



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»
(ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»)

Институт машиностроения и инжиниринга

Кафедра ВТО

На правах рукописи

Подпись обучающегося

Hilfi Dhiaa Nameed Chiad

**«Исследование и разработка технологии плазменно-электролитной обработки
поверхностей изделий машиностроения из вентильных сплавов, сформированных
аддитивными технологиями»**

Научно - квалификационная работа по направлению

15.06.01 МАШИНОСТРОЕНИЕ

05.02.07 «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки»

Научный руководитель

д.т.н., проф., Суминов И.В.

Рецензент

Подпись

*Ученая степень, ученое звание, ФИО
д.т.н., проф.*

Подпись

Ученая степень, ученое звание, ФИО

Заведующий кафедрой

д.т.н., проф., Григорьев С.Н.

Подпись

Ученая степень, ученое звание, ФИО

Директор института

д.т.н., проф., Стебулянин М.М.

Подпись

Ученая степень, ученое звание, ФИО

МОСКВА
2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	5
▪ Актуальность работы.....	5
▪ Степень разработанности.....	7
▪ Актуальность работы.....	8
▪ Цель работы.....	8
▪ Научная новизна работы:.....	9
▪ Практическая значимость работы заключается в:.....	9
▪ Для защиты представляются:.....	9
▪ Степень достоверности и апробация результатов.....	10
▪ Структура и объем работы.....	10
ГЛАВА 1 Анализ аддитивных методов и технологий получения изделий из титановых сплавов и формирования на них защитных и износостойких покрытий.....	11
1.1 Аддитивные технологии формирования изделий из титановых сплавов и их преимущество перед традиционными технологиями.	11
1.2. Особенности порошковых материалов, используемых в аддитивных технологиях (АТ), и основные стандарты, которые могут быть применены к ним.....	15
1.3 Рассмотрены различные технологии создания порошковых материалов для аддитивного производства (АМ).	16
1.3.1 Процесс распыления газа включает осаждение материала с помощью высокоскоростного потока газа.	18
1.3.2 Процесс центробежного распыления.	19
1.4 Характеристики процессов аддитивного производства.....	23
1.4.1 Процесс аддитивного производства, известный как технология селективного лазерного спекания.....	23
Недостатки технологического процесса SLM особенно высока.	32
1.4.2 Электронно-лучевая плавка.....	32
1.5 Способы технического улучшения эксплуатационных характеристик деталей аддитивного производства из титановых сплавов.	39
1.5.1. Механизмы, лежащие в основе создания оксидных покрытий путем электроосаждения, и механизмы, регулирующие их образование, остаются	

неизученными.....	44
1.5.2. Свойства и эксплуатационные характеристики покрытий, созданных методом плазмоэлектроокисления на титановых сплавах.	48
Выводы к главе 1	52
ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ.....	53
ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ, ОБРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ.....	54
2.1 МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	54
2.1.1. Атрибуты титановых сплавов и их отличительные особенности.	54
2.1.2 Титановый сплав ВТ6 (Ti6Al4V)	56
2.2. Оборудование для исследований.....	58
2.2.1. Оборудование для изготовления образцов аддитивными методами	58
2.2.2 Оборудование для плазменно-электролитной обработки (ПЭО).	59
2.3. Методики проведения исследований.....	62
2.3.1 Методика измерения толщины ПЭО-покрытий	62
2.3.2. Способ измерения микротвердости.....	63
2.3.3. Методика измерения микротвердости ПЭО-покрытий.	64
2.3.4. Метод исследования проникающей пористости МДО-слоев.....	65
2.3.5 Методика определения шероховатости поверхности	70
2.3.6. Методика испытания на трение и износ	71
2.3.7. Методика испытания на адгезионную прочность покрытий.....	73
2.3.8. Определение диэлектрических свойств.....	77
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2	80
ГЛАВА 3 Исследование влияния параметров процесса плазменно-электролитического окисления на характеристики и эксплуатационные свойства оксидного покрытия.....	81
3.1. Изготовление экспериментальных образцов для проведения исследований.	81
3.2. Исследование зависимости свойств покрытий от технологических параметров процесса ПЭО.	81
3.3 Исследование трибологических и механических свойств ПЭО покрытий.	85
3.4. Механические и коррозионные свойства ПЭО-покрытий.....	89
3.5 Исследование изменений в структуре и фазовом составе в процессе	

плазменно-электролитического оксидирования (ПЭО).....	90
3.6 Исследование диэлектрических свойств.	95
3.6.1. Исследование величины электрического сопротивления.....	95
3.6.2. Исследование величины выдерживаемого напряжения (электрического пробоя).....	97
Выводы по главе 3.....	100
ГЛАВА 4	101
Разработка технологического процесса плазменно-электролитного оксидирования (ПЭО) деталей из титанового сплава Ti-6-Al-4V, сформированных методом электронно-лучевого плавления (ЕВМ).	101
4.1. Разработка требований к покрываемым поверхностям	101
4.2. Процесс выполнения ПЭО-обработки	103
Таблица 4.1. Последовательность технологических операций при ПЭО	106
4.4. Требования по обустройству технологического участка для размещения оборудования для реализации лабораторной технологии плазменно- электролитной обработки.....	111
4.4.2 Технические описание и характеристики типового участка.	113
4.5. Комплексная технология создания изделий методом АТ из сплава Ti6Al4V с ПЭО покрытием.	117
Выводы по главе 4.....	119
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	120
Публикации.....	124
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	125

Введение

- Актуальность работы.

В настоящее время в различных отраслях промышленности в России и за рубежом активно ведутся работы и внедряются "Технологии и аппараты, основанные на методе, известном как 'Аддитивное производство'. (АП) или Additive Manufacturing (AM).

Идея, заложенная в новом принципе производства деталей, заключается не в отсеке лишнего от заготовок или полуфабрикатов, а в послойном наращивании материала. Данная идея особенно привлекательна в авиаракетостроении, судостроении и других отраслях промышленности, где стоимость материалов достаточно высока, а сложные конфигурации детали имеют высокие требования по минимизации веса при максимальной прочности.

Традиционными методами изготовления деталей, такими как литье или объемная штамповка, не всегда можно реализовать применяемые в этой отрасли сложно-пространственные формы деталей. Кроме того, традиционные методы производства заготовок и деталей полностью зависят от технологической оснастки, разработка и изготовление которой является сложным и дорогостоящим процессом, особенно при опытном или мелкосерийном производстве.

В последнее время расширяется применение методов АМ для послойного синтеза крупногабаритных изделий. Ведётся разработка крупногабаритных установок для сложных и больших деталей для атомной и других отраслей промышленности.

Возможность практической промышленной реализации послойного наращивания появилась только с развитием компьютерной техники, которая значительно упростила разработку программ сечения любых деталей на большое количество плоскостей.

Послойный метод создания деталей открывает совершенно новые возможности, предоставляемые данной технологией, включают в себя создание «детали в детали», производство компонентов с изменяющимися по толщине

свойствами материала (известных как градиентные материалы), а также изготовление сетчатых конструкций, которые невозможно получить ни с помощью литья, ни механической обработки. 3D-технологии обладают огромным потенциалом в аэрокосмической отрасли. Это связано с тем, что они позволяют существенно снизить отношение массы материала, необходимого для производства детали, к массе готового изделия. При традиционных методах изготовления это соотношение может достигать 20:1, тогда как с использованием аддитивных технологий в худшем случае оно составляет 2:1.

Можно выделить следующие преимущества технологий аддитивного производства:

- Упрощение производственного процесса заключается в возможности создания сложных конструкций и компонентов, что упрощает и ускоряет этапы производства и снижает затраты на изготовление.
- Сокращение числа компонентов в узлах и агрегатах достигается за счет интеграции нескольких функций в одном элементе, что упрощает конструкцию и уменьшает количество сборочных операций.
- Упрощение производственных этапов;
- Отказ от использования приспособлений и вспомогательного оборудования;
- Производство непосредственно на месте использования;
- Механизация производственного цикла;
- Уменьшение затрат труда на производство;
- Сокращение сроков изготовления;
- Увеличение точности производства;
- Уменьшение массы продукции;
- Стандартизация применяемых материалов;
- Сведение отходов к минимуму.
- Специфические условия эксплуатации:
- Продолжительный срок эксплуатации;
- Увеличенная прочность материалов;
- Надежность функционирования конструкции;
- Облегчение ремонта и замены компонентов;

На основании вышеупомянутого можно заключить, что в последние годы наблюдается устойчивая тенденция к увеличению доли деталей, производимых с

использованием аддитивных или 3D-технологий, в качестве готовых изделий – прямое производство (DM).

В последние годы значительное внимание уделялось технологиям аддитивного производства (AM) для изготовления компонентов из алюминиевых и титановых сплавов, о чем свидетельствует значительное количество публикаций как внутри страны, так и за рубежом.

В настоящее время титан считается одним из самых распространенных металлов в наше время. Титановые сплавы используются во многих секторах, особенно в аэрокосмической промышленности. Благодаря своим исключительным свойствам и относительно низкой плотности титан находит применение не только в изготовлении ортопедических и зубных имплантатов, но и в производстве компонентов для современных самолетов и космических аппаратов.

Широкое использование титана делает его одним из самых востребованных металлов на планете. Популярность титана объясняется его высокой устойчивостью к коррозии по сравнению с другими металлами. Титан - очень прочный и легкий металл, его плотность лишь немного выше плотности алюминия. При одинаковой прочности титановые конструкции на 45% легче стальных.

- **Степень разработанности.**

Изготовленные с помощью AM технологий детали не всегда удовлетворяют требованиям к готовым изделиям с точки зрения защиты их от коррозии, высокотемпературных воздействий, наличия электроизоляционных свойств, адаптивности к приложенным нагрузкам. В этой связи весьма актуальным является придание изделиям и конструкциям выше перечисленных свойств, сформированным аддитивными технологиями за счет модификации их поверхности в частности плазменно-электролитными методами обработки (ПЭО), которые позволяют реализовать весь спектр указанных характеристик.

Плазменно-электролитическое оксидирование Процесс плазменного электролитического окисления (ПЭО) является новым методом, используемым для улучшения поверхностных характеристик различных металлических изделий. Этот

метод, основанный на обычном анодировании, тесно связан с электрохимическими механизмами. ПЭО позволяет создавать универсальные керамические покрытия, обладающие различными характеристиками, такими как устойчивость к коррозии и износу, электроизоляционные свойства, а также термические и эстетические характеристики. [1]. Одной из характеристик поли (оксида этилена) (ПЭО) является участие поверхностных микродуговых разрядов в процессе формирования покрытия. Эти разряды играют заметную и отличительную роль в формировании получаемого покрытия, это приводит к значительным различиям в структуре и составе создаваемых оксидных слоев. В результате характеристики этих слоев значительно улучшаются по сравнению с обычными анодными пленками. [2]. Уникальные особенности РЕО включают его экологически чистый характер и отсутствие необходимости в сложных механизмах предварительной обработки и охлаждения поверхности для получения толстых покрытий.

Анализ работ показал, что плазменно-электролитной обработке (ПЭО) титановых сплавов посвящено достаточно большое количество работ. Следует подчеркнуть, что в литературе практически отсутствуют исследования в области применения ПЭО деталей из титановых сплавов сформированных АМ.

- Актуальность работы

таким образом проведение исследований и на их базе разработка технологического процесса, обеспечивающего повышение эксплуатационных свойств изделий и конструкций, сформированных аддитивными технологиями из Титановый сплав ВТ6 (Ti-6-Al-4V) обычно используется в различных отраслях промышленности, благодаря модификации поверхности метод плазменного электролита сохраняет свою актуальность.

