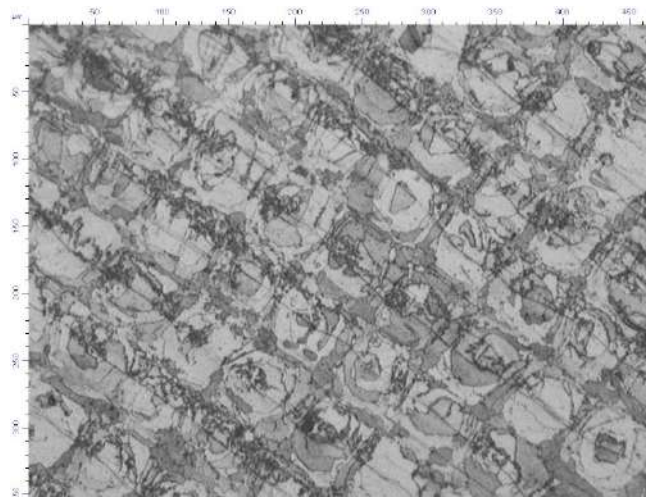


x500

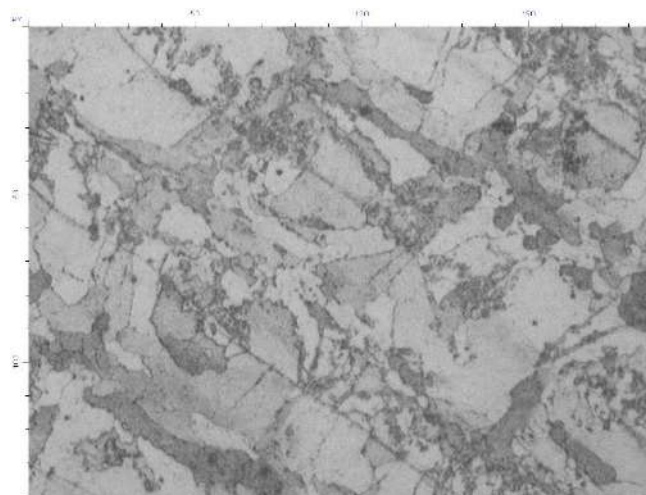
Рисунок 4.9 – Образец №2 без плазменно-электролитной обработки  
горизонтальное лазерное сплавление (микрошлиф поперек узкого торца)



x100



x200



x500

Рисунок 4.10 - Образец №2 без плазменно-электролитной обработки горизонтальное лазерное сплавление (микрошлиф в долевом направлении)



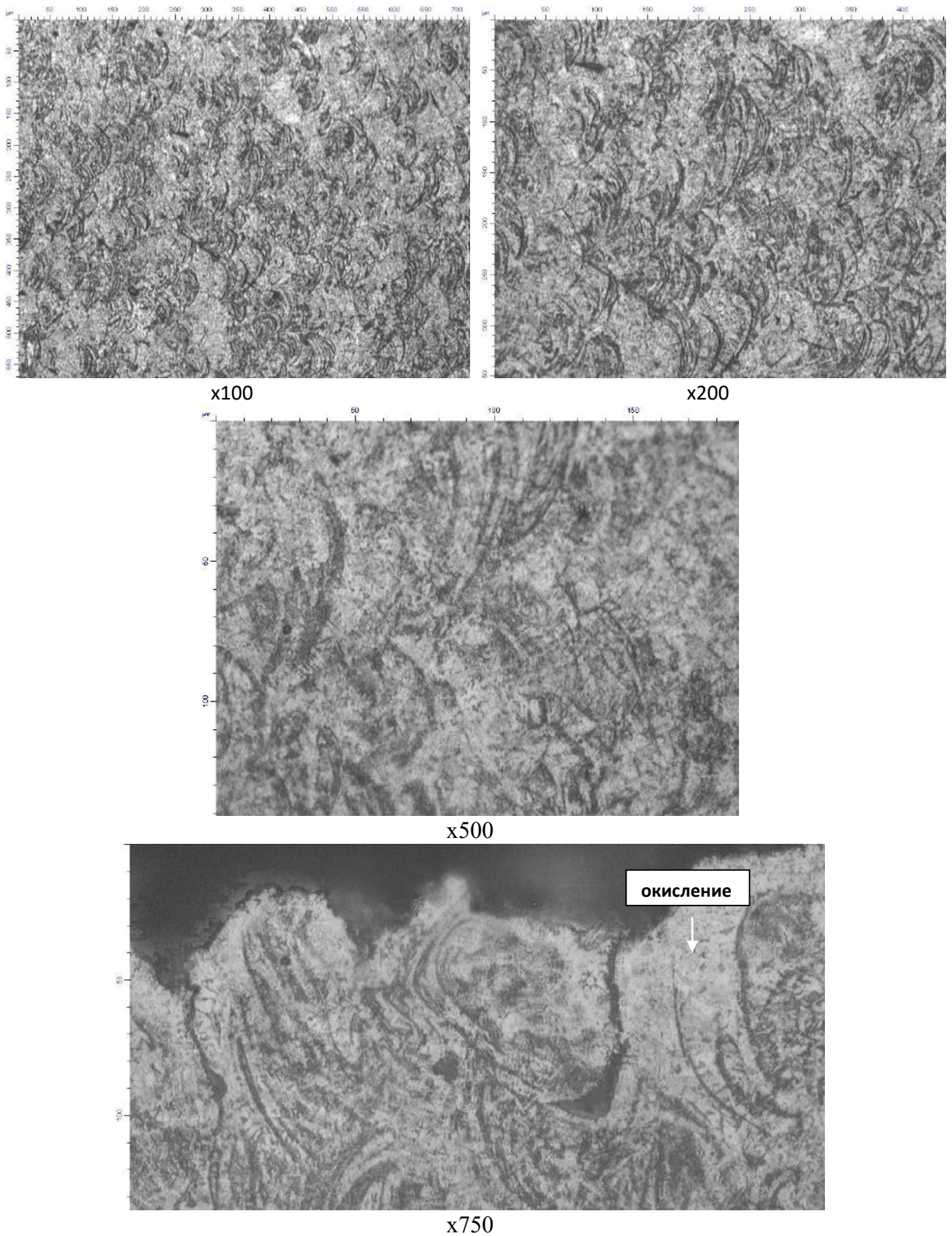


Рисунок 4.11 - Образец №2 после плазменно-электролитной обработки горизонтальное лазерное сплавление (микрошлиф в долевом направлении) с поверхности окисление по границам несплавления гранул

Используя исследовательскую систему PКТ V tome XS 240 была получена 3D-модель порового пространства образца, размером  $3 \times 3 \times 3$  мм<sup>3</sup>. На рисунках 4.12 представлено изображение компьютерной томографии сечения образца, а также трехмерная модель пористой внутренней структуры образца после процесса плазменно-электролитной полировки. Разрешение изображения (размер пикселя) было равно 3 мкм.

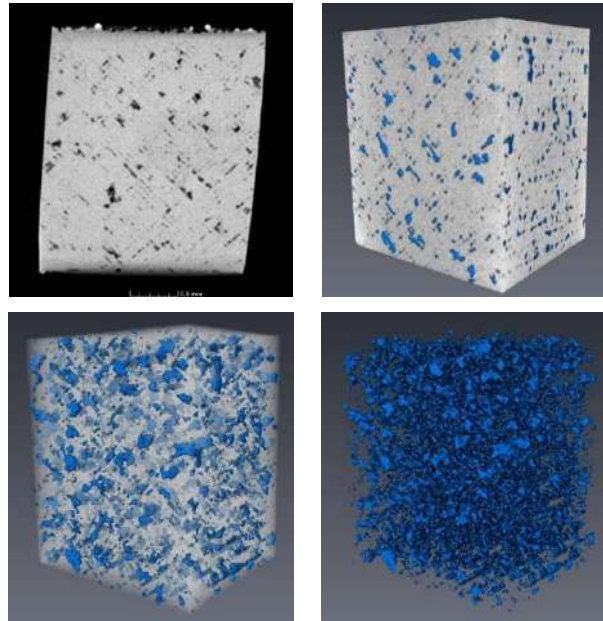


Рисунок 4.12 – Изображения пористой структуры полученные с помощью PКТ.

Таблица 4.2 - Результаты PКТ образца.

Объем порового пространства	Мин	2,51E-07	mm <sup>3</sup>
	Макс	0,00401778	mm <sup>3</sup>
	Сред	4,38E-05	mm <sup>3</sup>
	Сумм	0,32462828	mm <sup>3</sup>
Общий объем образца		7,902452	mm <sup>3</sup>
% соотношение объема порового пространства к общему объему образца		4,107943712	%
Количество пор в исследуемом объеме образца		7410	

В таблице 4.2 представлены полученные результаты РКТ образца. В процессе изучения томографии было определено, что поровое пространство занимает **4.1%**. Были также измерены размеры этих поровых пространств.

На дифрактометре BRUKER D8 Avance были получены фазовые структуры образцов. Эти данные на рисунках 4.13 и 4.14.

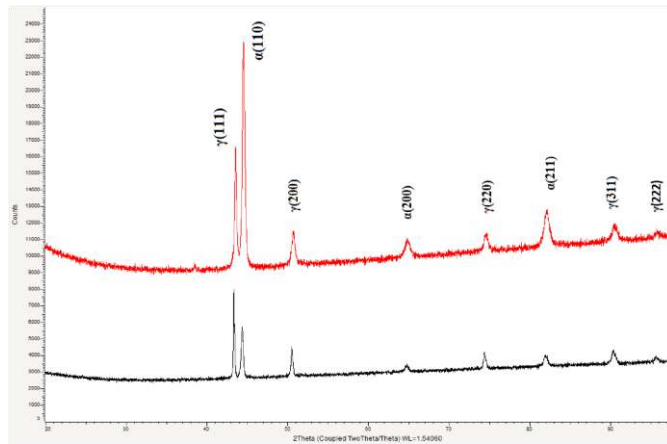


Рисунок 4.13 – Фазовый состав нержавеющей стали 17-4 PH (красная линия) и образца до плазменно-электролитной обработки (черная линия).

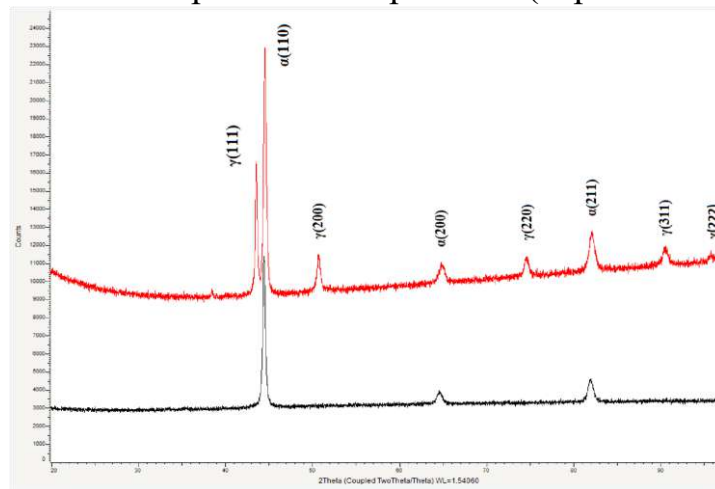


Рисунок 4.14 – Фазовый состав нержавеющей стали 17-4 PH (красная линия) и образца после плазменно-электролитной обработки (черная линия).

Было определено, что значительно уменьшилась интенсивность α-фазы и наблюдается схожая система рефлексов при сравнении металлического порошка и СЛС-изделия. Интенсивность γ-фаза не изменилась. γ-фаза

исчезает после плазменно-электролитной обработки, соответственно, в результате плазменно-электролитной обработки, произошел отпуск, который и привел к образованию мартенсита ( $\alpha$ -фазы) из аустенита ( $\gamma$ -фазы).

В то же время, в результате полученных данных на дифрактометре было определено, что фазовый состав исходного порошка аналогичен фазовый состав образца до плазменно-электролитной обработки. А в результате плазменно-электролитной обработки произошел переход аустенита в мартенсит и произошла перестройка кристаллической решетки гамма-железа в решетку альфа-железа [128].

На рисунках 4.15-4.17 представлены данные, полученные с помощью СЭМ.

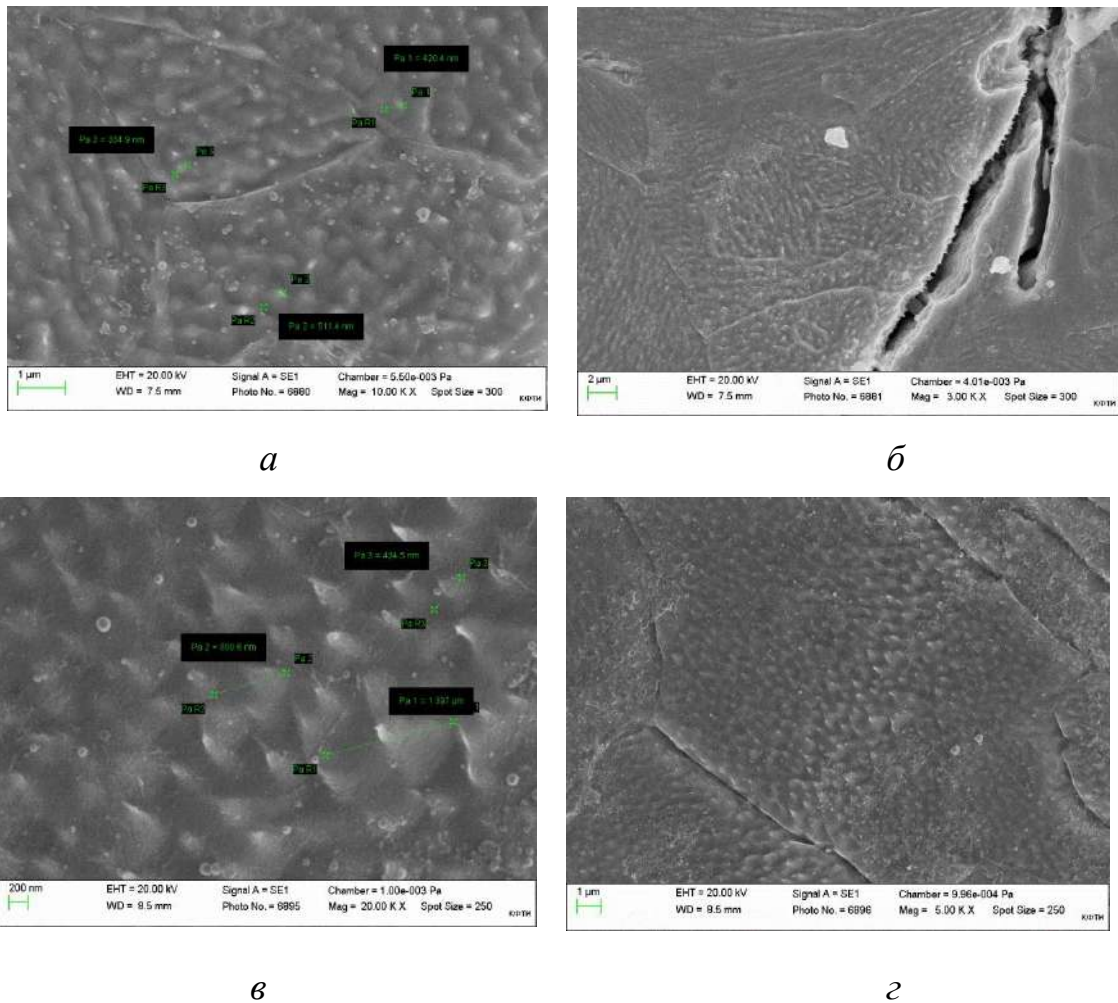


Рисунок 4.15 – Металлический образец типа I до плазменно-электролитной обработки. Наблюдается зернистая микроструктура образца (*б*, *г*). Размеры варьируются 300 -1300 нм (*а*, *в*).

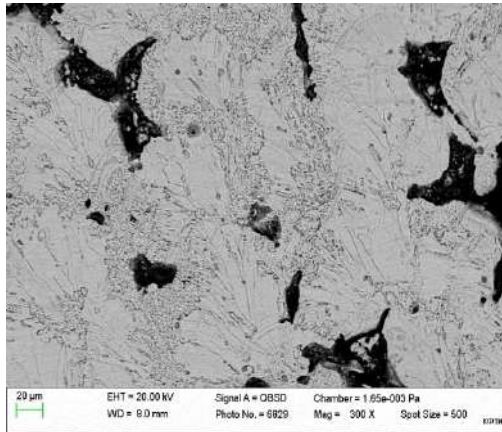
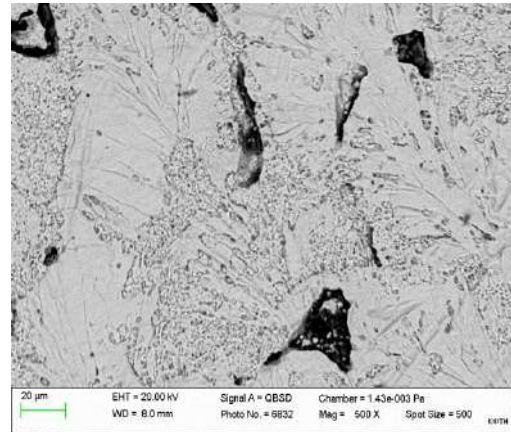
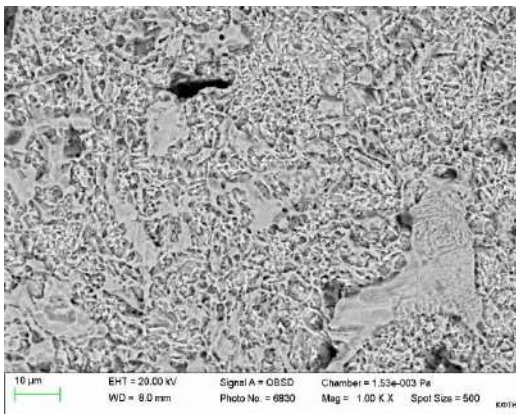
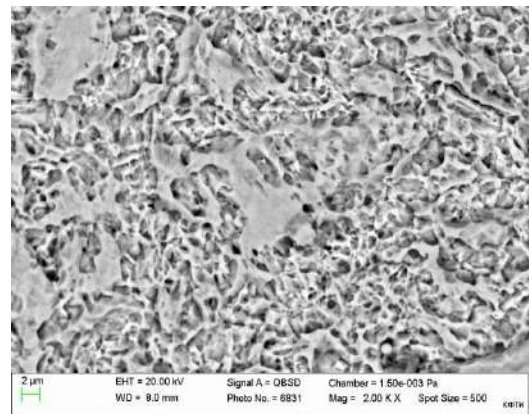
*a**б**в**г*

Рисунок 4.16 – Снимки металлического образца типа II (*a*, *б*, *в*, *г*) до плазменно-электролитной обработки.

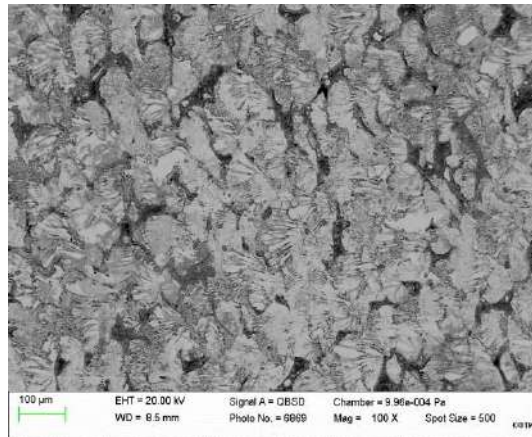
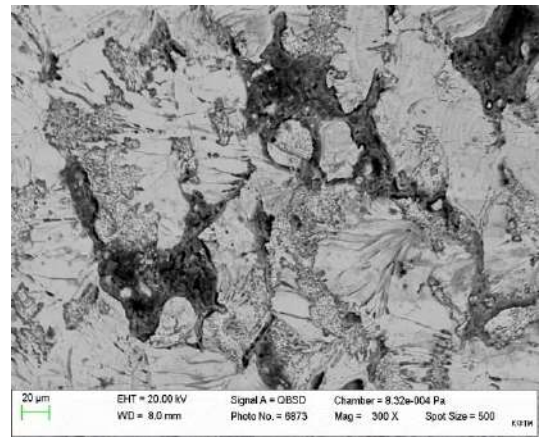
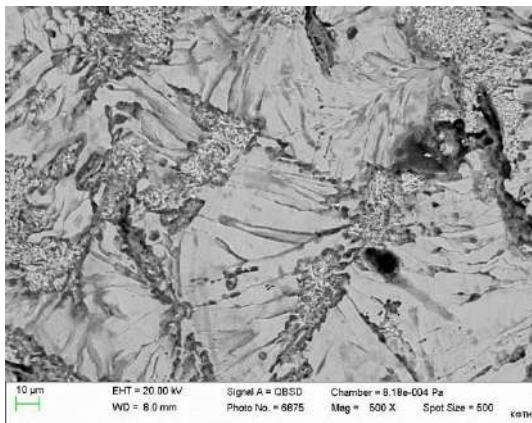
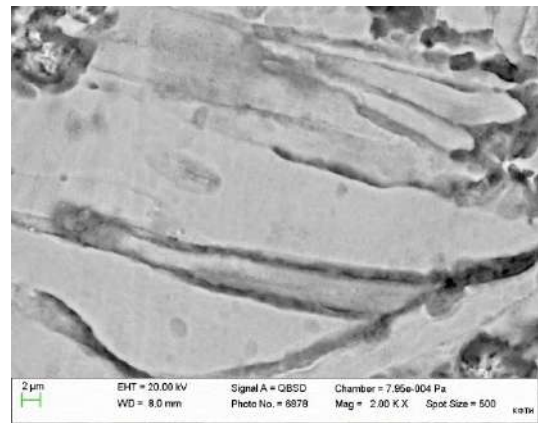
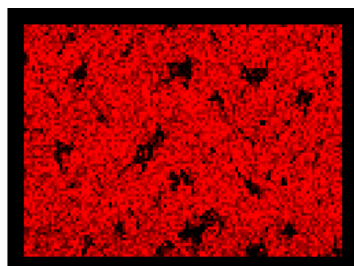
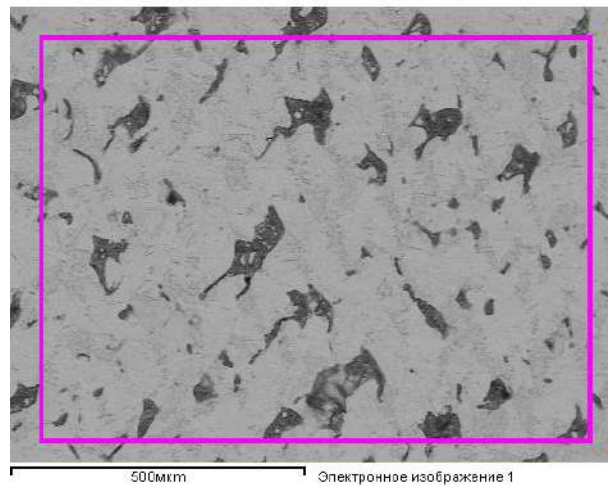
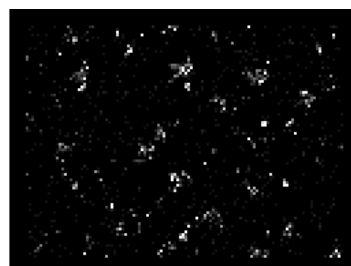
*a**б**в**г*

Рисунок 4.17 – Снимки металлического образца типа II (*a*, *б*, *в*, *г*) после плазменно-электролитной обработки.

Результаты распределения химического состава на поверхности образцов представлены на рис. 4.18 – 4.20. Все данные получены с поверхности  $50 \times 10 \text{ мм}^2$  образца. Все образцы были химически стравлены.