- Цель работы –

Развитие технологического процесса, направленного на повышение износостойкости и коррозионной стойкости, электроизоляционных свойств и теплопроводности изделий из сплава ВТ6 (Ti-6-Al-4V), сформированного аддитивными технологиями.

Для достижения этой цели были решены последующие задачи.

- провести исследование текущего состояния в области производства изделий из сплава ВТ6 (Ti-6-Al-4V) методами аддитивных технологий и обработки поверхности титановых сплавов методами плазменно-электролитического оксидирования.

-изучить микротвердость, шероховатость поверхности, износостойкость, коррозионную стойкость образцов из сплава Ti-6-Al-4V, сформированных АТ.

-изучить влияние режимов (ПЭО), на микротвердость, износостойкость, шероховатость поверхности, коррозионную стойкость, сквозную пористость, образцов из сплава Ti-6-Al-4V, сформированных АТ.

-на базе проведенных исследований, разработать технологический процесс ПЭО титанового сплава Ti-6-Al-4V.

▪ Научная новизна работы:

- выявлено влияние режимов ПЭО обработки на увеличение микротвердости поверхности;

- определено влияние состояния поверхностного слоя на параметры шероховатости, пористости и электроизоляционные свойства после ПЭО;

- установлены оптимальные концентрации электролита и режимы для ПЭО обработки сплава Ti-6-Al-4V.

▪ Практическая значимость работы заключается в:

- улучшение эксплуатационных характеристик изделий, изготовленных с использованием аддитивных технологий из сплава ВТ6 (Ti-6-Al-4V) и обработанных методами ПЭО;

- создание технологического процесса производства элементов из титанового сплава Ti-6-Al-4V с использованием комбинированного метода аддитивных технологий и ПЭО.

▪ Для защиты представляются:

- результаты исследований процесса ПЭО обработки титанового сплава Ti-6-Al-4V;

- результаты исследования структуры и состава модифицированных слоев;

- результаты исследования наследственности поверхностного слоя на параметры шероховатости, пористости после ПЭО;

- разработанный метод изготовления деталей из титанового сплава Ti-6Al-4V с применением аддитивного производства и плазменно-электролитического оксидирования.

- Степень достоверности и апробация результатов

Поставленные в исследовании задачи были решены с помощью аналитических и экспериментальных методов. В работе применялись принципы физико-технических методов обработки, основы материаловедения и современные технологии машиностроения. Экспериментальные исследования выполнялись по стандартным методикам с использованием сертифицированных приборов и контрольно-измерительной аппаратуры.

- Структура и объем работы

Диссертация включает введение, четыре главы, общие выводы и список литературы.

В первой главе представлен аналитический обзор современной литературы по состоянию аддитивного производства.

Во второй главе описаны применяемые материалы, оборудование и методики проводимых экспериментов.

В третьей главе описаны результаты экспериментов и наилучшие режимы ПЭО.

В четвертой главе представлены требования к обрабатываемым поверхностям, разработанный технологический процесс с пооперационной технологической картой и проект размещения технологического оборудования для реализации технологии.

Исследование во многом опирается на экспериментальные данные, что способствует накоплению опыта и знаний для разработки и внедрения технологии ПЭО для деталей, изготовленных с помощью аддитивных технологий.

ГЛАВА 1 Анализ аддитивных методов и технологий получения изделий из титановых сплавов и формирования на них защитных и износостойких покрытий

1.1 Аддитивные технологии формирования изделий из титановых сплавов и их преимущество перед традиционными технологиями.

Аддитивное производство (АП) в настоящее время представляет собой быстро развивающуюся отрасль промышленного изготовления.

Как уже отмечалось выше, идея, заложенная в принципе производства деталей методами АТ, заключается не в отсеке лишнего от заготовок или полуфабрикатов, а в послойном наращивании материала. Данная идея особенно привлекательна в авиаракетостроении, автомобилестроении, судостроении, а также стоматологии, травматологии и других отраслях промышленности, где стоимость материалов достаточно высока, а сложные конфигурации детали имеют высокие требования по минимизации веса при максимальной прочности, а также должны отвечать условиям индивидуальности и биоинертности в случае медицинского применения.

В таблице 1.1 указаны отрасли промышленности, наиболее активно внедряющие аддитивные технологии.

Таблица 1.1 – Секторы, применяющие аддитивные технологии [3]

Сектор промышленности	Использования	Получаемые преимущества
Авиакосмическая	Создание прототипов. Производство компонентов для самолетов, ракет-носителей и спутников. Снижение веса изделий.	Снижение затрат на производство сложных функциональных изделий. Локальное производство в непосредственной близости от потребителя без ограничений на доставку. Уменьшение времени производства снижает потребность в запасах сырья. Оптимизация конструкций (уменьшение массы, сокращение количества модульных элементов).
Автотранспортная	Создание прототипов. Производство изделий. Снижение массы автомобилей. Система охлаждения для прототипов, функционирующих в экстремальных условиях.	Оптимизация конструкций изделий. Ускорение вывода новой продукции на рынок. Снижение затрат на ремонт. Уменьшение запасов. Повышение качества продукции..
Травматология Хирургия Восстановительная медицина	Производство имплантатов (слуховые аппараты, протезы). Восстановление костей. Тазобедренные суставы. Имплантаты черепной коробки. Челюстные имплантаты.	Сокращение времени и стоимости операций. Снижение рисков послеоперационных осложнений. Уменьшение времени производства изделий. Оптимизация конструкции имплантатов с учетом анатомических особенностей.
Зубоврачебное дело	Дентальные протезы и коронки, ортодонтические устройства	Уменьшение времени на производство изделий. Анатомическая адаптация изделий.

Ключевой особенностью медицинских препаратов, производимых с помощью аддитивных технологий, является их способность работать с органами и тканями человека благодаря совместимости. При создании имплантатов и протезов важно учитывать уникальные анатомические особенности каждого пациента. Например, Производство имплантатов со сложным клеточным составом, например имплантатов, созданных с помощью технологии Вингера-Зейца, способствует успешному встраиванию костной ткани в клетки, способные выдерживать значительные механические нагрузки. Это развитие может привести к открытию нового направления в области реконструктивной травматологии и хирургии. [4].

Первая итерация технологии 3D-печати появилась во второй половине 1980-х годов и была впервые предложена компанией 3D Systems. До середины 1990-х годов появление этой технологии означало начало стереолитографии, также известной как процесс SLA. Первоначально эти методологии назывались технологиями быстрого прототипирования, но в основном применялись в области исследований и разработок, в частности для прототипирования в оборонной промышленности.[5]

Ключевые термины, относящиеся к области аддитивных технологий (АТ), были определены в ASTM F2792.1549323-1. Термин «аддитивные технологии» в этом документе можно понимать следующим образом. как «процедуру объединения веществ для создания материальных объектов на основе данных трехмерных моделей CAD, обычно последовательным образом, в отличие от методов субтрактивного производства». [5].

Современные технологии промышленного аддитивного производства (АП) различаются по производительности, методам нанесения слоев, используемым материалам и энергоресурсам, используемым во время операции. Иллюстративная классификация этих технологий представлена на диаграмме.

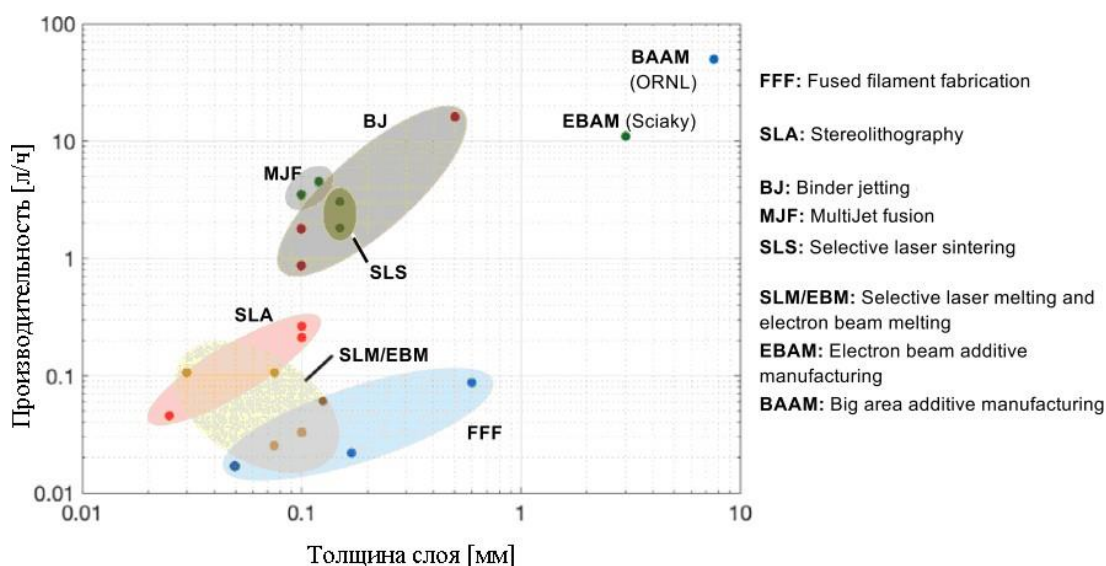


Рисунок 1.1 – Эффективность различных технологий аддитивного производства. [6].

Аддитивное производство предлагает множество преимуществ по сравнению с традиционными методами производства. Полный обзор его отличительных особенностей представлен в таблице. 1.2.

Таблица 1.2 – Преимущества аддитивных технологий по сравнению с традиционными методами [3]

Сферы применения	Плюсы
Оперативное создание прототипов	Оптимизация сроков вывода новой продукции на рынок Экономия расходов на разработку Увеличение эффективности и конкурентоспособности
Изготовление запасных компонентов	Уменьшение времени ремонта Снижение затрат на рабочую силу Сокращение расходов на хранение
Производство небольших серий	Производство мелких партий с высокой экономической эффективностью Отсутствие расходов на приспособления и инструмент
Индивидуально разработанные и эксклюзивные изделия	Массовая индивидуализация по доступной цене Оперативное изготовление функциональных изделий Отсутствие штрафов при переходе к новой конфигурации продукции
Изделия со сложной обработкой	Производство изделий сложной геометрической формы с постоянной себестоимостью при использовании автоматизации.
Поддержка производственных процессов обработки	Уменьшение трудовых расходов Снижение расходов на складирование Эффективность массовой персонализации
Оперативное изготовление	Производство практически готовых изделий в одной стадии.
Производство деталей	Повышение качества готовой продукции Сокращение цепочки поставок Экономия на разработке Устранение излишних, модульных элементов
Местное производство по запросу	Уменьшение расходов на складирование и транспортировку запасов и готовой продукции Экономия за счет предотвращения простоев оборудования Сокращение цепочки поставок Увеличение срока службы продукции
Быстрый ремонт	Уменьшение времени восстановительного ремонта Возможность функциональной оптимизации оборудования

На диаграмме показаны различные этапы производства изделий с использованием аддитивных технологий. 1.2.



На рисунке 1.2 показаны последовательные этапы производства изделий с использованием аддитивных технологий. [7].

1.2. Особенности порошковых материалов, используемых в аддитивных технологиях (АТ), и основные стандарты, которые могут быть применены к ним.