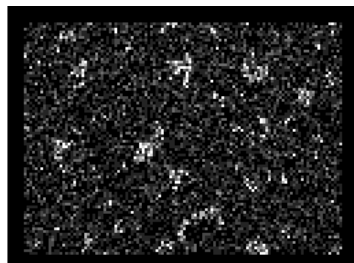
Fe Ka1



Al Ka1



Cr Ka1



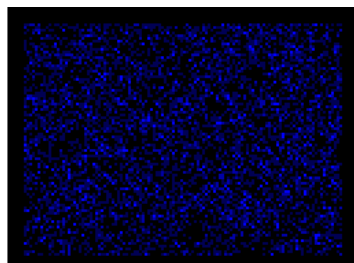
O Ka1



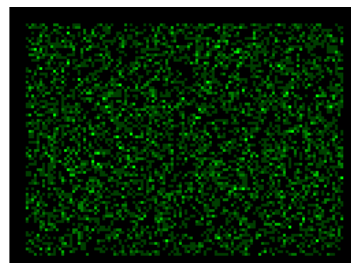
Si Ka1



C Ka1\_2



Ni Ka1

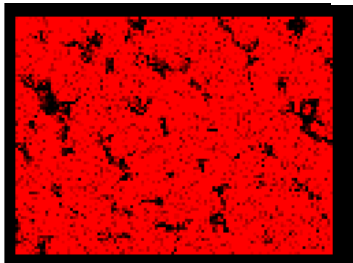
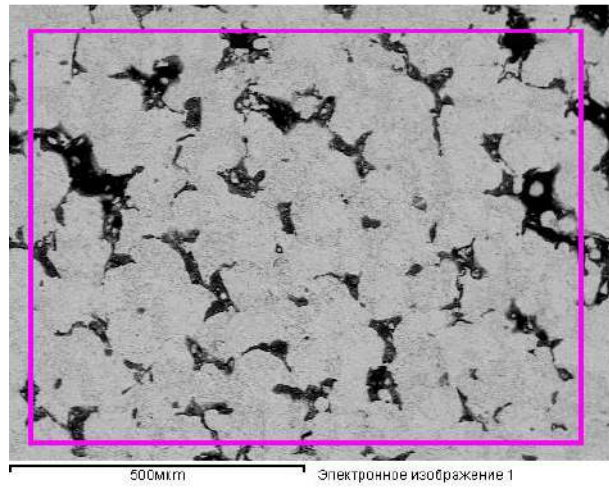


Cu Ka1

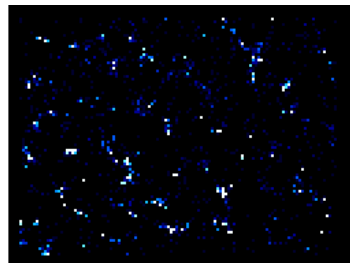


Mn Ka1

Рисунок 4.18 - Образец типа I, без плазменно-электролитной обработки



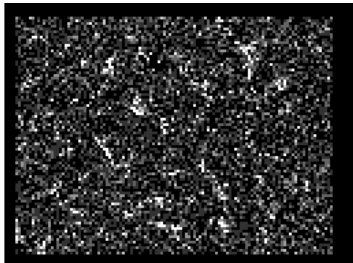
Fe Ka1



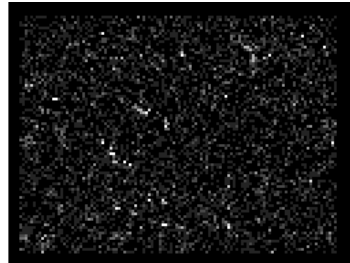
Al Ka1



Cr Ka1



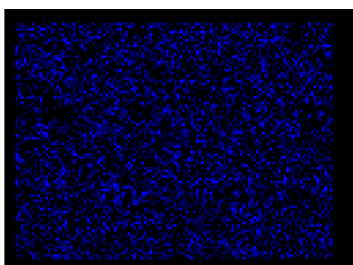
O Ka1



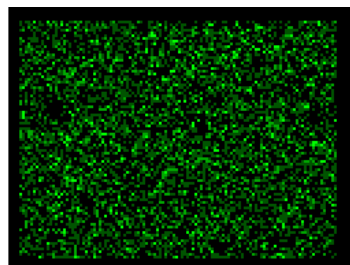
Si Ka1



C Ka1\_2



Ni Ka1



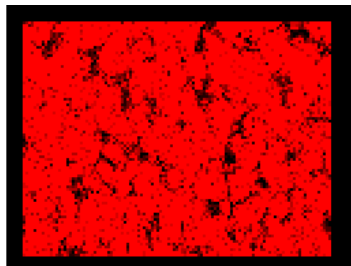
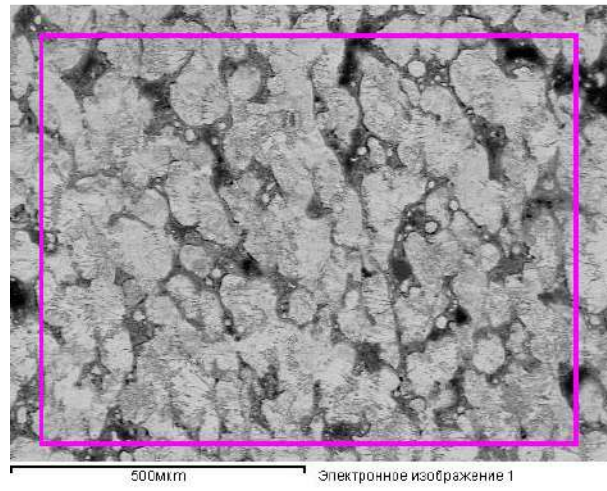
Cu Ka1



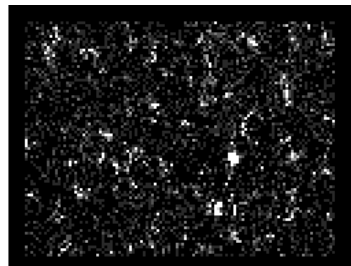
Mn Ka1

Рисунок 4.19 - Образец типа II, без плазменно-электролитной обработки

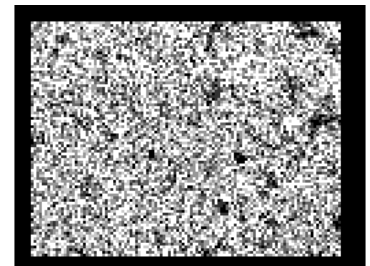




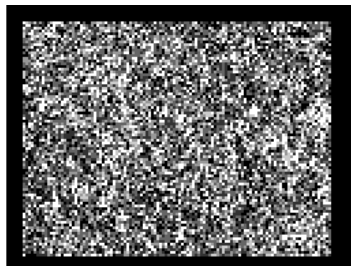
Fe Ka1



Al Ka1



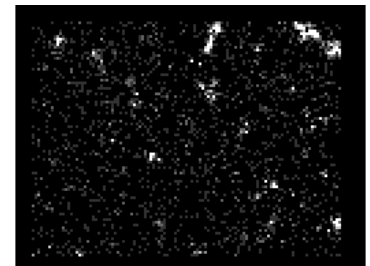
Cr Ka1



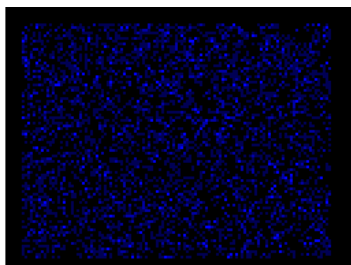
O Ka1



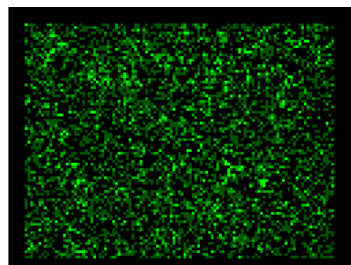
Si Ka1



C Ka1\_2



Ni Ka1



Cu Ka1



Mn Ka1

Рисунок 4.20 - Образец типа I, после плазменно-электролитной обработки

### 4.3 Исследование физико-механических характеристик

В рамках исследования механических свойств были рассмотрены прямоугольные образцы размерами  $L \times b \times h$ . Образцы были двух типов: тип I – выращенные по размеру  $L \times h$ ; тип II – выращенные по размеру  $b \times h$  (рисунок 4.21). В таблице 4.3 приведены средние значения, измеренных размеров образцов,  $L_p$  – рабочая длина образцов (расстояние между зажимами при испытаниях).

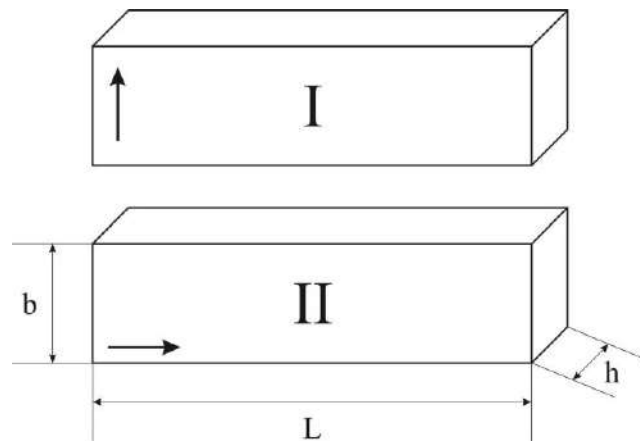


Рисунок. 4.21 - Образцы для испытания, стрелками указано направления роста

Таблица 4.3 - Средние значения измеренных размеров образцов

Образец		$L$ (мм)	$L_p$ (мм)	$b$ (мм)	$h$ (мм)
Тип I	1	49,8	39,0	13,2	2,7
	2	50,0	32,0	13,2	3,1
	3	50,1	33,0	13,2	3,1
Тип II	1	49,8	31,0	9,8	2,9
	2	50,3	31,0	9,8	2,8
	3	50,6	30,0	9,9	2,9

Образцы подвергались измерению и испытанию на растяжение. Испытания проводились вплоть до разрушения, после чего исследовались место и форма излома. Испытания проводились на универсальной двухзонной испытательной машине (модель УТС 110М-100 напольного исполнения,

сертификат об утверждении типа средств измерений № 34879). Диапазон измеряемых нагрузок, кН: 0,001–100; погрешность измерения нагрузки  $\pm 1\%$  (0,5)% от показания вплоть до 1/100 от величины допустимой нагрузки тензодатчика. В результате испытаний производилась запись перемещения подвижной траверсы, прикладываемой силы и времени. На основании полученных данных были построены дигарамы разрушения (см. рисунок 4.23; 4.24).

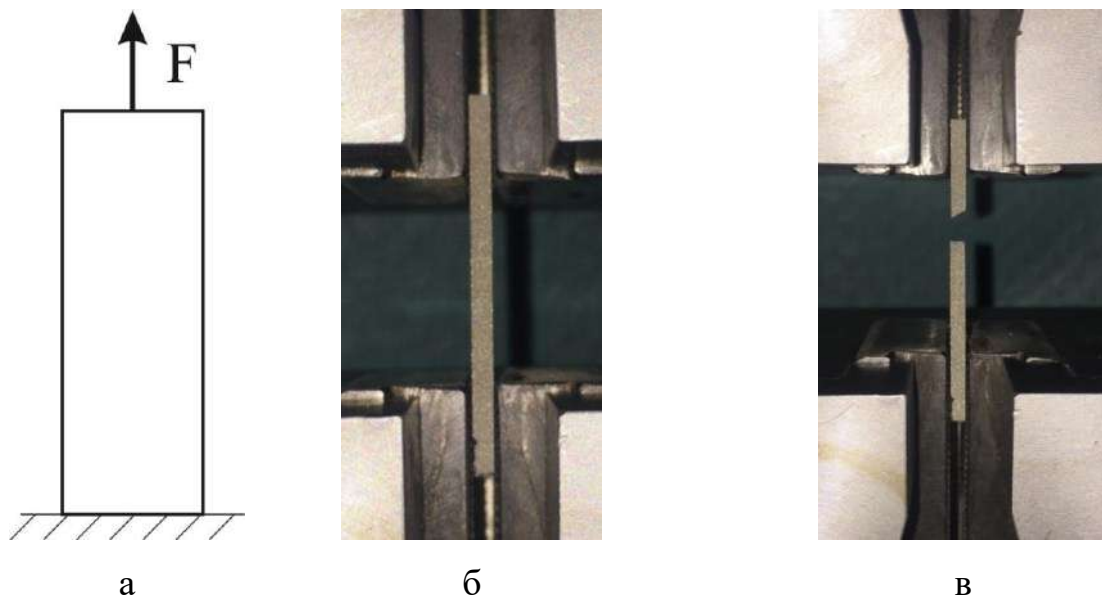


Рисунок 4.22 - Испытания: а) расчетная схема, б) образце в испытательной машине, в) образец после разрушения

Для растяжения при достаточной длине образца (поперечный габарит отнесенный к длине порядка 1/5) можно считать нормальные напряжения постоянными по длине и равными

$$\sigma = F / A, \quad (4.1)$$

где  $F$  – прикладываемая сила,  $A$  – площадь поперечного сечения.

Продольные деформации в этом случае можно подсчитать по следующей формуле:

$$\varepsilon = \Delta L / L_p, \quad (4.2)$$

где  $\Delta L$  – удлинение образца,  $L_p$  – рабочая длина.

Для построения диаграмм производился пересчет результатов в деформации и напряжения по вышеуказанным формулам. Для двух типов образцов диаграммы разрушения имели характерный для хрупких материалов вид [129] (см. рис. 4.23, 4.24), то есть без характерного начального линейного участка, без площадки текучести и нелинейного участка. При этом, однако, наибольшие удлинения находились в диапазоне 30-35%, что напротив характерно для пластичных материалов [129]. Линейный участок диаграммы дифференцировался после удлинения 5% и вплоть до разрушения (см. рис.4.23). На линейном участке связь между нормальным напряжением и продольной деформацией представима в следующем виде (закон Гука):

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \quad (4.3)$$

где  $E$  – модуль Юнга образца.

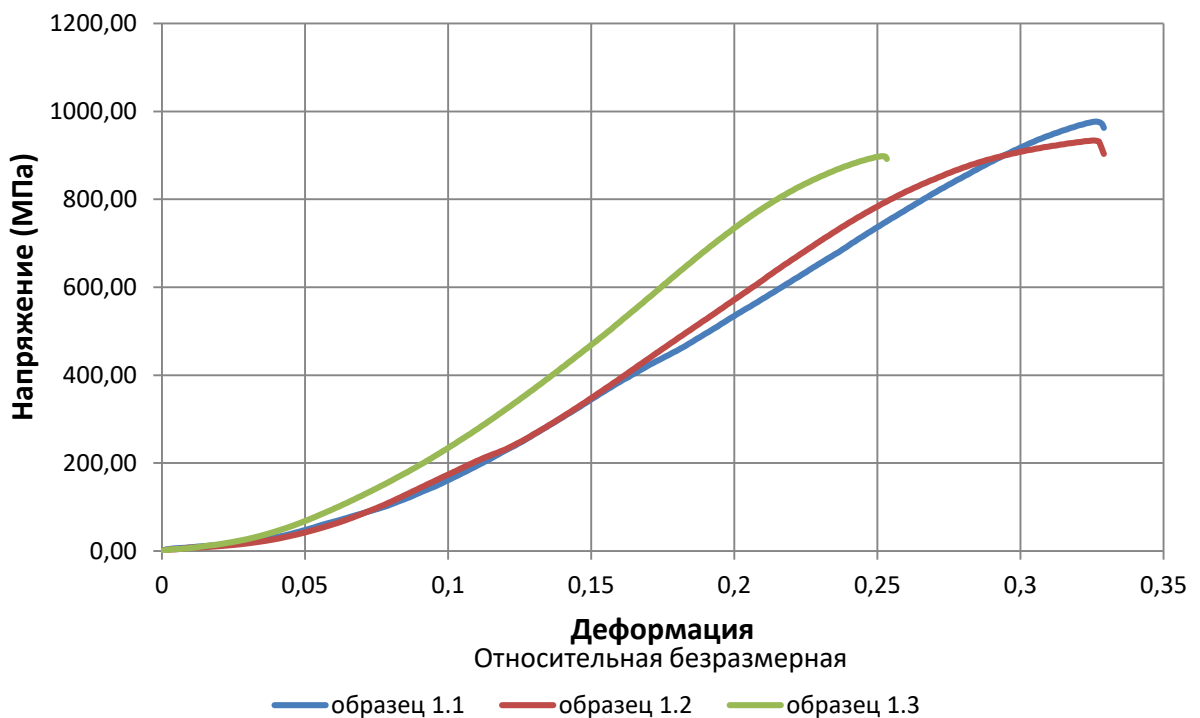


Рисунок. 4.23 - Диаграмма разрушения для образцов I типа

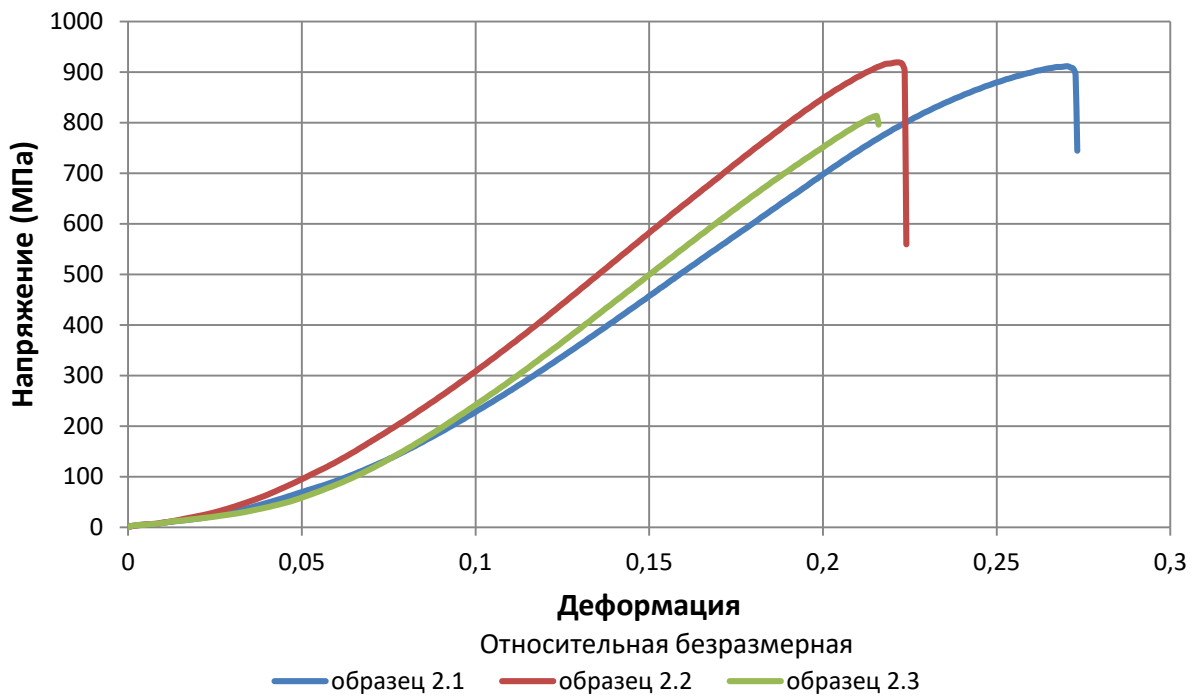


Рисунок 4.24 - Диаграмма разрушения для образцов II типа

Определение линейного участка проводилось на основе метода наименьших квадратов. Критерием линейности участка является оценка превышение заданной величины достоверности аппроксимации:  $R^2 > 0.99$ . На рисунке 4.25 проиллюстрирован линейный участок на диаграмме. В таблице 4.4 приведены величины модуля Юнга и величины достоверности аппроксимации.

Таблица 4.4- Результаты вычислений величины модуля Юнга и величины достоверности аппроксимации

№	тип I		тип II	
	E (МПа)	R <sup>2</sup>	E (МПа)	R <sup>2</sup>
1	3746	0,9976	4441	0,9968
2	4048	0,9958	4999	0,9945
3	4772	0,9958	4739	0,9931
Сред	4189		4726	

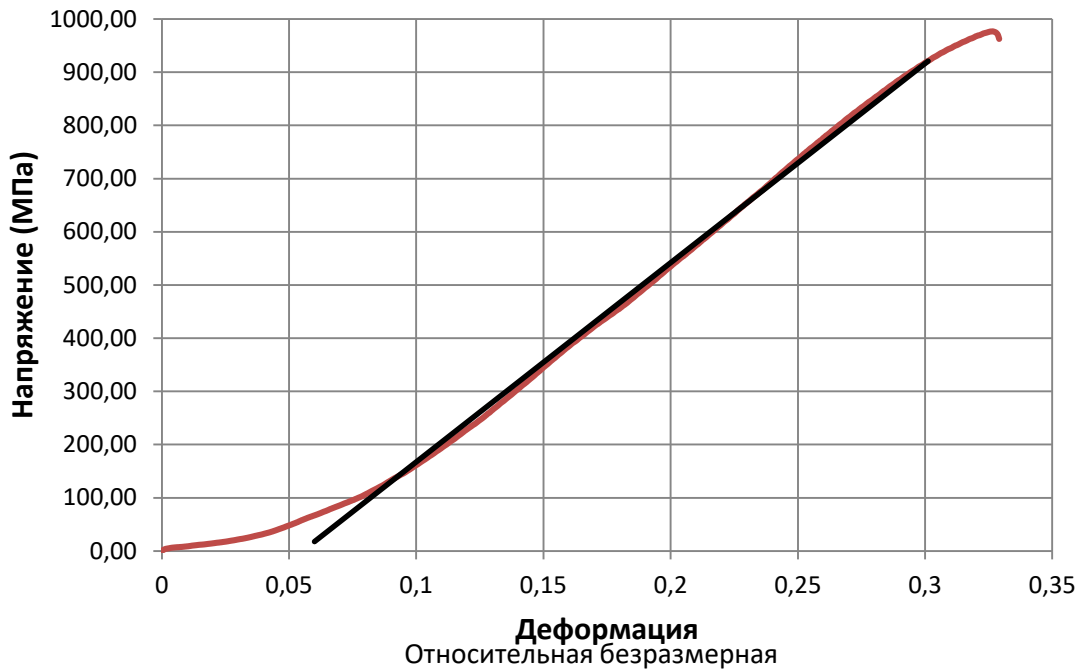


Рисунок. 4.25 - Пример аппроксимации линейного участка для диаграммы разрушений

Из рисунка 4.25 видно, что используемый подход к определению модуля Юнга дает завышенный результат, ввиду того, что линейный участок начинает работать с 5% деформации, при этом напряжения менее 50 МПа, а стало быть этот участок не имеет инженерного интереса.

Для определения допустимых напряжений на диаграмме бралась наивысшая точка (наибольшие напряжения):

$$[\sigma] = \max_{0 < \varepsilon < \varepsilon_{\max}} \sigma \quad (4.4)$$

Результаты приведены в таблице 4.5.

На основании полученных данных можно заключить, что для образцов типа 1 модуль Юнга составляет 4189 МПа, предел прочности 936,35 МПа; для образцов типа 2 модуль Юнга составляет 4726 МПа, предел прочности 881,19 МПа. Отличие модуля Юнга при различных направлениях печати составило

11%, а для предела прочности - 6%, при этом образцу с большой жесткостью соответствует меньшая прочность.

Таблица 4.5 - Результаты вычислений допустимых напряжений

	тип 1	тип 2
№	[ $\sigma$ ] (Мпа)	
1	977,024	911,24
2	933,945	919,34
3	898,093	813
Сред	936,35	881,19

Максимальное касательное напряжение для данной точки возникает на площадке, расположенной под углом  $45^\circ$  к главным площадкам, на которых действуют напряжения  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ . Абсолютное значение максимального касательного напряжения вычисляется по формуле:

$$\tau_{\max} = |\sigma_1 - \sigma_2| / 2, \quad (4.5)$$

В рамках проведенных испытаний  $\sigma_1 = \sigma$ ,  $\sigma_2 = 0$ .

Стоит отметить, что при разрушении характер поверхности отрыва был пластического типа, то есть поверхности были под углом  $45^\circ$  (разрушение происходит под действием наибольших касательных напряжений, см. Рис. 4.26 а, 4.26 б), что характерно для пластичных материалов. При этом для образцов второго типа был замечен малый участок на котором разрушение происходит по наибольшим нормальным напряжениям (см. Рисунок 4.26 в, 4.26 г).

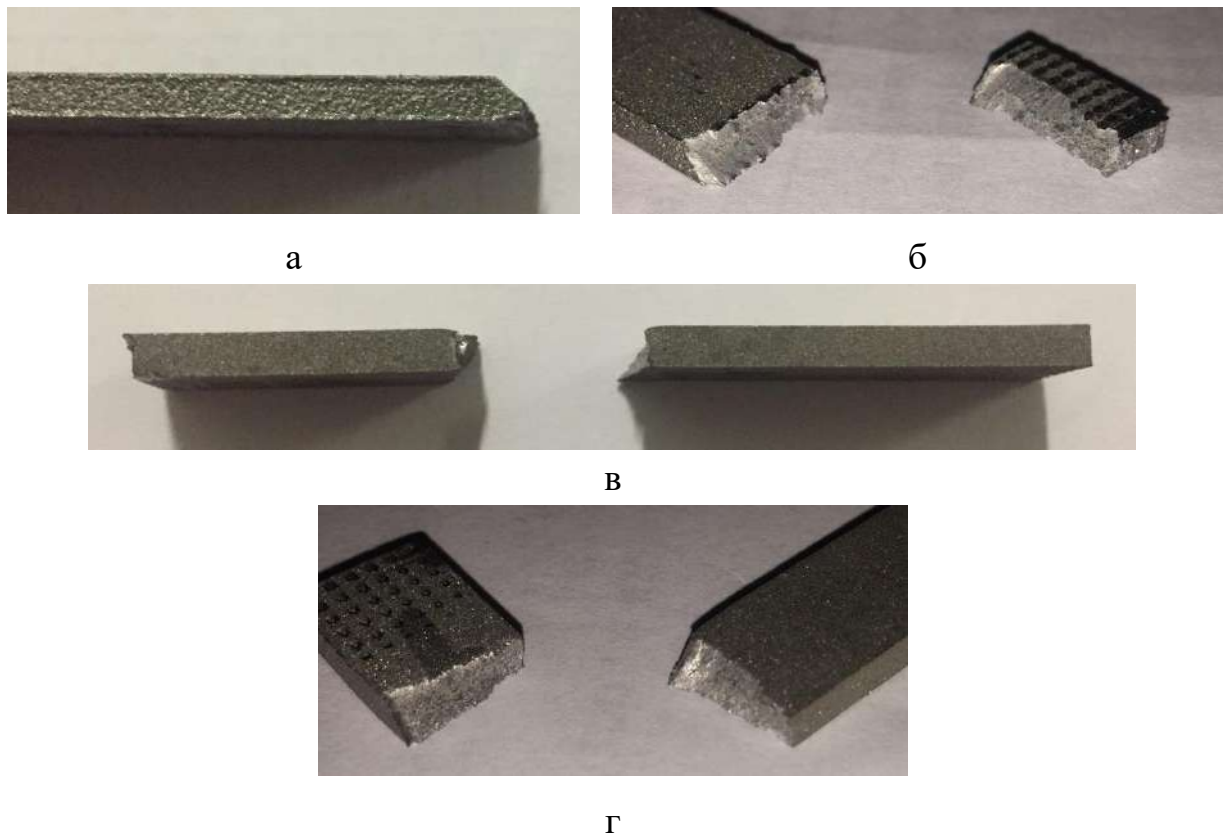


Рисунок 4.26 - Образцы после разрушения: а) и б) – образцы I типа; в) и г) – образцы II типа.