В промышленном секторе использование аддитивных технологий предполагает преимущественно использование металлических порошков в качестве основных материалов для производства компонентов. Эти порошки характеризуются как сыпучие материалы с размером частиц не более 1 мм. Классификация этих порошков зависит от их номинального диаметра d .

- наночастичные ($d < 0,001$ мкм);
- ультратонкие ($d = 0,01 - 0,1$ мкм);
- мелкодисперсные ($d = 0,1 - 10$ мкм);
- мелкие ($d = 10 - 40$ мкм);
- средние ($d = 40 - 250$ мкм);
- крупные ($d = 250 - 1000$ мкм).

В последнее время были установлены общие критерии для смесей металлов и порошков, используемых в аддитивных технологиях. Некоторые производители аддитивных установок требуют использования определенного набора поставляемых ими материалов. Использование порошков, содержащих различные фракционные составы, очевидно в различных установках, это сводит к минимуму вероятность получения изделий с различными качественными характеристиками, которые могут возникнуть при использовании порошков различных производителей. Тем не менее, устройства существуют, Обеспечение возможности

использования металлических порошков, произведенных альтернативными производителями.

Установки Arcam, использующие технологию электронно-лучевого плавления (EBM), демонстрируют распределение частиц по размерам от 45 до 100 микрон. И наоборот, стандартное распределение частиц по размерам, наблюдаемое в процессе селективного лазерного плавления (SLM), находится в диапазоне от 10 до 45 микрон.

Важнейшим и фундаментальным требованием к порошкам, используемым в аддитивных технологиях (АТ), является требование иметь сферическую форму. Это связано с тем, что сферические порошки могут более эффективно занимать определенный объем и обеспечивать плавный поток при минимальных препятствиях. Металлические порошки, используемые в процессах спекания или плавления, находят широкое применение в покрытиях, огневом или плазменном напылении.

Тем не менее, стандарты, определяющие выбор металлических порошков для процессов аддитивного производства, значительно более строги. Эти стандарты включают такие элементы, как размеры частиц, форма и химический состав. Все эти элементы играют решающую роль в обеспечении эффективности и надежности процесса. Порошки, полученные с помощью традиционных методов, таких как водное распыление, могут иметь неправильную морфологию, что делает их непригодными для применения в аддитивном производстве, а также позволяет перерабатывать порошок в будущих циклах.

В области аддитивного производства важно, чтобы порошки имели преимущественно сферическую морфологию, что позволяет создавать компактные и однородные слои, а также обеспечивать однородную текучесть материала. Для устранения конкретных недостатков необходимо ограничить содержание влаги в порошках максимум до 3%.

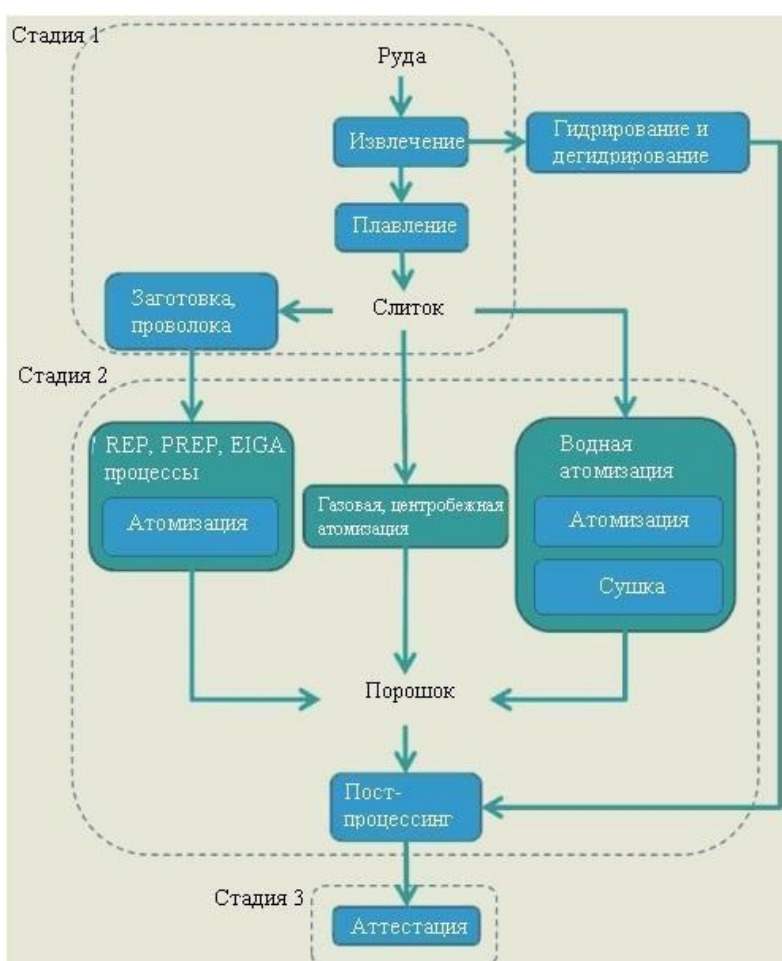
На национальном уровне были недавно введены в действие нормативные акты, регулирующие использование веществ в аддитивных технологиях, и утверждены протоколы по надзору и оценке первичных материалов. Для сплава Ti-6Al-4V была создана структура, аналогичная всемирно признанному стандарту ISO 5832-3-2014. В этой структуре описаны свойства и подходящие методы оценки пластичного титанового сплава.

1.3 Рассмотрены различные технологии создания порошковых материалов для аддитивного производства (АМ).

Предоставление порошковых материалов является серьезной проблемой, которая влияет как на развитие аддитивных технологий, так и на область традиционной порошковой металлургии в целом. Распространенный метод производства металлических порошков включает восстановление оксидов металлов с последующим распылением полученного расплава. Часто используются такие методы, как автоклавная и карбонильная обработка, электролиз водных и солевых растворов, диффузное насыщение и механическое измельчение.[9]

На диаграмме, обозначенной как диаграмма 1.3, показан конечный результат процесса получения порошков.

Основное внимание при производстве порошков титановых сплавов для аддитивных технологий уделяется использованию специальных методов, облегчающих превращение исходного вещества в порошок при минимальном изменении его химического состава. Среди различных доступных методологий процесс распыления расплава отличается впечатляющей эффективностью, результативностью и способностью удовлетворять заданным требованиям порошковых смесей. Большинство порошков, используемых в аддитивном производстве, количество которых превышает 80%, приобретается с помощью этих методов. Основные методы производства таких порошков включают газовое и центробежное распыление с последующим усовершенствованием этих методов.[5]



Методика производства порошков, полученных из рудных веществ, показана на рисунке.1.3. [10]

1.3.1 Процесс распыления газа включает осаждение материала с помощью высокоскоростного потока газа.

Одна из форм распыления газа раскрывается с помощью технологии EIGA (руководство по индукции электродов), которая включает использование электромагнитной индукции в сочетании с распылением инертного газа для получения химически активных металлических порошков, таких как Ti, Zr, Hf, V, Pt, Ir, Nb и Mo.

Процедура, описанная в этом методе (см. диаграмму на рисунке 1.4), включает постепенное погружение вращающегося электрода в кольцевой индуктор для индуктивного расплавления полученных слитков диаметром 50 мм и длиной 500 мм. Затем инертный газ используется для диспергирования капель расплавленного металла через сеть сопел.

Этот подход обеспечивает низкую скорость диспергирования расплава (около 0,5 кг/с), однако он позволяет диспергировать несколько десятков килограммов за цикл.[5] Эта методология производства порошков приводит к заметному повышению эффективности по сравнению с сепарационными устройствами. Кроме того, отказ от расходных керамических и графитовых элементов играет решающую роль в снижении затрат на производство порошков.

Использование инертного газа на 1 килограмм произведенного порошка аналогично работе крупных распылителей в керамических сосудах. На этом конкретном аппарате рабочий процесс демонстрирует более высокий уровень стабильности по сравнению с тигельными распылителями, в первую очередь из-за отсутствия исходного заряда металла. Известно, что этот исходный заряд часто приводит к попаданию в порошок примесей, таких как стружка и окисленные частицы. Здесь металл равномерно распределяется на протяжении всего процесса диспергирования, а поток аргона через сопло устанавливается до начала плавления электрода.

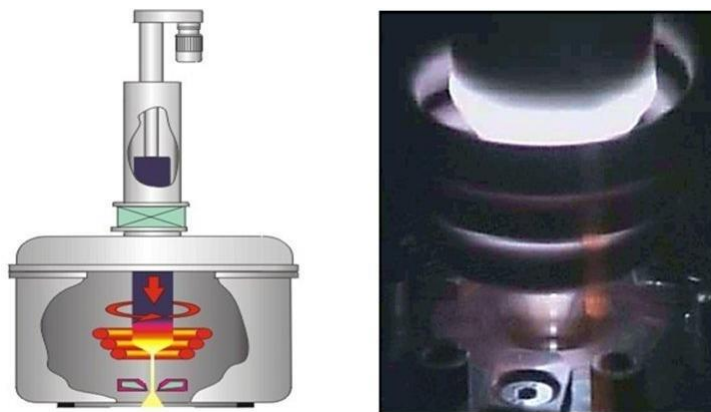


Рисунок 1.4. – Схема распылителя без тиглей EIGA 50/500 предложена компанией ALD Vacuum Technologies GmbH.

1.3.2 Процесс центробежного распыления.

При Производственный процесс создания порошков с использованием титановых сплавов. используются различные технологические методы, при этом особое внимание уделяется процессам REP и PREP. Технология REP (Rotating Electrode Process), также известная как процесс вращения электрода, предусматривает диспергирование расплава, образующегося в результате электрической дуги между вольфрамовым электродом и цилиндрическим слитком из титанового сплава. [5].

В процессе проецирования сопротивления (REP) используется пара электродов, один из которых состоит из вольфрама, а другой — из определенного сплава. Вольфрамовый электрод остается неподвижным, в то время как запасной электрод быстро вращается. При возникновении электрической дуги между электродами материал исходного электрода подвергается плавлению. Затем под действием центробежной силы расплавленный металл рассеивается к периферии, В точке конвергенции вещество превращается в крошечные капли, которые затем во время движения принимают сферическую форму. [13].