Также были проведены дополнительные исследования:

Для образца типа I были получены следующие результаты (таблица 4.6).

Таблица 4.6 – Результаты измерений допустимых (предельных) напряжений и модуля Юнга для образца типа I

номер файла	$[\sigma]$ (МПа)	Модуль Юнга (МПа)	Достоверность аппроксимации	Удлинение
2	1043	3524	0,9914	0,43
9	768	3656	0,9879	0,28
10	713	3536	0,9865	0,25
Среднее	841,3333	3572		0,32
Стандартное отклонение	176,8003	72,99315		0,096437



## Продолжение Таблицы 4.6

Половина довер. интервала	167,8996	69,31843		0,091582
---------------------------------	----------	----------	--	----------

Можно заключить, что для образца предел прочности составляет  $841 \pm 168$  МПа, модуль Юнга  $3572 \pm 70$  МПа, удлинение  $32\% \pm 9\%$ .

Были исследованы образцы после отпуска при разных температурах (см. таблицу 4.7). Было замечено резкое падение предельных напряжений, при этом модуль Юнга изменялся незначительно.

Таблица 4.7- Результаты исследований образцов после отпуска при разных температурах

номер файла	[ $\sigma$ ] (МПа)	Модуль Юнга (МПа)	Достоверность аппроксимации	Удлинение	Температура (С)
3	694	3532	0,99	0,27	610
5	674	3560	0,9924	0,23	900
4	480	3300	0,9872	0,21	1150

Величины относительно изменения механических параметров приведены в таблице 4.8. Знак «минус» обозначает, что измеряемый параметр уменьшался при термической обработке.

Таблица 4.8 - Величины относительно изменения механических параметров

Температура (С)	Отклонение [ $\sigma$ ]	Отклонение модуля Юнга	Отклонение удлинения
0	-	-	-
610	-18%	-1,12%	-16%
900	-20%	-0,34%	-28%
1150	-43%	-7,61%	-34%

Можно заключить, что при отпуске прочность образцов снижается значительно, жесткость незначительно, также снижается пластичность материала – уменьшается удлинение образца. Хотя для сталей при отпуске характерно повышение вязкости и пластичности, уменьшение твердости, снижение внутренних напряжений.

Столь малый модуль Юнга и разница в жесткости при различном направлении спекания может быть объяснена наличием двухфазности или пористости; различие в величинах жесткости при различном направлении печати в материале может быть пояснено наличием осей ортотропии (ортотропия - неодинаковость физических свойств среды в разных ортогональных направлениях). Предположим, что существуют некоторые вложения, а направление печати порождает ортотропию. Введем понятия относительного объема арматуры, матрицы и пористости:

$$v_a = \frac{V_a}{V}, v_m = \frac{V_m}{V}, p = \frac{V_p}{V}, \quad (4.6)$$

где  $V$  – объем всего образца,  $V_a$  – объем армированной части,  $V_m$  – объем матрицы,  $V_p$  – объем пор. Очевидно равенство:  $v_a + v_m + p = 1$ .

Модуль Юнга вдоль направления армирования можно определить по формуле смеси:

$$E_1 = E_a \cdot v_a + E_m \cdot v_m, \quad (4.7)$$

где модули упругости арматуры и матрицы:  $E_a, E_m$ .

Тогда предполагая, что одна фаза – армирование суть сталь, а причиной наличия ортотропии является неравномерность спекания между слоями, можно отнести образцы типа II к рассматриваемой модели. Подставляя в выражение значения для стали, можно получить оценочную диаграмму для относительного объема и жесткости второй фазы в зависимости от пористости, представленную на рисунке 4.27.

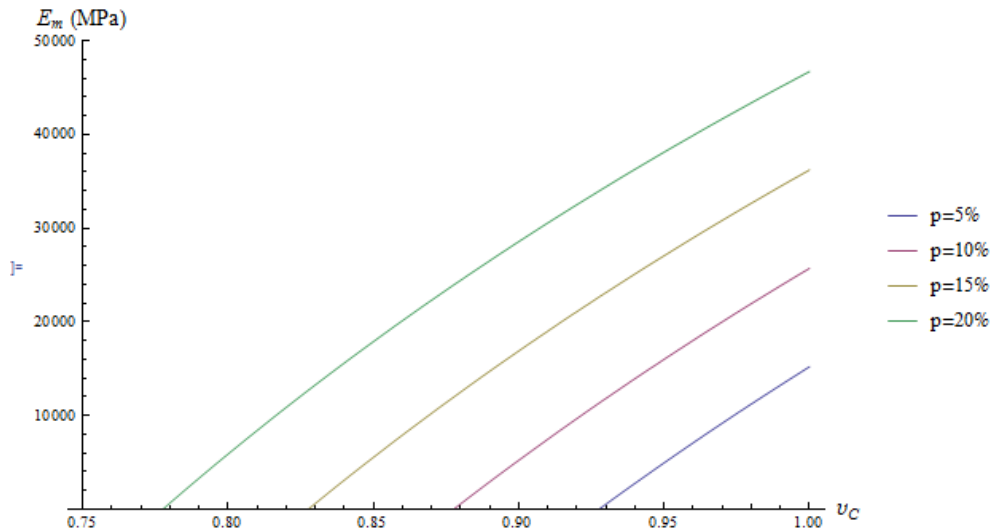


Рисунок. 4.27 - Характеристики модуля Юнга второй фазы ( $E_m$ ) в зависимости от относительного объема ( $v_m$ ) при постоянной пористости  $p$ .

#### 4.4 Исследование морфологии поверхности СЛС-деталей энергетических установок

На рисунках 4.28-4.30 представлены данные исследований поверхности образцов, полученные с оптического микроскопа.

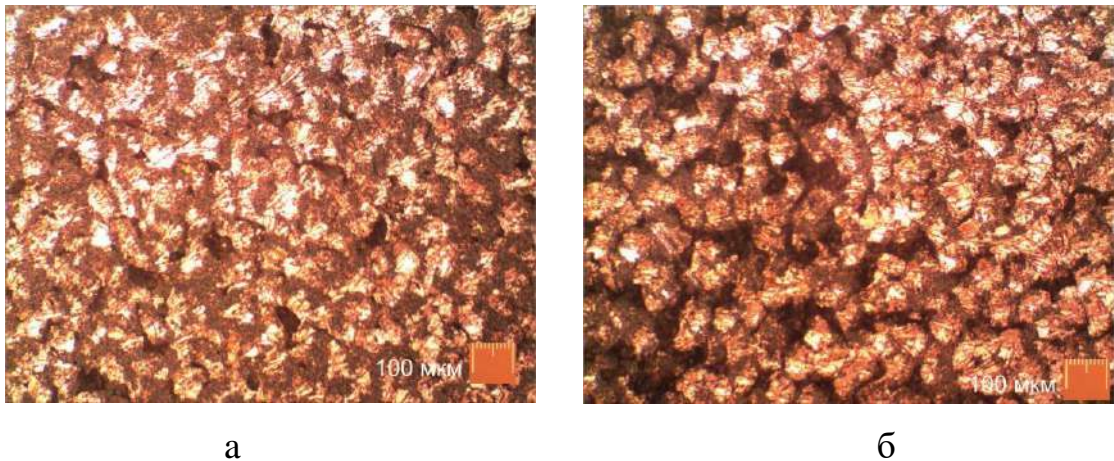


Рисунок 4.28 – Снимки металлического образца типа II до плазменно-электролитной обработки. Наблюдается наличие порового и практически беспорового пространства на поверхности образца. а) беспоровая поверхность, б) поровая (в левой части фотографии) и (условно) беспоровая поверхность (в правой части фотографии). Увеличение  $\times 10$ .

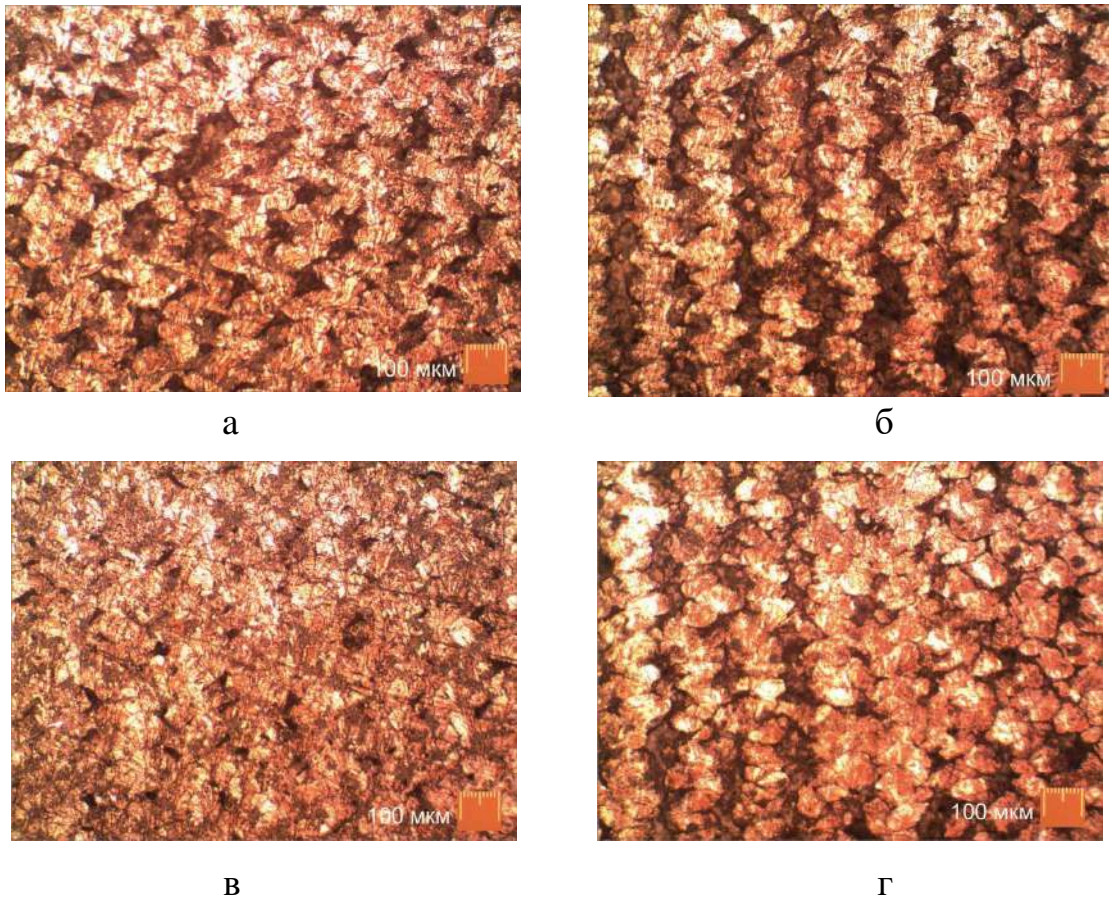


Рисунок 4.29 – Поверхность металлического образца типа I до процесса плазменно-электролитной обработки («дорожки светлого контраста»). Наблюдается различия в направлениях прохождения лазера в процессе селективного лазерного сплавления наклонные (а) и вертикальные (б, в) дорожки). г) место смены направления прохождения луча лазера (стык наклонных и вертикальных дорожек).

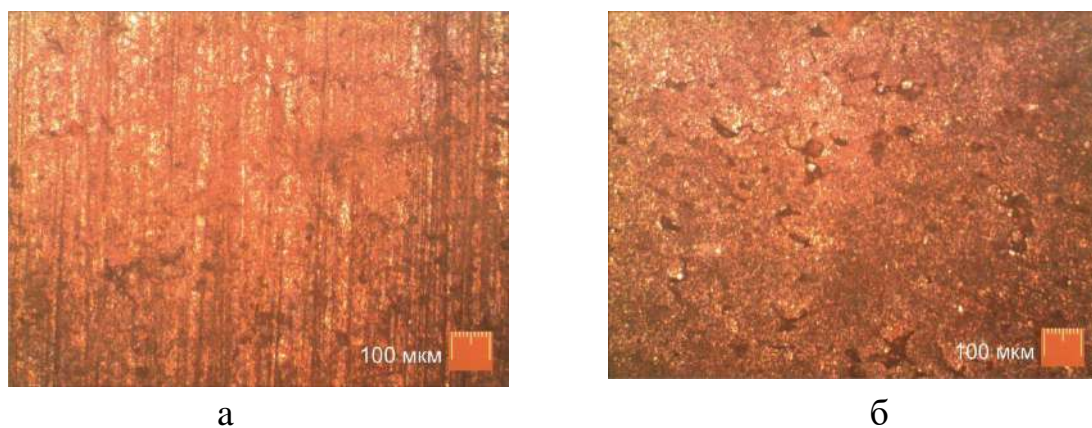


Рисунок 4.30 – Поверхность металлических образцов типа I после плазменно-электролитной обработки. Наблюдается значительное уменьшение поровых участков на поверхности образца (а,б).

На рисунках 4.31 и 4.32 представлены данные о шероховатости поверхности образцов, полученные с помощью измерителя шероховатости TR200.

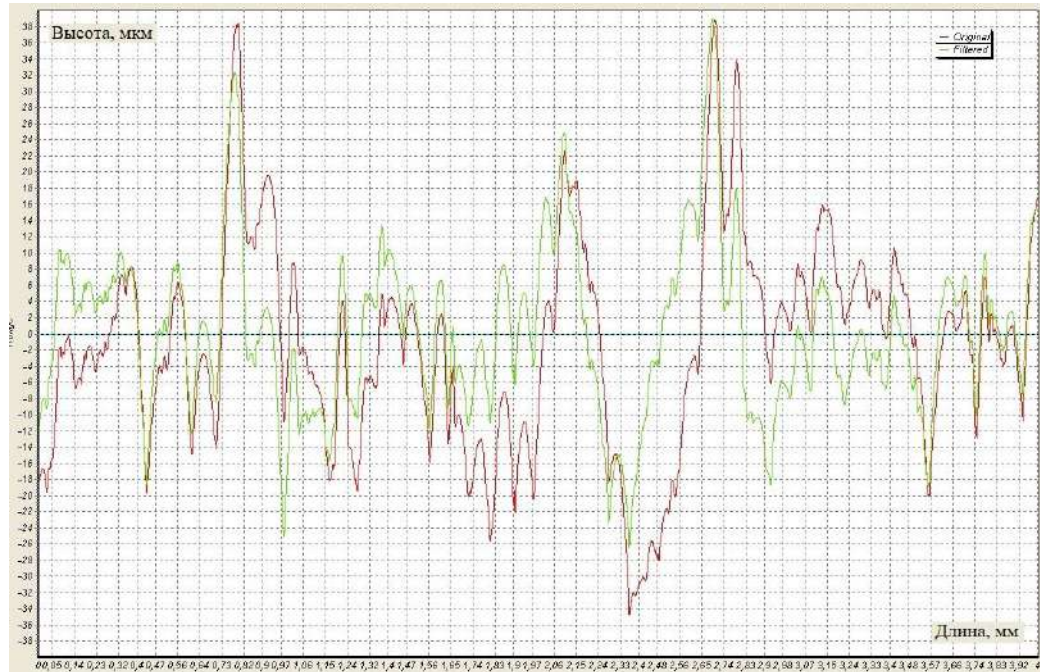


Рисунок 4.31 – Образец типа I до проведения плазменно-электролитной обработки. Параметры шероховатости:  $R_a=7.062$  мкм,  $R_y=50.82$  мкм,  $R_z=20.93$  мкм,  $R_m=22.05$  мкм,  $R_q=10.29$  мкм,  $R_p=28.77$  мкм,  $R_t=66.95$  мкм,  $S=0.1538$  мм,  $S_m=0.2105$  мм,  $S_k=0.763$ .

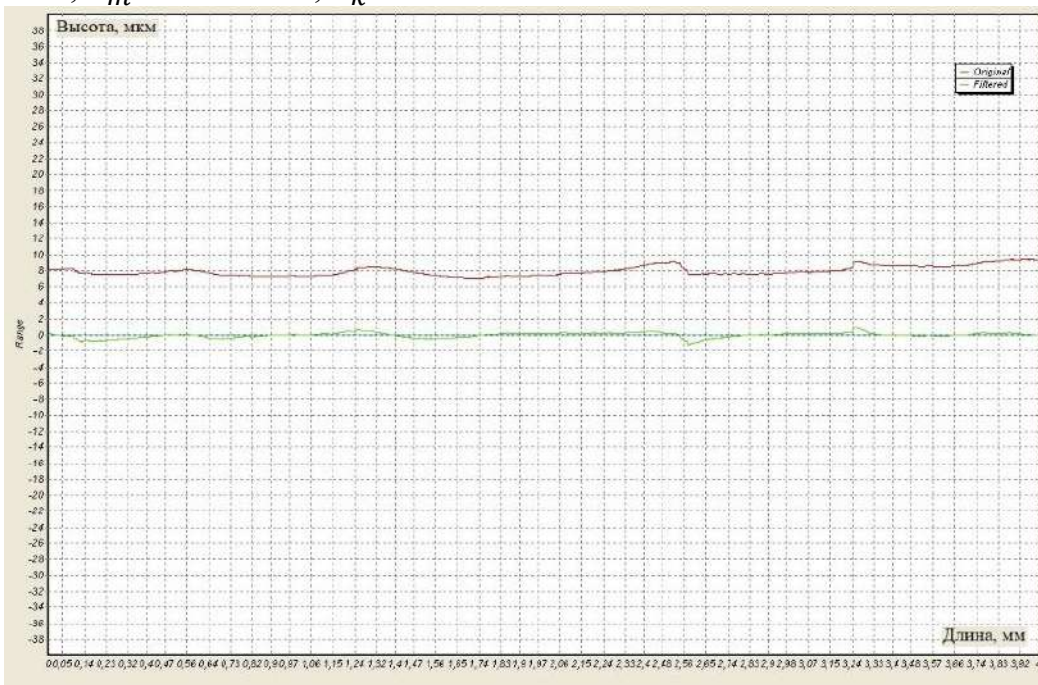


Рисунок 4.32 – Образец типа I после проведения плазменно-электролитной обработки. Параметры шероховатости:  $R_a=1.243$  мкм,  $R_y=1.164$  мкм,  $R_z=0.296$  мкм,  $R_m=0.632$  мкм,  $R_q=0.314$  мкм,  $R_p=0.532$  мкм,  $R_t=2.200$  мкм,  $S=0.3333$  мм,  $S_m=0.6666$  мм,  $S_k=-1.049$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен обзор существующих методов аддитивного построения металлических изделий, существующих методов термической и финишной обработки, исследованы газовые разряды с жидкими электродами в процессах обработки металлических изделий.
2. Разработаны экспериментальные установки по исследованию параметров плазменно-электролитного процесса обработки СЛС-изделий.
3. Исследовано термическое, гидроударное и полирующее воздействие газовых разрядов с жидкими электродами на СЛС-изделия в диапазоне  $U=0 - 400$  В,  $I = 0 - 50$  А,  $pH = 1 - 12$  и  $T_{эл} = 15 - 100^\circ\text{C}$ .
4. Впервые выявлены параметры плазменно-электролитной обработки, обеспечивающие получение поверхностей изделий с требуемым комплексом эксплуатационных свойств.
5. Проведено моделирование процесса плазменно-электролитной полировки поверхности изделий, полученных методом селективного лазерного сплавления.
6. Разработан комбинированный метод плазменно-электролитной обработки СЛС-деталей энергетических установок, включающий в себя термическое, гидроударное и полирующее воздействие.
7. Смоделированы и изготовлены пресс-формы для изготовления лопаток газотурбинного двигателя и заготовки поршня методом селективного лазерного сплавления, определены оптимальные параметры электродной системы и процесса плазменно-электролитной обработки данных деталей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Maximilian Munsch, Matthias Schmidt-Lehr, Eric Wycisk. Binder Jetting and FDM: A comparison with Laser Powder Bed Fusion and Metal Injection Moulding/Metal Additive Manufacturing/Vol.4, No. 3, 2018, pp.159-167.
2. Carl R. Deckard. Патент US 4863538 A "Method and apparatus for producing parts by selective sintering"
3. Lee, Y.S.; Kirka, M. M; Dinwiddie, R. B. Role of scan strategies on thermal gradient and solidification rate in electron beam powder bed fusion /Additive Manufacturing/T. 22, 2018, C.516-527.
4. Li, Hongxin; Liang, Xiaoyu; Li, Yang; Lin, Feng. Performance of High-Layer-Thickness Ti6Al4V Fabricated by Electron Beam Powder Bed Fusion under Different Accelerating Voltage Values./Materials/T.15, B.5,2022, №1878
5. Mobin Alehojat, Reza Jafari, Paria Karimi, Esmail Sadeghi. Electron beam-powder bed fusion of Alloy 718: Effect of hot isostatic pressing and thermal spraying on microstructural characteristics and oxidation performance /Surface and Coatings Technology/T. 404, 2020, №126626.
6. Zhou, W.Y., Lee, S.H., Wang, M., Cheung, W.L. and Ip, W.Y. Selective laser sintering of porous tissue engineering scaffolds from poly(L-lactide)/carbonated hydroxyapatite nanocomposite microspheres/ J Mater Sci Mater Med./ 2008 Jul;19(7):2535-40
7. Prashanth Konda Gokuldoss, Sri Kolla, Jürgen Eckert Additive Manufacturing Processes: Selective Laser Melting, Electron Beam Melting and Binder Jetting-Selection Guidelines/ Materials (Basel)/ 2017 Jun 19;10(6):672.
8. Mazzucato, F., Tusacciu, S., Lai, M., Biamino, S., Lombardi, M., Valente, A., Monitoring approach to evaluate the performances of a new deposition nozzle solution for DED systems / Technologies / 2017. – V. 5, № 29.
9. Liu, W., DuPont, J.N. Fabrication of functionally graded TiC/Ti composites by laser engineered net shaping. / Scr. Mater./ 2003. V. 48, p. 1337–1342.
10. Li, W., Karnati, S., Kriewall, C., Liou, F., Newkirk, J., Taminger, K.M.B., Seufzer, W.J. Fabrication and characterization of a functionally graded material

- from Ti-6Al-4V to SS316 by laser metal deposition. /Addit. Manuf./ 2017. - V. 14, p. 95–104.
11. S.L. Sing, C.F. Tey, J.H.K. Tan, S. Huang, Wai Yee Yeong. 2 - 3D printing of metals in rapid prototyping of biomaterials: Techniques in additive manufacturing/Rapid Prototyping of Biomaterials (Second Edition)/ 2020, p. 17-40.
  12. Yusuf, S.M., Gao, N., Influence of energy density on metallurgy and properties in metal additive manufacturing. /Mater. Sci. Technol./ 2017, V. 33, p. 1269–1289.
  13. Lewandowski, J.J., Seifi, M., Metal additive manufacturing: a review of mechanical properties. / Annu. Rev. Mater. Res./ 2016, V.46, p. 151–186.
  14. Sames, W.J.; List, F.A.; Pannala, S.; Deho, R.R.; Babu, S.S. The Metallurgy and Processing Science of Metal Additive Manufacturing. Int. Mater. Rev. 2016, 61, 1–46.
  15. Li, C.; Liu, Z.Y.; Fang, X.Y.; Guo, Y.B. Residual Stress in Metal Additive Manufacturing. Proc. CIRP 2018, 71, 348–353.
  16. B. Song, S. Dong, Q. Liu, H. Liao and C. Coddet: ‘Vacuum heat treatment of iron parts produced by selective laser melting: microstructure, residual stress and tensile behavior’, Mater. Des., 2014, 54, 727–733.
  17. E. Brandl and D. Greitemeier: ‘Microstructure of additive layer manufactured Ti–6Al–4V after exceptional post heat treatments’, Mater. Lett., 2012, 81, 84–87.
  18. E. Brandl, A. Schoberth and C. Leyens: ‘Morphology, microstructure and hardness of titanium (Ti–6Al–4V) blocks deposited by wire-feed additive layer manufacturing (ALM)’, Mater. Sci. Eng. A, 2012, 532, 295–307
  19. Suvi Papula, Mingshi Song, Aaron Pateras, Xiao-Bo Chen, Milan Brandt, Mark Easton , Yuriy Yagodzinsky, Iikka Virkkunen and Hannu Hänninen Selective Laser Melting of Duplex Stainless Steel 2205: Effect of Post-Processing Heat Treatment on Microstructure, Mechanical Properties, and Corrosion Resistance. Materials 2019, 12, 2468