Модификацией предыдущей процедуры является технология плазменного вращающегося электрода (PREP) (Plasma Rotating Electrode Process), как показано на рисунке 1.5 для варианта установки. Слиток плавится высокоскоростным потоком инертного газа. [5]

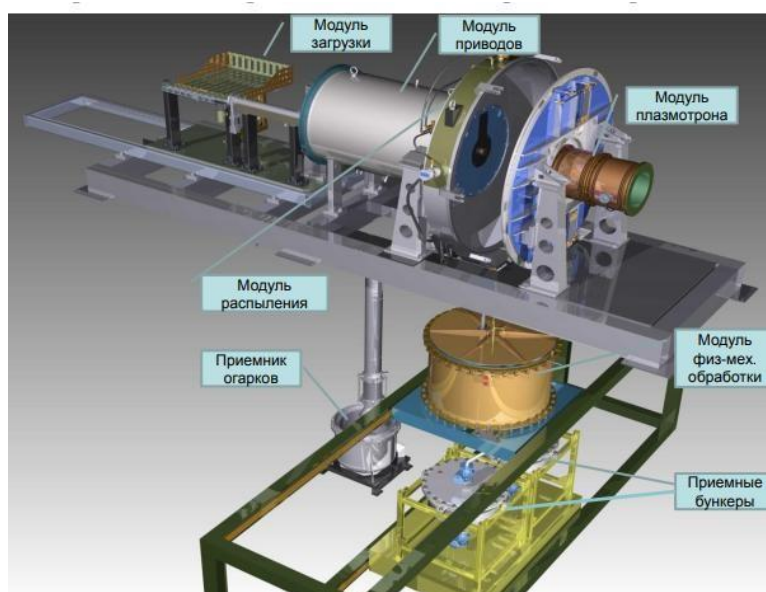
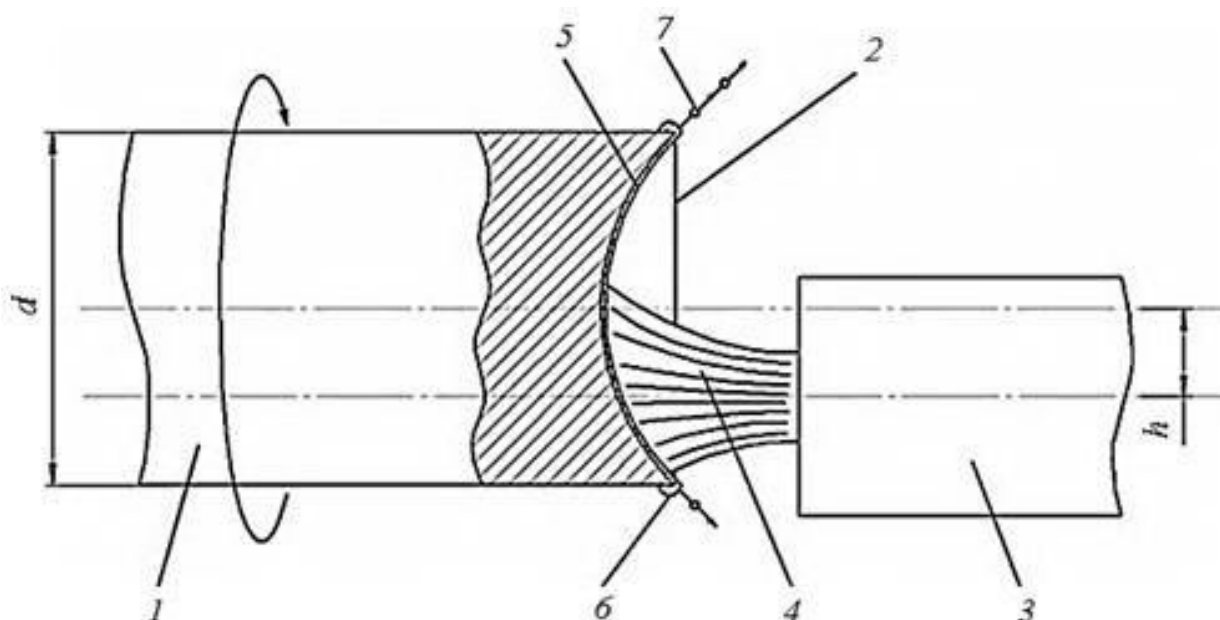


Рисунок 1.5. – Универсальная модульная генераторная установка используется в процессе производства порошков путем центробежного распыления. [Источник: ОАО «КОЛЕСА»]

Визуальное представление, иллюстрирующее процедуру использования метода PREP, можно увидеть на рисунке 1.6. Использование этого подхода включает нанесение слоя на формованную заготовку 1. Диаметр d Объект вращается вокруг своей оси с определенной угловой скоростью. Расположен на периферии заготовки 2. Тепловой поток передается с помощью плазменной горелки 3. Обычно при установке плазменной горелки отклонение h и удельная мощность. 4 В результате расплавления кромки заготовки образуется поверхностный слой, подвергшийся процессу плавления. 5 Движение расплава к периферии конечности обусловлено центробежными силами, в результате чего расплав накапливается и образует своеобразную «корону». В результате капли расплава отделяются от поверхности, что приводит к их превращению в гранулы в процессе кристаллизации во время движения. Это явление происходит в среде, богатой инертными газами, такими как аргон или гелий. [11].

В процессе в контейнер может быть введен неактивный газ, чтобы ингибировать окисление и введение примесей в материал, возможно создать вакуум, обеспечивающий чистоту поверхности и препятствующий воздействию кислорода. Для этой цели часто используются азот и монооксид углерода. Средний размер частиц равен. от 40 до 200 микрон в зависимости от параметров метода распыления. [12].



На рисунке 1.6 показано изображение процесса PREP [11].

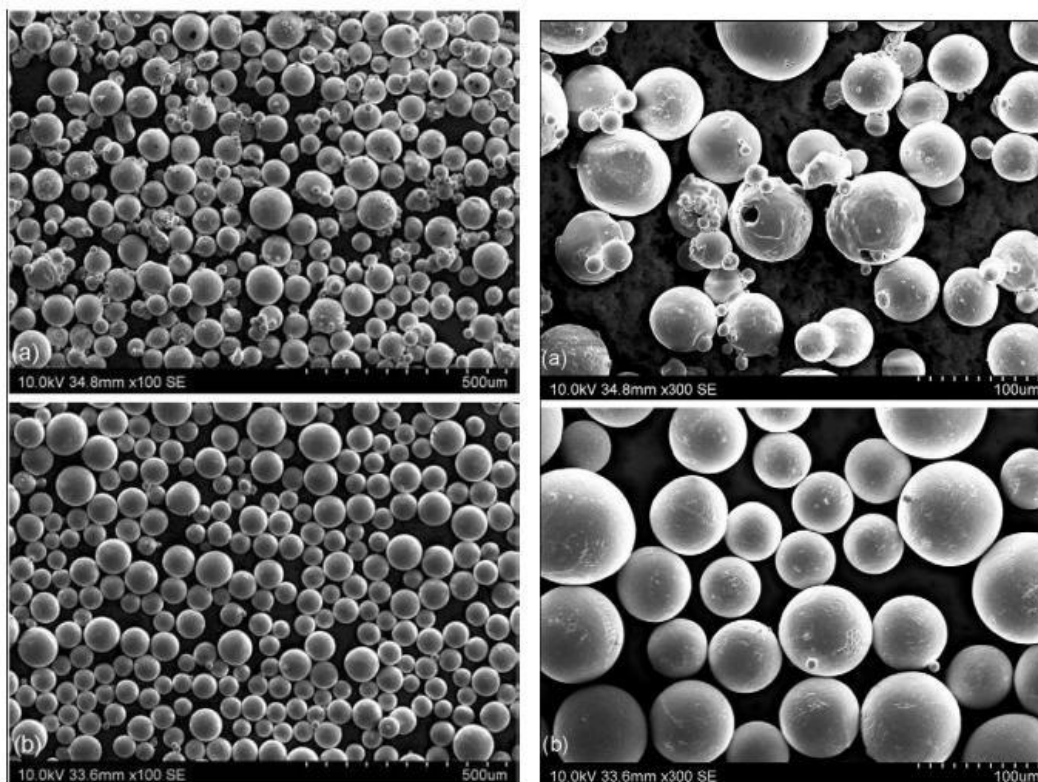
1 представляет собой исходный материал с параметром диаметра (d); 2 обозначает конец исходного материала; 3 означает источник плазмы с параметром смещения (h); 4 обозначает тепловой поток плазмы; 5 показывает расплавленное покрытие; 6 иллюстрирует создание кольцевой структуры из расплавленного материала; 7 представляет капли расплава.

Нижняя граница размера частиц в порошке составляет 70 микрон, средний размер гранул составляет около 50 микрон, в то время как примерно 10% гранул имеют размер менее 40 микрон. В настоящее время это наиболее выгодный результат использования современных систем плазменной сварки и центробежной обработки высокоскоростных литых заготовок. [14].

Чтобы улучшить использование порошков, полученных в процессе порошковой металлургии (PREP), для аддитивного производства, необходимо уменьшить их размеры до уровня ниже 40 микрон. Основные методы, используемые для уменьшения размера частиц порошков в рамках методологии PREP, включают. [14]:

- Увеличение скорости вращения образовавшегося компонента приводит к последующему увеличению скорости частиц среднего размера.
- Повышение уровня энергии плазмы.
- Это косвенно влияет на размер частиц, приводит к небольшому уменьшению, а также оказывает значительное влияние на технологические характеристики и повышает эффективность системы;
- Минимизация вариаций в работе установки имеет решающее значение для обеспечения стабильной производительности.
- Эти колебания могут отрицательно повлиять на гранулометрический состав конечного порошкового продукта, привести к нарушению однородности его состава и, в конечном итоге, это привело к сокращению производства высококачественных материалов.
- Увеличение размеров литой заготовки приводит к постоянному увеличению угловой скорости, что приводит к уменьшению размеров получаемых гранул (хотя чрезмерное увеличение размеров может привести к повышенным колебаниям).

На рисунке 1.7 представлено визуальное представление, показывающее отличительные черты порошков сплавов Ti-6Al-4V, полученных с помощью описанных методологий.



На рисунке 1.7 показано визуальное изображение порошкового сплава Ti-6Al-4V, полученного двумя различными методами: а) электронно-лучевая плавка (EBM) и б) сплавление в порошковом слое (PBF) [5].

Порошки, полученные методом центробежного плазменного распыления, имеют более сферическую форму с меньшим количеством мелких частиц. Кроме того, порошки, полученные с использованием технологии PREP, способствуют электронно-лучевому спеканию.

1.4 Характеристики процессов аддитивного производства.

1.4.1 Процесс аддитивного производства, известный как технология селективного лазерного спекания.

Передовая технология селективного лазерного спекания (SLM) была впервые использована в 1995 году Вильгельмом Майнерсом и Куртом Виссенбахом в знаменитом Институте лазерных технологий, основанном А. Фраунгофером. После этого Дитер Шварц и Маттиас Фоккеле из компании F&S Stereolithographietechnik GmbH сыграли решающую роль в проекте, в результате чего метод был запатентован. [5].

Технология селективного лазерного плавления (SLM) была создана для удовлетворения потребности в создании прочных интегрированных конструкций сложной геометрии, обладающих механическими характеристиками, сопоставимыми с литыми или коваными деталями, что приводит к сокращению продолжительности производства [5]. Схематическое изображение рабочего процесса метода селективного лазерного плавления можно увидеть на рисунке 1.8.