20. On the mechanical performance of structures manufactured by Selective Laser Melting: Damage initiation and propagation, Stefan Leuders, University of Paderborn, Germany, as presented at AMPM2014, MPIF, USA
21. H. Galaragga, D. Lados, R. Dehoff, M. Kirka, Unpublished ongoing research.
22. Understanding the Role of Hot Isostatic Pressing Parameters on the Microstructural Evolution of Ti-6Al-4V and Inconel 718 Fabricated by Electron Beam Melting, William H. Peter et al
23. M. Khomutov, P. Potapkin, V. Cheverikin, P. Petrovskiy, A. Travyanov, I. Logachev, A. Sova, I. Smurov. Effect of hot isostatic pressing on structure and properties of intermetallic NiAl–Cr–Mo alloy produced by selective laser melting. *Intermetallics* 120 (2020) 106766
24. W.J. Sames, F.A. List, S.P. Pannala, R.R. Dehoff, S.S. Babu, The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing, *Int. Mater. Rev.* 61 (5) (2016) 315–360.
25. N. N. Kumbhar and A. V. Mulay, “Post Processing Methods used to Improve Surface Finish of Products which are Manufactured by Additive Manufacturing Technologies: A Review,” *J. Inst. Eng. Ser. C*, 2018.
26. P. Tyagi, T. Goulet, C. Riso, and F. Garcia-Moreno, “Reducing surface roughness by chemical polishing of additively manufactured 3D printed 316 stainless steel components.” 2016
27. S. Bagehorn, J. Wehr, and H. J. Maier, “Application of mechanical surface finishing processes for roughness reduction and fatigue improvement of additively manufactured Ti-6Al-4V parts,” *Int. J. Fatigue*, 2017.
28. N. Mohammadian, S. Turenne, and V. Brailovski, “Surface finish control of additively-manufactured Inconel 625 components using combined chemical abrasive flow polishing,” *J. Mater. Process. Technol.*, 2018.
29. S. Eckert and F. Vollertsen, “Mechanisms and processing limits of surface finish using laser-thermochemical polishing,” *CIRP Ann.*, vol. 67, no. 1, pp. 201–204, 2018.

30. Prospera, Sonuo & Sibanda, Prospera & Carr, Peter & Ryan, Michael & Bigot, Samuel. (2020). State of The Art in Surface Finish of Metal Additive Manufactured Parts. 10.3233/ATDE190039.
31. Y. Kaynak and O. Kitay, "The effect of post-processing operations on surface characteristics of 316L stainless steel produced by selective laser melting," *Addit. Manuf.*, vol. 26, pp. 84–93, 2019.
32. W. Morton, S. Green, A. Rennie, and T. Abram, "Surface finishing techniques for SLM manufactured stainless steel 316L components," in *Innovative Developments in Virtual and Physical Prototyping*, 2011.
33. L. Gillespie, *Mass Finishing Handbook*, First Edit. New York: Industrial Press Inc., 2007.
34. V. Vijayaraghavan and S. Castagne, "Measurement of surface characteristics of Ti6Al4V aerospace engineering components in mass finishing process," *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, 2018.
35. R. Mediratta, K. Ahluwalia, and S. H. Yeo, "State-of-the-art on vibratory finishing in the aviation industry : an industrial and academic perspective," pp. 415–429, 2016.
36. K. Ahluwalia, R. Mediratta, and S. H. Yeo, "A novel approach to vibratory finishing: Double vibro-polishing," *Mater. Manuf. Process.*, 2017.
37. J. Zhang, A. Y. Xiang Toh, H. Wang, W. F. Lu, and J. Y. H. Fuh, "Vibrationassisted conformal polishing of additively manufactured structured surface," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.*, 2018.
38. S. Luo, L. Zhou, X. Nie, Y. Li, and W. He, "The compound process of laser shock peening and vibratory finishing and its effect on fatigue strength of Ti-3.5Mo-6.5Al-1.5Zr-0.25Si titanium alloy," *J. Alloys Compd.*, vol. 783, pp. 828–835, 2019.
39. L. Hackel, J. R. Rankin, A. Rubenchik, W. E. King, and M. Matthews, "Laser peening: A tool for additive manufacturing post-processing," *Addit. Manuf.*, 2018.

40. X.-C. Zhang, C.-C. Zhang, Z.-M. Wang, S.-T. Tu, Y.-F. Jia, and Y. Fu, "Effects of Different Mechanical Surface Enhancement Techniques on Surface Integrity and Fatigue Properties of Ti-6Al-4V: A Review," *Crit. Rev. Solid State Mater. Sci.*, vol. 0, no. 0, pp. 1–25, 2019.
41. K. L. Tan, S. H. Yeo, and C. H. Ong, "Nontraditional finishing processes for internal surfaces and passages: A review," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, vol. 231, no. 13, pp. 2302–2316, 2017.
42. V. Jaya Prasad, K. Sam Joshi, V. S. N. Venkata Ramana, and R. Chiranjeevi, "Effect of Roller Burnishing on Surface Properties of Wrought AA6063 Aluminium Alloys," in *Materials Today: Proceedings*, 2018.
43. A. Verma and D. Mahato, "ROLLER BURNISHING-A Literature Review of Developments and Trends in Approach to Industrial Application," 2013.
44. P. Ghodake, P. Rakhade, and P. Maheshwari, "Effect of Burnishing Process on Behavior of Engineering Materials-A Review." 2013
45. M. Kattoura, A. Telang, S. R. Mannava, D. Qian, and V. K. Vasudevan, "Effect of Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification on residual stress, microstructure and fatigue behavior of ATI 718Plus alloy," *Mater. Sci. Eng. A*, 2018.
46. N. S. M. Chi Ma, Mohsen Taheri Andani, Haifeng Qin, A. A. Hamdy Ibrahim, Ahmadreza Jahadakbar, Zhencheng Ren, and C. Y. Hao Zhang, Gary L. Doll, Yalin Dong, Mohammad Elahinia, "Improving surface finish and wear resistance of additive manufactured nickel-titanium by ultrasonic nano-crystal surface modification," *J. Mater. Process. Tech.*, pp. 433–440, 2017.
47. N. Ahmed et al., "Electron beam melting of titanium alloy and surface finish improvement through rotary ultrasonic machining," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2017.
48. W. Han and F. Fang, "Fundamental aspects and recent developments in electropolishing," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2019.
49. C. Rotty, A. Mandroyan, M. L. Doche, and J. Y. Hihn, "Electropolishing of CuZn brasses and 316L stainless steels: Influence of alloy composition or

- preparation process (ALM vs. standard method),” *Surf. Coatings Technol.*, 2016.
50. K. Rokosz and T. Hryniewicz, “XPS MEASUREMENTS OF PASSIVE FILM FORMED ON AISI 316L SS AFTER ELECTROPOLISHING IN A MAGNETIC FIELD (MEP).”2013
  51. “Science and Industry of Electropolishing Review on science and Industry of Electropolishing View project Science and Industry of Processes for Zincbased Coatings with Improved Properties View project Benu Chatterjee,” 2017.
  52. G. Yang, B. Wang, K. Tawfiq, H. Wei, S. Zhou, and G. Chen, “Electropolishing of surfaces: theory and applications,” *Surf. Eng.*, 2017.
  53. C. Gnanavel, R. Saravanan, M. Chandrasekaran, and R. Pugazhenti, “Restructured review on Electrical Discharge Machining - A state of the art,” in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017.
  54. T. Yuvaraj Saindane and H. G. Patil, “Electrical Discharge Machining-A State of Art,” 2016.
  55. K. L. Wu, B. H. Yan, F. Y. Huang, and S. C. Chen, “Improvement of surface finish on SKD steel using electro-discharge machining with aluminum and surfactant added dielectric,” vol. 45, pp. 1195–1201, 2005.
  56. M. A. Mitchell, R. E. Raley, K. E. Jacobs, and E. / Em50, “Cleaning and Cleanliness Measurement of Additive Manufactured Parts Materials & Processes/EM50 Jacobs ESSSA/EM50 NASA Marshall Space Flight Center NASA Marshall Space Flight Center.”2016
  57. Y.-H. Li et al., “Material Characterization, Thermal Analysis, and Mechanical Performance of a Laser-Polished Ti Alloy Prepared by Selective Laser Melting,” *Metals (Basel)*., 2019.
  58. F. Zhihao, L. Libin, C. Longfei, and G. Yingchun, “Laser Polishing of Additive Manufactured Superalloy,” in *Procedia CIRP*, 2018.
  59. A. Temmler, E. Willenborg, and K. Wissenbach, “Laser Polishing,” 2012.
  60. D. Bhaduri et al., “Laser polishing of 3D printed mesoscale components,” *Appl. Surf. Sci.*, 2017.

61. B. Rosa, P. Mognol, and J. Hascoët, “Laser polishing of additive laser manufacturing surfaces,” *J. Laser Appl.*, 2015.
62. K. C. Yung et al., “Laser polishing of additive manufactured CoCr components for controlling their wettability characteristics,” *Surf. Coatings Technol.*, vol. 351, no. July, pp. 89–98, 2018.
63. 1. Cavendish H 1785 Experiments on air *Phil. Trans.* 75 372–84
64. Слугинов, Н.П. Разряд гальванического тока через тонкий слой электролита / Н.П. Слугинов// *Журнал русского–физического общества.* – 1878. - Т.10, вып. 8. - С. 241-243.
65. Слугинов, Н.П. О световых явлениях, наблюдаемых в жидкостях при электролизе/ Н.П. Слугинов// *Журнал русского–физического общества.* – 1880. - Т.12, вып. 1. - С. 193-203.
66. Антропов, Л.И. Теоретическая электрохимия/ Л.И. Антропов. М.: «Высшая школа». - 1969. – 370 с.
67. Hickling, A. Contact glow – discharge electrolysis/ A. Hickling, M.D. Ingram// *Trans. Faraday society* - 1963. - 60 - P. 783 – 793.
68. Martin J C 1996 *J.C. Martin on Pulsed Power* (New York: Plenum)
69. Sato M, Ohgiyama T and Clements J S 1996 Formation of chemical species and their effects on microorganisms using a pulsed high-voltage discharge in water *IEEE Trans. Ind. Appl.* 32 106–12
70. Foster J E, Sommers B S, Gucker S N, Blankson I M and Adamovsky G 2012 Perspectives on the interaction of plasmas with liquid water for water purification *IEEE Trans. Plasma Sci.* 40 1311–23
71. Sunka P 1999 Generation of chemically active species by electrical discharges in water *Plasma Source Sci. Technol.* 8 258–65
72. Webb M R and Hieftje G M 2009 Spectrochemical analysis by using discharge devices with solution electrodes *Anal. Chem.* 81 862–7
73. Smoluch M, Mielczarek P and Silberring J 2016 Plasma-based ambient ionization mass spectrometry in bionalytical sciences *Mass Spectrom. Rev.* 35 22–34

74. Mariotti D, Patel J, Svrcek V and Maguire P 2012 Plasma liquid interactions at atmospheric pressure for nanomaterials synthesis and surface engineering *Plasma Proc. Polym.* 9 1074–85
75. Ishijima T, Nosaka K, Tanaka Y, Uesugi Y, Goto Y and Horibe H 2013 A high-speed photoresist removal process using multibubble microwave plasma under a mixture of multiphase plasma environment *Appl. Phys. Lett.* 103 142101
76. Friedrich J F, Mix N, Schulze R-D, Meyer-Plath A, Ranjit Joshi R and Wettmarshausen S 2008 New plasma techniques for polymer surface modification with monotype functional groups *Plasma Proc. Polym.* 5 407–23
77. Bruggeman P J and Locke B R 2013 *Low Temperature Plasma Technology* ed P K Chu and X P Lu (London: Taylor and Francis)
78. Fridman G, Friedman G, Gutsol A, Shekhter A B, Vasilets V N and Fridman A 2008 Applied plasma medicine *Plasma Proc. Polym.* 5 503–33
79. Лазаренко, Б.Р. Вольтамперные характеристики электрического разряда между металлическим и электролитным электродами/ Б.Р. Лазаренко, А.А. Факторовин, В.Н. Дураджи // *Электронная обработка материалов – 1972.* - №3. – С. 29-33.
80. Лазаренко, Б.Р. Об особенностях электролитного нагрева при анодном процессе/ Б.Р. Лазаренко, В.Н. Дураджи, А.А. Факторовин // *Электронная обработка материалов – 1974.* - №3. – С. 37-40.
81. Лазаренко, Б.Р. Химико-термическая обработка металлов электрическими разрядами в электролитах при анодном процессе/ Б. Р. Лазаренко, А.А. Факторовин, В.Н. Дураджи // *Электронная обработка материалов – 1974.* - №5. – С. 11-15.
82. Лазаренко, Б.Р. Образование парогазовой оболочки при нагреве анода электронной плазмой / Б.Р. Лазаренко, П. Н. Белкин, А.А. Факторовин // *Электронная обработка материалов – 1975.* - №6. – С. 31-33
83. Лазаренко, Б.Р. Прохождение электрического тока через электролиты/ Б.Р. Лазаренко, Н. И. Лазаренко // *Электронная обработка материалов – 1978.* - №1. – С. 5-9.