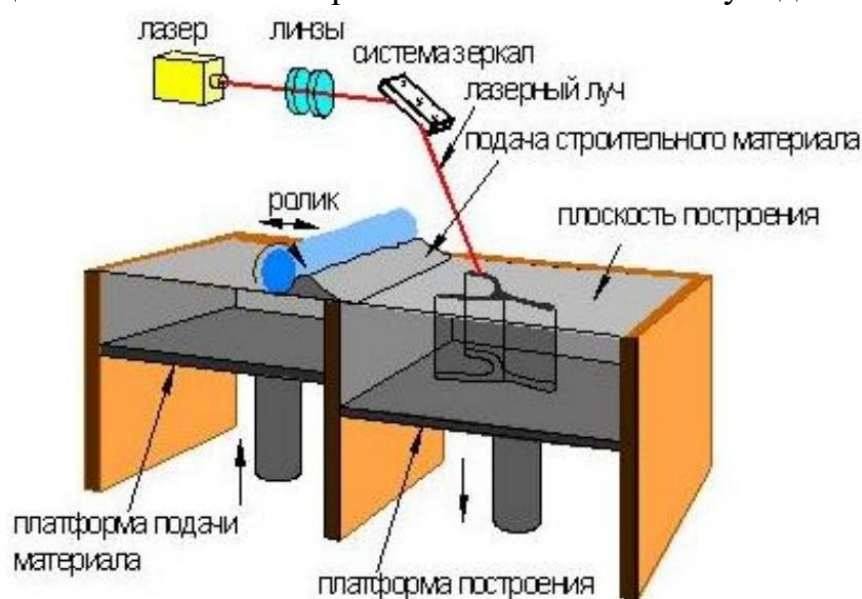
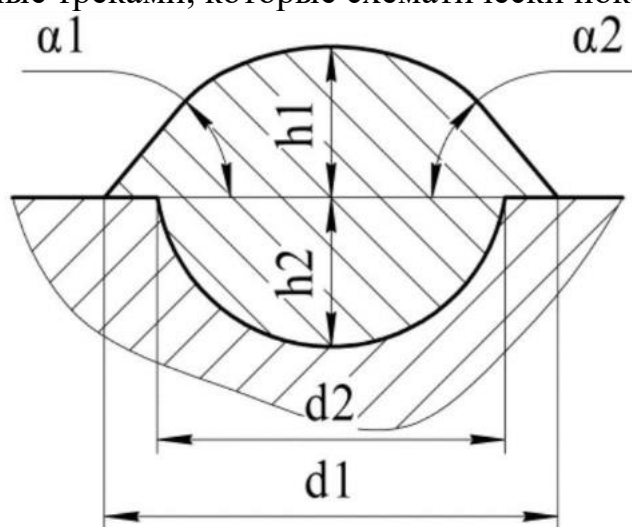


Рисунок 1.8 иллюстрирует процесс селективного лазерного плавления (SLM). [5]

В зависимости от конфигурации установки используется ракель или валик для равномерного распределения слоя порошка до необходимой толщины на предварительно нагретой стальной платформе. Затем лазерный луч воздействует на определенные участки поверхности порошкового слоя на основе текущей структуры слоя, описанной в модели САПР, и назначенного плана лазерного облучения. После этого этапа платформу настраивают в соответствии с толщиной порошкового слоя, наносят новый слой порошка, а затем сглаживают. [15].

В области аддитивных технологий широко используются различные типы лазеров, при этом волоконные лазеры, известные как лазеры YAG (иттриево-алюминиевый гранат), в которых активация неодима становится основным вариантом из-за их повышенной надежности, компактной конструкции и сравнительно экономичных затрат на техническое обслуживание. Лазерный луч концентрируется на поверхности материала с достаточным количеством энергии для достижения необходимой степени плавления частиц. Адаптация мощности лазера к конкретному материалу имеет первостепенное значение, поскольку требует учета коэффициентов поглощения и отражения излучения. Кроме того, характеристики и длина волны излучения являются решающими факторами при определении степени поглощения энергии. [16].

Лазерная система сканирует поверхность по установленным траекториям, известным как треки. Рабочая мощность лазера составляет около 90% от номинальной мощности из-за потери энергии в оптической системе. Чтобы избежать образования оксидных и нитридных соединений в металлическом каркасе, процесс проводится в тщательно регулируемой атмосфере инертного газа. [17]. Тепловая энергия лазерного луча вызывает превращение гранул порошкового материала, в результате чего они становятся жидкими. В результате лазерный луч проходит через поверхность слоя, в результате чего ранее нанесенный порошок плавится на подложке. Отдельные траектории лазерного луча образуют отдельные траектории, называемые треками, которые схематически показаны на рисунке 1.9.



На рисунке 1.9 показаны геометрические атрибуты определенной траектории в сегменте слоя жидкости. Параметр $h1$ представляет собой вертикальное расстояние траектории от основания, а $h2$ означает глубину плавления в нижележащем слое. Кроме того, $d1$ обозначает ширину отдельного пути, а $d2$ соответствует ширине расплавленной области. Кроме того, $\alpha 1$ и $\alpha 2$ определяют углы, под которыми поверхность проникает расплавленное вещество в области, подверженной лазерному облучению.

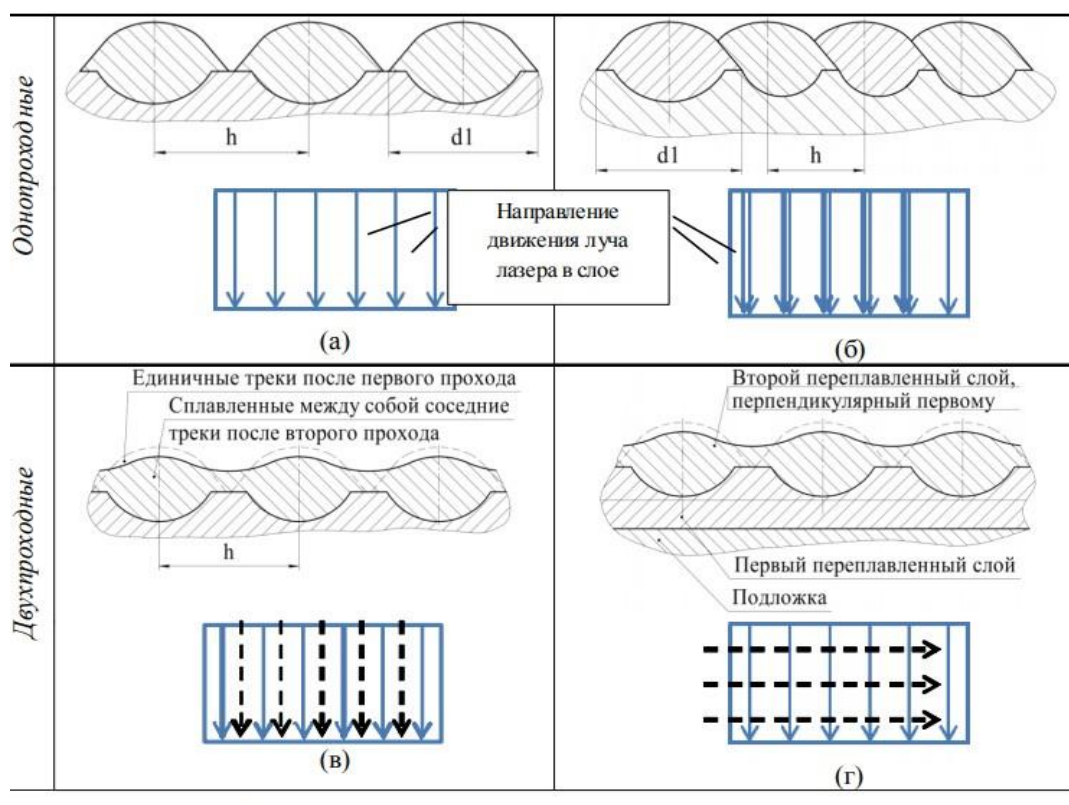
Существуют различные стратегии управления лазерным излучением при слиянии слоев (рис. 1.10). Эти подходы можно разделить на две основные группы: стратегии начального уровня и стратегии среднего уровня. В следующем разделе рассматриваются базовые стратегии начального уровня, которые служат основой для стратегий среднего уровня. В области стратегий начального уровня четыре основных метода были признаны основой производства продуктов путем селективного лазерного плавления.

Основные тактики можно разделить на два четко определенных набора. Первоначальный набор состоит из однократных техник, в то время как следующая группа включает методы двойного прохождения лазерного луча по слою материала, что способствует достижению повышенной плотности образца (пористость менее 1%).

- При первоначальном подходе процесс сканирования происходит периодически с заданным интервалом, обозначенным как h . Таким образом, каждая отдельная дорожка расположена в непосредственной близости друг от друга на расстоянии, равном или превышающем диаметр фокусной точки лазера на поверхности подложки или плавленого слоя d_1 .
- Вторая стратегия относится к ситуации, когда расстояние h меньше d_1 . Такие методы используются редко, поскольку повышенная пористость образцов приводит к снижению их механических характеристик. Эти методы, известные своей высокой эффективностью, могут значительно сократить время производства продукта; тем не менее, качество микроструктуры образца часто ухудшается. Эти подходы часто служат основой для создания передовых технологий на уровне средней школы. [18].
- Метод, который в современной литературе называют методом «двойной зоны», состоит из двухфазного процесса обработки каждого слоя порошкового материала лазерным лучом. Первоначально слой подвергается обработке через определенный интервал, совпадающий с шириной дорожки расплавленного материала. Затем лазерный луч проходит между уже обработанными дорожками, эффективно объединяя две соседние дорожки.
- Четвертая методология, известная в английской литературе как методология «cross-scanning», Предпосылка этого метода заключается в том, что каждый слой исследуется перпендикулярно траектории сканирования предыдущего слоя. Одним из ключевых преимуществ этой методологии является ее способность предотвращать появление повторяющейся волновой конфигурации. Это явление становится все более заметным по мере добавления каждого свежеполученного слоя.

Выбор метода лазерной обработки в процессе селективного лазерного плавления играет решающую роль в влиянии на механические свойства и уровень пористости образцов. Кроме того, это также влияет на продолжительность изготовления отдельных слоев и конечного продукта в целом.. [19].

Чтобы уменьшить пористость, необходимо точно настроить Технологические параметры, которые необходимо учитывать, включают мощность и скорость сканирования лазерного луча, толщину слоя расплавленного порошкового материала и определение оптимального шага сканирования между соседними дорожками.



На рисунке 1.10 показаны различные подходы к лазерной обработке [18].

Синие линии на диаграмме обозначают основное направление лазерного луча, а черные линии указывают вторичное направление. В стратегии а используется простой однопроходный метод сканирования с интервалами сканирования между треками, где параметр h превышает $d1$. И наоборот, стратегия б представляет собой усовершенствованный однопроходный метод с уменьшенным интервалом сканирования, где h меньше $d1$. В стратегии с реализована двухпроходная процедура под названием «двойные зоны», тогда как в стратегии г используется двухпроходная процедура, называемая «перекрестным затенением». В этих методологиях h обозначает величину шага сканирования, а $d1$ означает диаметр лазерного луча в расплавленном слое.

На качество полученных слоев большое влияние оказывают различные факторы, при этом основное внимание уделяется характеристикам сырья и параметрам процесса плавления. Основные характеристики материалов на начальных стадиях включают их зернистую структуру, химический состав, плотность, сыпучесть и особую площадь поверхности порошкообразной формы. [19, 20].

Параметры, используемые в процессе спекания, включают такие переменные, как мощность лазера, скорость движения, интенсивность излучения, частота импульсов, тип газовой среды и продолжительность воздействия. На свойства образующихся слоев влияют такие факторы, как предельная точность размеров, равномерная плотность и диапазон толщины слоя. [19].

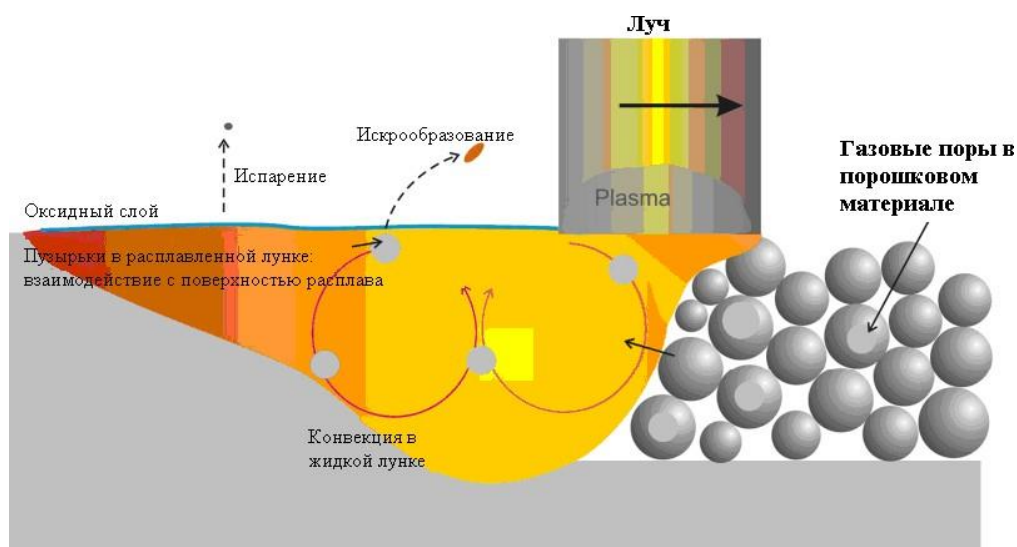
Дефицит может возникнуть в процессе формирования продукта. Основная задача стадии плавления заключается в диспергировании исходного порошка и удалении пустых пространств и частично расплавленных частиц.

Свойства эффективного излучателя тепла, создаваемого взаимодействием лазера со слоем порошка, заметно отличаются от свойств теплового излучения, испускаемого твердым металлическим предметом. Взаимодействие излучения с непрозрачной металлической поверхностью объекта влияет на распределение энергии из-за взаимосвязи между способностью материала поглощать излучение и его теплопроводностью. На способность слоя порошка впитывать жидкость влияют как физико-химические характеристики порошка, так и его объемная плотность, которая часто превышает плотность твердого вещества.

В процессе лазерного плавления часть электромагнитного излучения целенаправленно поглощается частицами, расположенными на поверхности недостаточно уплотненного слоя порошка. Кроме того, излучение проникает через пустые пространства между частицами и взаимодействует с находящимися под ними частицами. Стандартные механизмы теплопередачи регулируют тепловую дисперсию в порошковом слое. Уровень лазерного излучения уменьшается по мере того, как оно проникает глубже в слой порошка [21].

Каждый металл обладает различными свойствами, связанными с поглощением излучения, поверхностной энергией и текучестью в расплавленном состоянии. Следовательно, для улучшения процедуры плавления необходимо глубокое понимание физико-химических характеристик отдельных металлов, чтобы свести к минимуму риск нестабильности. [18].

Влияние на возникновение дефектов показано на рисунке 1.11. Сюда входят стадии развития дефектов, недостаточного рафинирования и образования флоцена. Наличие пор связано с изменением интенсивности лазера, скорости движения луча по поверхности материала, размеров фокальной области и дополнительных переменных.



На рисунке 1.11 показан ряд переменных, влияющих на возникновение структурных дефектов в продуктах в процессе селективного лазерного плавления (SLM). [22].

Рост скорости сканирования по своей сути связан с сокращением продолжительности производства; тем не менее важно признать, что такое увеличение возможно только за счет увеличения интенсивности излучения и уменьшения промежутка времени между последовательными сканированиями. В противном случае достижение необходимого минимального уровня пористости конечного продукта может оказаться сложной задачей. Незначительное снижение мощности лазера, например, на 10 Вт, может привести к значительному увеличению объема пор. [17].

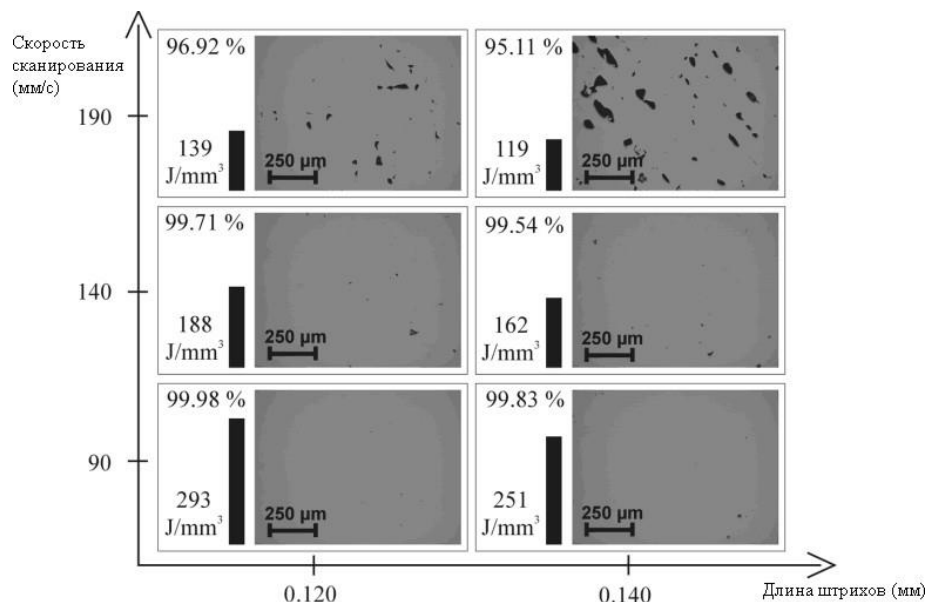
Оценка пористости может быть достигнута с помощью процессов, включающих консолидацию и сплавление порошковых веществ, таких как амальгамация сжиженных частиц. Это приводит к уменьшению объема и увеличению плотности. Воздействие термокапиллярных сил становится очевидным во время плавления частиц порошка. Наличие пор и воздушных полостей негативно сказывается на механических характеристиках получаемых продуктов, Наличие концентрации напряжений на границе образца, особенно в клиновидных образцах, может привести к заметному снижению прочности при наличии отдельного дефекта, что может привести к образованию трещины.

Обилие пор в материале играет решающую роль в снижении его прочности и влиянии на его эластичные свойства, вязкопластические свойства и другие свойства. В результате это препятствует практическому применению изделий, изготовленных методом селективной лазерной сварки. [18].

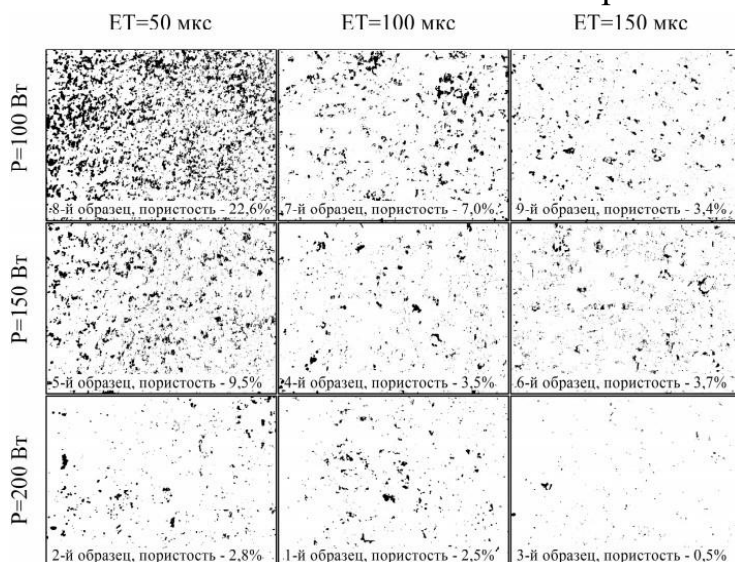
Наблюдаются случаи пористости на рисунках 1.12 и 1.13. Образование флоцинов неразрывно связано с содержанием влаги в представленном порошковом материале. При взаимодействии с лазерным лучом молекулы воды подвергаются процессу расщепления, что приводит к поглощению высвобождаемого водорода в жидкой среде. Из-за высокой скорости кристаллизации расплавленного материала процесс удаления газов затруднен [22]. Исследования, проведенные учеными [23],

позволили определить оптимальные рабочие параметры аппарата для лазерной плавки, в результате чего уровень пористости составляет 0,5%. Эти настройки требуют использования углекислотного лазера мощностью 200 Вт в сочетании с продолжительностью воздействия 150 мкс на координату при сохранении постоянной Толщина слоя и длина линии 50 микрон (см. рис. 1.14).

На рисунке 1.12 показано несколько областей, в которых процесс спекания порошка еще не полностью завершен, как отмечалось в предыдущем исследовании [16].



На рисунке 1.12 показаны микрофотографии образцов сплавов с наибольшей плотностью в зависимости от скорости сканирования и интенсивности ударов, с особым акцентом на влияние использования иттербиевого лазера [24].

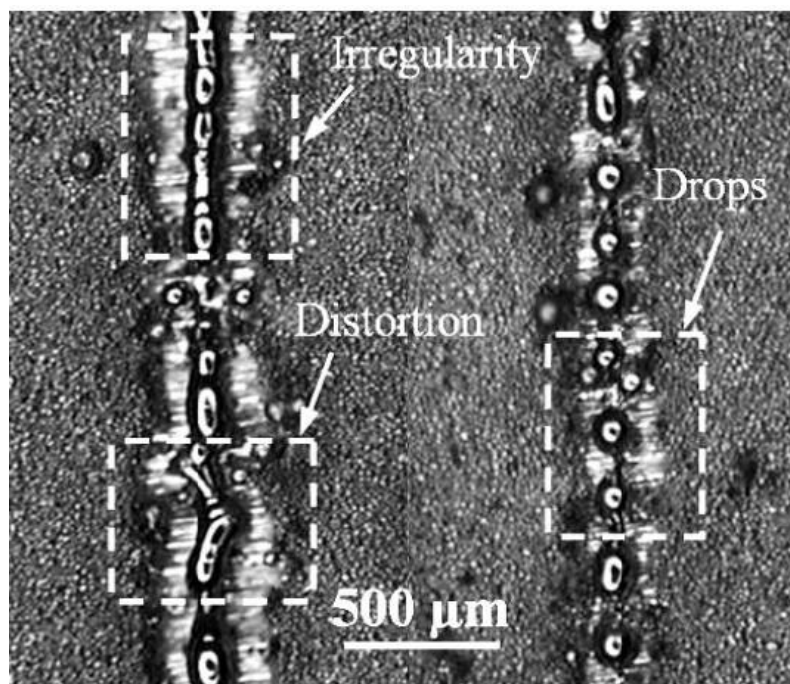


На рисунке 1.13 показана пористость, наблюдаемая в образцах, полученных в ходе экспериментов с различными методами обработки с использованием углекислотного лазера [25].

Повышение интенсивности лазерного луча при сохранении других эксплуатационных факторов (например, скорости сканирования и глубины слоя) может привести к образованию волнообразной структуры на поверхности. [17]. Основная стратегия снижения воздействия этих эффектов заключается в применении специализированных методов обработки, таких как «The two zone method» и «cross-shading». [26].

Основная стратегия снижения этих воздействий заключается в использовании процессов формирования и сфероидизации инсульта — основных процессов аддитивного производства. Рекомендуется использовать высокий уровень мощности лазера, так как это повышает гибкость при регулировке скорости сканирования и толщины порошкового слоя. Повышенный уровень энергии, особенно в условиях высокой мощности лазера и низкой скорости сканирования, может привести к увеличению объема расплавленной ванны в процессе операций селективного лазерного плавления (SLM) и, следовательно, к нестабильности отпечатанных треков. [27].