84. Лазаренко, Б.Р. О структуре и сопротивлении приэлектродной зоны при нагреве металлов в электролитной плазме /Б.Р. Лазаренко, В.Н. Дураджи, И. В. Брянцев // Электронная обработка материалов – 1980.- №2. – С. 50-55.
85. Дураджи, В.Н. Об установлении стабильной стадии нагрева при анодном процессе/ В.Н. Дураджи// Электронная обработка материалов – 1975. - №5 – С. 44-47.
86. Дураджи, В.Н. Цементация и нитроцементация стали при нагреве в электролитной плазме /В.Н. Дураджи, И.В. Брянцев, Е. А. Паснковский // электронная обработка материалов – 1977 - №2 – С. 15-18.
87. Дураджи, В.Н. Распределение температуры образца при нагреве в электролитной плазме./ В.Н. Дураджи, И. В. Брянцев // Электронная обработка материалов – 1978. - №2. – С. 53-56.
88. Дураджи, В.Н. Науглероживание стали в электролитной плазме при анодном процессе/ В. Н. Дураджи, И. В. Брянцев, А.М. Мокрова и др// Электронная обработка материалов – 1979. - №6. – С. 20-24.
89. Белкин, П. Н. Влияния размеров анода на его температуру при нагреве электролитной плазмы/ П. Н. Белкин// Электронная обработка материалов – 1976. - №2. – С. 40-42.
90. Белкин, П. Н. Стабилизация парогазового слоя при анодном нагреве в растворах электролитов/с. 159, Депортирована в ВИНТИ 06. 02. 89. рег № 781- В89
91. Хлюстова, А.В. Коэффициенты эмиссии электронов из растворов электролитов./ А.В. Хлюстова, А.И. Максимов, В.А. Титов. // 3-й Международный симпозиум по теоретической и прикладной плазмохимии. Плес. Сборник материалов – 2002. - Т.1. - С. 106-107.
92. Nie, X. Characteristics of a plasma electrolytic nitrocarburising treatment for stainless steels / X. Nie, C. Tsotsos, A. Wilson, A.L. Yerokhin // Surface and coating Technology – 2001. – 199. – P. 135 – 142.

93. Synthesis and characterization of hard metal coating by electro-plasma technology. / P. Gupta, E.O. Daigle, P.J. Schilling // Surface and coating Technology – 2005. – 200. – P. 1587 – 1594.
94. Meletis, E.T. Electrolytic plasma processing for cleaning and metal – coating of steel surfaces. / E.T. Meletis, X. Nie, F.L. Wang // Surface and coating technology – 2002. – 150. – P. 246 – 256.
95. Slovetskii, D.I. Parameters of an electric discharge in electrolytes and physicochemical processes in an electrolyte plasma / D.I. Slovetskii, S.D. Terent'ev // High Energy Chemistry – 2003. - vol. 37, number 5. P. 355- 361.
96. Кашапов, Н.Ф. «Физические основы плазменно-электролитной обработки металлов»/ Н.Ф Кашапов, Р.Н. Кашапов // 4-й Международный симпозиум по теоретической и прикладной плазмохимии, Иваново, Россия - 2005. - С. 361-364.
97. Гайсин, А.Ф. Паровоздушный разряд между металлическим анодом и электролитическим катодом с добавлением неорганических и органических примесей при атмосферном давлении в процессе обработки твердых тел и жидкостей. // Гайсин А.Ф., Галимова Р.К., Абдуллин И.Ш. /Материаловедение – 2007. - № 2. - С. 39-45.
98. Ю. Г. Алексеев, А. Ю. Королёв, В. С. Нисс, А. Э. Паршутто, А. С. Будницкий. Электролитно-плазменное полирование титановых и ниобиевых сплавов. Наука и техника. Т. 17, № 3 (2018) Science and Technique. V. 17, No 3 (2018)
99. Чиркунова Н.В., Воленко А.П., Мулюков Р.Р., Шлом М.В. Совершенствование технологии электролитно-плазменного полирования аустенитной нержавеющей стали. Письма о материалах т.3 (2013) 309-311.
100. Кашапов, Р.Н. Исследование плазменно-электролитных процессов формирования микрорельефа поверхности металлов [Текст]: дис. на соискание ученой степени канд. тех. наук: 01.02.05/ КФТИ им. Е.К. Завойского КазНЦ РАН, Казань, 2012 – 120 с.



101. Direct Metal Solutions [Электронный ресурс] / – Электрон. текстовые дан. – USA: 2017 – URL: [https://ru.3dsystems.com/sites/default/files/2017-03/3D-Systems\\_DMP\\_Brochure\\_USEN\\_2017.03.08\\_WEB.pdf](https://ru.3dsystems.com/sites/default/files/2017-03/3D-Systems_DMP_Brochure_USEN_2017.03.08_WEB.pdf) (дата обращения: 29.12.2021).
102. ATI technical data sheet, Stainless steel AL 17-4TM precipitation hardening alloy [Электронный ресурс] – Электрон. текстовые дан. – USA: 2018. – URL: <http://www.specialtysteelsupply.com/brochure/17-4-technical-data.pdf> (дата обращения: 29.12.2021).
103. EOS Material data sheet, EOS stainless steel GP1 for EOSINT M 270. [Электронный ресурс] – Электрон. текстовые дан. – USA: 2022. – URL: <https://www.eos.info/en/additive-manufacturing/3d-printing-metal/dmls-metal-materials> (дата обращения: 29.12.2021).
104. AK Steel product data bulletin, 17-4 PH stainless steel. [Электронный ресурс] – Электрон. текстовые дан. – USA: 2021 – URL: [http://www.aksteel.com/pdf/markets\\_products/stainless/precipitation/17-4\\_PH\\_Data\\_Bulletin.pdf](http://www.aksteel.com/pdf/markets_products/stainless/precipitation/17-4_PH_Data_Bulletin.pdf) (дата обращения: 30.12.2021).
105. Aerospace material specification, Steel, corrosion resistant, investment castings 16Cr-4.1Ni-0.28Cb-3.2Cu-homogenization and solution heat treated or homogenization, solution, and precipitation heat treated. [Электронный ресурс] – Электрон. текстовые дан. – USA: 2021 – URL: <http://standards.sae.org/ams5355> (дата обращения: 29.12.2021).
106. Кашапов, Р.Н. Плазменно-электролитная обработка поверхности металлов / Р.Н. Кашапов // Физика и химия обработки материалов –2010.- №5 - С. 50-56.
107. Ясногородский И.З. Нагрев металлов и сплавов в электролите /И.З.Ясногородский – М: Машгиз, - 1949. – 345 с.
108. Кашапов, Р.Н. Исследование влияния плазменно-электролитной обработки на поверхность аустенитных хромоникелевых сталей / Р.Н. Кашапов // Вестник КГТУ – 2011.- №4 – С. 149-154.

109. Cheruvathur, S. Additive Manufacturing of 17-4 PH Stainless Steel: Post-processing Heat Treatment to Achieve Uniform Reproducible Microstructure/ S. Cheruvathur, E.A. Lass, C.E. Campbell // Journal of The Minerals, Metals & Materials Society. – 2016. – V.68, No. 3. – P.930-942.
110. Czerfalvi T, Mezei P 1996 Fresenius J. Anal. Chem. 255-813
111. Chen Q, Saito K, Takemura Y and Shirai H 2008 Thin Solid Films 516 6688-6693
112. Chen Q, Li J, Saito K and Shirai H 2008 J. Phys.D: Appl. Phys. 41175212-6
113. Gaisin A F and Son E E 2005 High Temp. 43 1
114. Sengupta S K, Srivastava A K and Singh R 1997 Journal of Electroanalytical chemistry 427 23-27
115. Pawlat J, Hensel K and Ihara S 2006 Czech J.Phys. 56 B 1174-B8
116. L. N. Kashapov, N. F. Kashapov, R. N. Kashapov, “Investigation of the influence of plasma-electrolytic processing on the surface of austenitic chromium-nickel steels,” J. Phys. Conf. Ser., vol. 479, p. 012003, 2013.
117. Multiphysics Modeling Using COMSOL 5 and MATLAB. Multiphysics modeling series. /Roger W. Pryor // ISBN152310015X, 9781523100156, 2016, 594 p.
118. Danilov, I. “Transient Simulation of the Removal Process in Plasma Electrolytic Polishing of Stainless Steel. (Published in 2018)” [Online]. Available: <https://www.comsol.com/paper/transient-simulation-of-the-removal-process-in-plasma-electrolytic-polishing-of-63401> [Accessed: 24-May-2021]
119. B. Sjodin, “How to Generate Random Surfaces in COMSOL Multiphysics® | COMSOL Blog.” [Online]. Available: <https://www.comsol.com/blogs/how-to-generate-random-surfaces-in-comsol-multiphysics/>. [Accessed: 24-May-2021].
120. A. S. Rajput, H. Zeidler, A. Schubert, “Analysis of voltage and current during the Plasma electrolytic Polishing of stainless steel,” Proc. 17th Int. Conf. Eur. Soc. Precis. Eng. Nanotechnology, EUSPEN 2017, no. May, pp. 2–3, 2017.
121. В. Р. Мукаева, “Управление технологическим процессом электролитно-плазменного полирования на основе контроля шероховатости поверхности

- по импедансным спектрам,” Уфимский государственный авиационный технический университет, 2014.
122. Аронов Б.М. Автоматизация конструирования лопаток авиационных турбомашин. – М.: Машиностроение, 1978. – 168 с.
123. Галицейский Б.М. Тепловая защита лопаток турбин // Б.М. Галицейский, В.Д. Совершенный, В.Ф. Формалев, М.С. Черный; Под редакцией Б.М. Галицейского / М.: Изд-во МАИ, 1996. – 356 с.
124. Колесова Е.Г. Разработка метода определения коэффициентов теплоотдачи в системах охлаждения лопаток турбин на основе нестационарной инфракрасной термографии: Дис. канд. техн. наук. – Рыбинск: РГАТУ, 2016. – 138 с.
125. Зленко М.А. Аддитивные технологии в машиностроении / М.В. Нагайцев, В.М. Довбыш // пособие для инженеров.– М. ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ» – 2015. – 220 с.
126. Каблов Е.Н. Металлопорошковые композиции жаропрочного сплава ЭП648 производства ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ в технологиях селективного лазерного сплавления, лазерной газопорошковой наплавки и высокоточного литья полимеров, наполненных металлическими порошками / Евгенов А.Г., Оспенникова О.Г., Семенов Б.И., Семенов А.Б., Королев В.А. //Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2016. № 9 (678). С. 62-80.
127. Nyamekye P. Overview of Sustainability Studies of CNC Machining and LAM of Stainless Steel / P. Nyamekye, M. Leino, H. Piili, A. Salminen // Physics Procedia – 2015 – № 78 – С. 367-376.
128. Мозберг, Р.К. Материаловедение [Текст]: учеб. пособие для вузов / Р.К. Мозберг - М.: Высш. шк., 1991. - 448 с.
129. Феодосьев, В.И. Сопротивление материалов [Текст]: учеб. для вузов/ В.И. Феодосьев - 10-е издание, перераб. и доп. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1999. - 592 с.