Анализ процесса создания единой дорожки из металлических порошков методом селективного лазерного плавления (SLM) показал, что метод имеет заметную пороговую характеристику: стабильную область, характеризующуюся последовательным и равномерным плавлением материала лазером, и нестабильную область, в которой возникают перерывы в формировании трека. Нестабильность возникает, когда скорость сканирования недостаточна, что приводит к искажениям и дефектам, или когда скорость слишком высока, что приводит к возникновению сфероидизации. Диапазон идеальных скоростей сканирования можно расширить за счет увеличения мощности лазера и использования материалов с высокой теплопроводностью. Включение тепловой энергии в основной материал приводит к повышению долговечности и созданию непрерывных отдельных путей. Примеры этих недостатков представлены на рисунке 1.14.



На рисунке 1.14 показаны случаи сфероидизации и штрихов, отмеченные на поверхности порошкового слоя, как указано в источнике [27].

Преимущества технологии селективного лазерного плавления (SLM) [17, 28]:

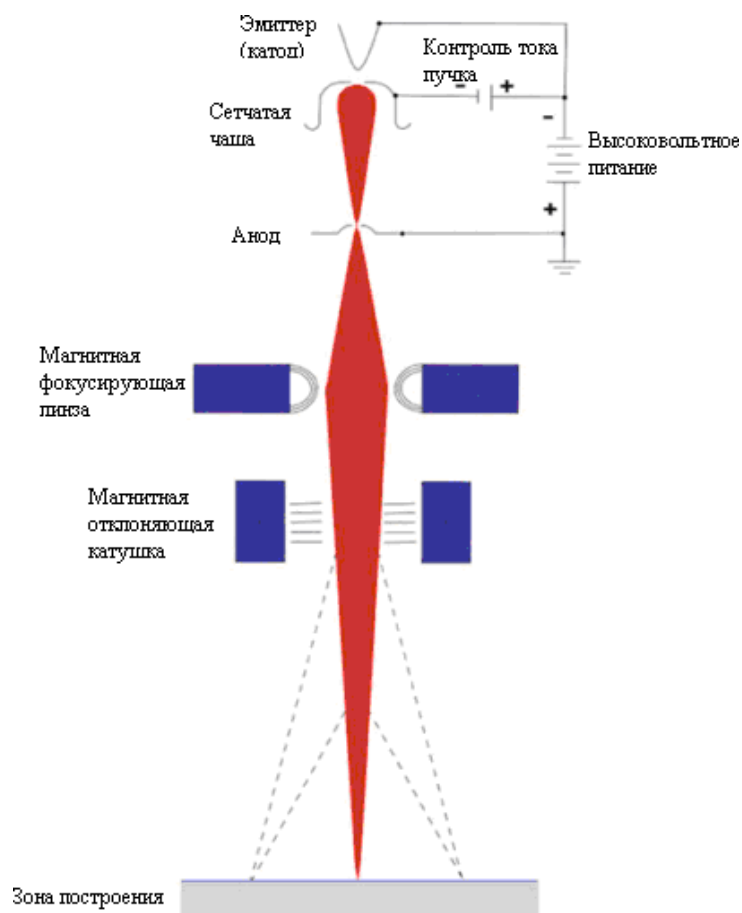
- Важное преимущество заключается в простоте конструкции лазерного устройства;
- За один производственный цикл можно изготовить несколько изделий разных форм.
- Аппаратное программное обеспечение предоставляет готовые модели, предназначенные для улучшения расположения элементов в рабочей среде с помощью виртуальных сборок, отображаемых на экране монитора, с использованием полностью автоматизированных процедур.
- Лазерные устройства характеризуются исключительной точностью, что обеспечивает высокий стандарт качества поверхности изделий.
- Аппарат снабжен дополнительными компонентами, включая генераторы азота, пылесборники и сепараторы порошка.
- Это позволяет производить изделия сложной формы (со значительной площадью поверхности, но ограниченным объемом, сложными конструкциями, внутренними охлаждающими каналами и готовыми компонентами), которые невозможно изготовить традиционными методами.
- Существует значительный уровень использования порошка, а также возможность его последующего использования.
Сложные внутренние каналы могут быть созданы при условии последующей очистки их от остатков порошка на следующих стадиях обработки.

Недостатки технологического процесса SLM особенно высока.

- Всестороннее понимание физических и химических принципов аддитивного производства, а также процедур разработки 3D-моделей необходимо для максимального использования технологических возможностей.
- Существует настоятельная потребность в полной стандартизации процедур аддитивного производства, поскольку различия в идентичных процедурах в настоящее время служат конкурентными преимуществами для производителей аддитивного оборудования;
- Недостатки могут возникнуть из-за недостаточной оптимизации процесса плавления и низкого качества порошковых материалов, что приводит к деформациям, трещинам, сохраняющейся пористости и сфероидизации в расплавленных областях.
- К качеству порошка предъявляются строгие стандарты, поскольку изменение его свойств может повлиять на появление дефектов и общее качество поверхности конечного продукта. Стоимость порошковых материалов особенно высока — от 10 000 рублей за килограмм.
- Этот процесс характеризуется относительно низким уровнем эффективности, так как при смешивании старого и нового порошка не требуется никаких затрат материала, поэтому единственным приемлемым вариантом является использование отсортированного порошка.
- На точность конструкции влияют размеры лазерного пятна, размеры частиц порошка и расположение компонента в рабочем пространстве.
- Хотя высокие скорости обработки и больший диаметр лазерного пятна могут повысить производительность, они также могут привести к снижению качества продукции. Это приводит к получению конечных продуктов с анизотропными свойствами, что ограничивает их применение в критических сценариях.
- Кроме того, эти изделия обладают внутренними напряжениями, которые требуют термообработки или горячего изостатического прессования.
- Готовые продукты требуют дополнительной обработки, включая механическую обработку поверхности и химическое травление.

1.4.2 Электронно-лучевая плавка

Технология электронно-лучевого плавления (EBM), первоначально созданная в начале 2000-х годов шведской фирмой Arcam AB, в этом методе используется электронный пучок с высокой плотностью энергии, аналогичный лазерным методам, вместо фотонов. Процедура предполагает сфокусированное высвобождение электронов. Оборудование EBM обладает способностью генерировать сфокусированный электронный пучок, вызывающий плавление в определенных областях металла. Схема производства электронного пучка в системе показана на рисунке 1.15 [29].



На рисунке 1.15 показана концепция работы электронно-лучевой пушки, изложенная в ссылке [3].

Через сетчатую чашу и положительно заряженный анод подается повышенное количество электрического тока. Катод, излучающий электроны, нагретый и заряженный отрицательно, подвергается термоэлектронной эмиссии, высвобождая электроны. Затем эти электроны фокусируются и усиливаются в сетчатой чаше, а затем через анод направляются в рабочую камеру. В рабочей среде электромагнитные линзы используются для точной фокусировки электронного луча, несущего заряд, а магнитная отклоняющая катушка используется для точной настройки траектории. Устройство электронной пушки способно генерировать лучи с напряжением в диапазоне от 60 до 150 кВ и выходной мощностью от 3 до 30 кВт. Концентрация электронного потока сходится к крошечной фокусной точке размером в несколько миллиметров. Энергия вводится в среде с высоким вакуумом (ниже $1 \cdot 10^{-4}$ мбар). Вещество, используемое в этом процессе, должно содержать небольшое количество кислорода и водорода и должно быть полностью обезвожено, чтобы избежать образования водяного пара. [29]

На рисунке 1.16 показана схема, показывающая компоновку оборудования для электронно-лучевой плавки (ЕВМ) с использованием электронов, Создано с помощью электронной пушки (1), Электронам придается ускорение до напряжения 60 кВ, после чего они подвергаются фокусировке через электромагнитные линзы (2). и управляются катушкой, которая их отклоняет (3) По пути, определенному

программой. Электронный луч направляется на поверхность за несколько проходов со скоростью сканирования примерно 10^4 мм/с и значительным током луча около 30 мА. В результате этого процесса температура порошкового слоя повышается в 0,8 раза по сравнению с температурой плавления сплава. После стадии предварительного нагрева слой затем обрабатывают со скоростью приблизительно 10^2 мм/с с использованием тока луча в диапазоне от 5 до 10 мА. Луч пересекает координаты x-y, что приводит к полной интеграции определенных участков слоя. Последовательные сегменты порошковых материалов поступают из контейнеров (4). В оперативную зону (6), Корректировка производится в зависимости от толщины слоя, формируемого для создания нового слоя. Для выравнивания поверхности слоя используется ракель (5). Добавление гелия в рабочую среду приводит к повышению давления до 10^{-2} мбар, что повышает теплопроводность и эффективность охлаждения различных компонентов системы. [30].

На рисунке 1.17 показан спектр факторов, влияющих на успешное выполнение процедуры электронно-лучевого плавления.

Выполнение операции в условиях вакуума является недостатком, поскольку наличие частиц газа может привести к дисперсии электронного пучка. Кроме того, движение электронов приводит к образованию рентгеновских лучей, что представляет опасность для технических специалистов, работающих с оборудованием. [29].

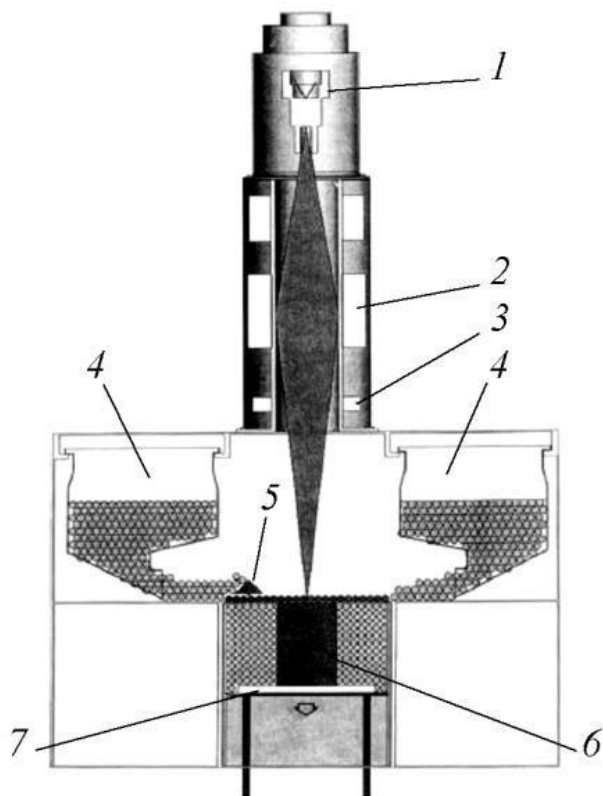
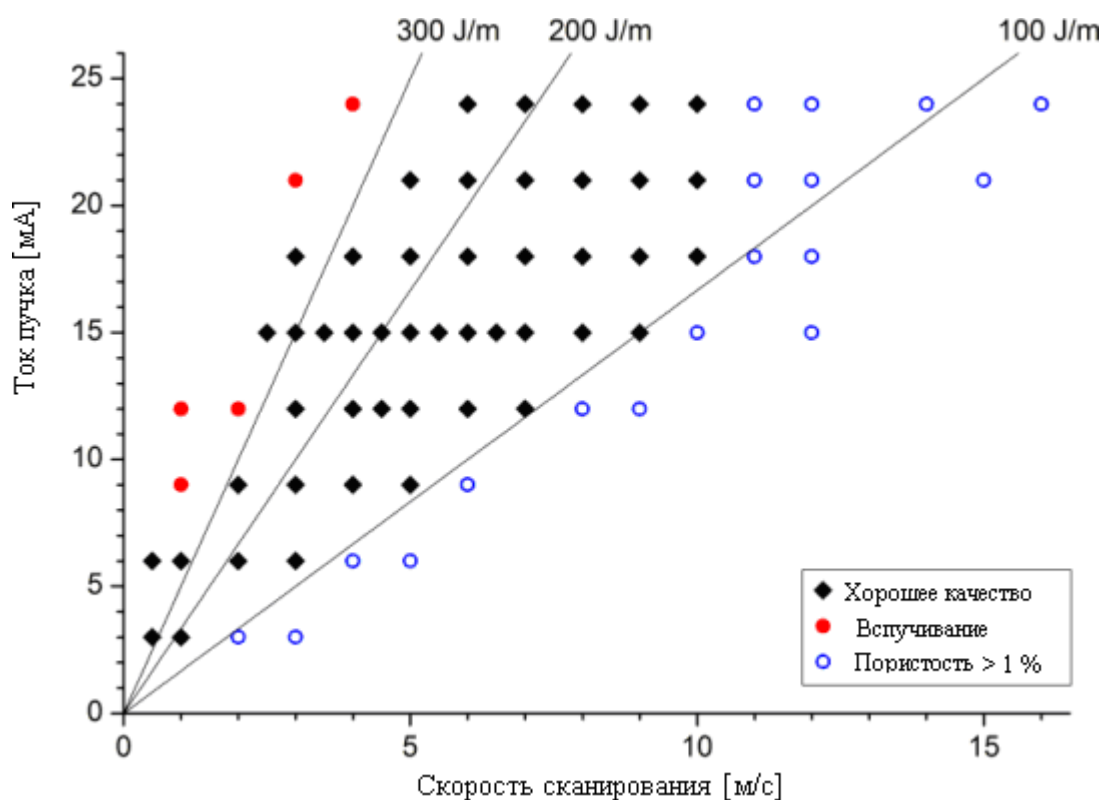


Рисунок 1.16 — Схема устройства ЕВМ [29]



На рисунке 1.17 показан процесс доказательной медицины (ЕВМ), примененный к сплаву ВТ6, как сообщается в ссылке [31].

Преимущества технологии электронно-лучевого плавления (EBM) [29, 33]:

- Снижается необходимость использования опорных конструкций;
- Этот подход включает в себя процесс повышения температуры порошков до 700°C, что позволяет снизить термические и остаточные напряжения, минимизировать усадку и добиться однородности фазообразования в продуктах.
- В результате потребность в обслуживании графического пользовательского интерфейса (ГИП) снижается.
- Успешное выполнение процесса;
- Получение порошков непосредственно у поставщика оборудования гарантирует надежность процесса.;
- Механические характеристики изготовленных деталей очень напоминают литые или кованные аналоги.
- Дальнейшая термообработка или горячее изостатическое прессование повышает усталостные свойства материала.

Недостатки метод электронно-лучевого плавления (EBM) [29, 33]:

- Процедура охлаждения рабочей камеры занимает много времени, но необходима для создания стабильной микроструктуры и полного устранения внутренних напряжений.
- Тем не менее, этот метод также приводит к увеличению затрат на поддержание необходимого уровня вакуума. Выбор материалов ограничивается исключительно сплавами на основе титана и кобальта.
- Тем не менее, этот метод также приводит к увеличению затрат на поддержание необходимого уровня вакуума.
- Разнообразие и размер продукции, которую можно изготовить, ограничиваются ограниченной производительностью оборудования.
- Использование порошков, содержащих более крупные частицы, имеет важное значение, поскольку электростатическое отталкивание между мелкими гранулами может препятствовать сцеплению конечного слоя, что приводит к снижению точности конечного продукта по сравнению с лазерными технологиями (для которых требуется минимальный размер частиц 45 микрон).
- Крайне важно уделять приоритетное внимание безопасности печатного оборудования, учитывая важную роль излучения в процессе печати.

В таблице 1.3 представлено углубленное изучение характеристик технологий аддитивного производства.

Таблица 1.3 - Сопоставление технических параметров установок аддитивного производства SLM и EBM [32, Arcam AB, Farsoon High-tech Co., Ltd]

моделька	A2X	FS271M
цена, млн. руб.	55	28,5
Общая информация		
Изготовитель	Arcam AB	Farsoon High-tech Co., Ltd
Страна производства	Швеция	КНР
Использование	Промышленное использование	Промышленное использование
Технические характеристики/параметры построения		
Метод производства	EBM	SLM
Источник излучения	Электронно-лучевая пушка	Yb-волоконный лазер
Скорость создания, см ³ /ч	55 – 80	5 – 20
Размер рабочей области, мм	200 · 200 · 380	275 · 275 · 320
Количество лучевых пятен	1 – 100	1
Мощность пучка, Вт	50 – 3500	500
Минимальный диаметр пятна луча, мкм	200	20
Шероховатость готовых изделий	Ra25/Ra35	
Точность построения, мкм	До 130	До 200
Уровень вакуума, мбар	5 · 10 ⁻⁴	—
Защитный газ	Гелий (опционально)	Аргон, азот
Расход защитного газа л/мин	—	~ 3
Скорость сканирования, м/с	8000	15
Гарантированная точность деталей, мм	± 0.13 – ± 0.2	± 0,2
Поддерживаемые материалы	Металлические порошки: Ti6Al4V (Grade 5) Ti6Al4V ELI (Grade 23) Titanium CP (Grade 2) ASTM F75 CoCr IN718	Металлические порошки: 316L, 17-4PH, IN625, IN718, AlSi10Mg Ti6Al4V, Co-Cr, 18Ni300, Cu90Sn10, Ta, W
Параметры оборудования		
Форматы файлов	STL, SLC	STL
Габариты установки, мм	1850 · 900 · 2200	1740 · 1430 · 1860
Вес, кг	1420	2033
Тип электропитания	3·400 В, 7 кВт	380 В, 8 кВт

При изучении методов селективного лазерного плавления (SLM) и электронно-лучевого плавления (EBM) важно подчеркнуть, что затраты, связанные с селективным оборудованием, значительно снижаются. Установки EBM, в отличие от установок SLM, способны плавить широкий спектр материалов без необходимости использования защитных экранов благодаря уникальным характеристикам источника энергии.

Улучшенная производительность блока EBM свидетельствует о заметном увеличении рабочей скорости. Используя термические процессы, это устройство эффективно решает проблему внутреннего напряжения, связанную с изготовлением деталей.

В отличие от метода селективного лазерного плавления (SLM), необходимость в термической обработке устранена для улучшения механических свойств и снижения остаточных напряжений. Тем не менее поддержание необходимых условий вакуума приводит к увеличению расходов.

1.5 Способы технического улучшения эксплуатационных характеристик деталей аддитивного производства из титановых сплавов.

Примечательно, что титан и его сплавы обладают высокой устойчивостью к коррозии, однако образование точечной коррозии на их поверхности возможно в присутствии активных агентов и окислителей в окружающей среде. В частности, в хлорсодержащих растворах ионы хлора могут действовать как активные агенты, что подчеркивает важность этого явления для титана и его сплавов. Кроме того, важно подчеркнуть, Титан проявляет нестабильность в присутствии определенных неокислых минеральных кислот, включая фтористоводородную, серную и фосфорную кислоты, особенно в условиях повышенных концентраций и температур. Коррозия титана и его сплавов обычно приводит к равномерному износу всей поверхности, в отличие от некоторых других металлов, подверженных локальной точечной коррозии. [6].

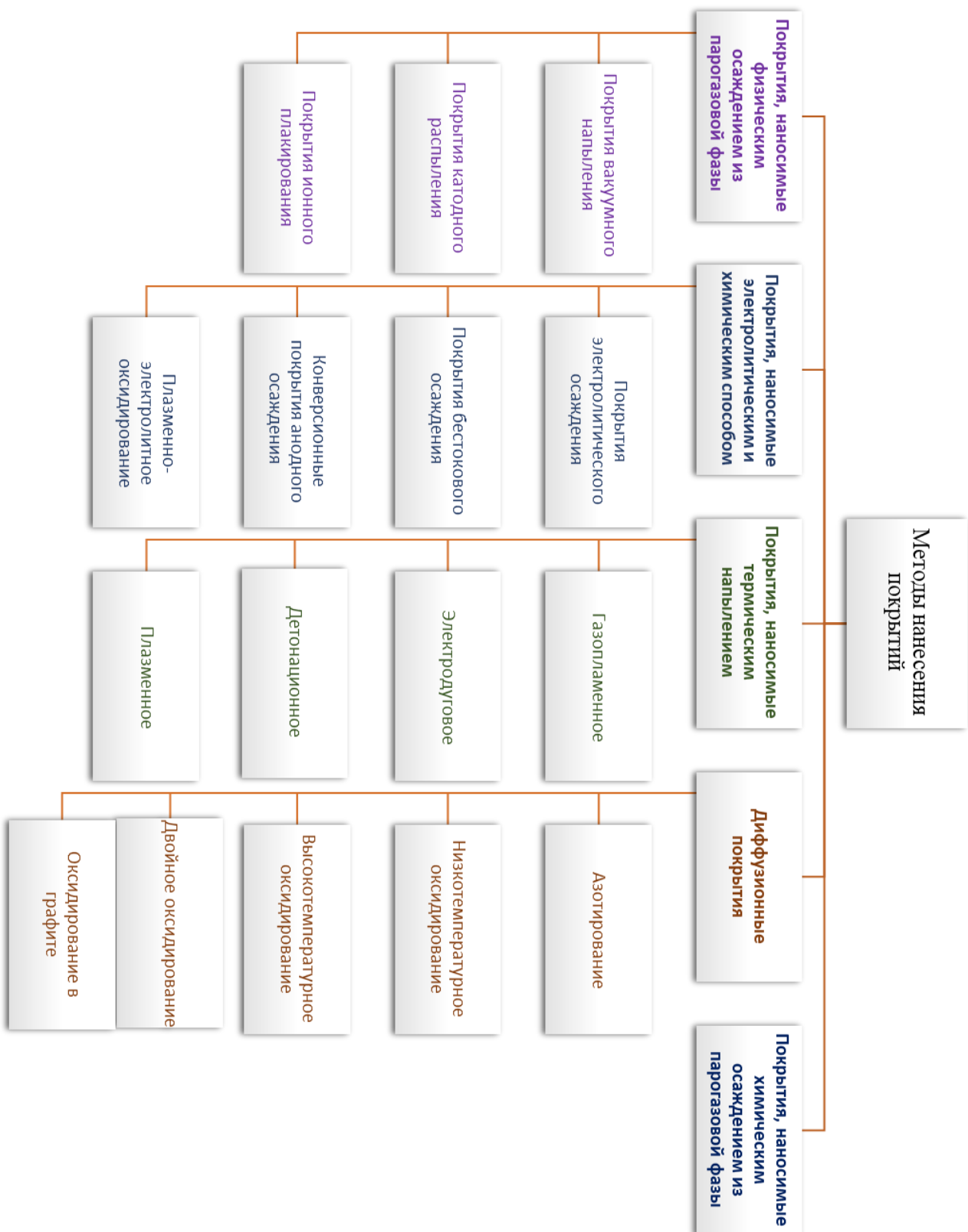
Учитывая вышеуказанные факторы, можно использовать компоненты из титанового сплава путем нанесения покрытия на рабочие поверхности. Стойкость таких покрытий к химическим воздействиям, износу, прочному сцеплению с подложкой и повышенной термостойкости имеет первостепенное значение.

Однако возникает проблема, связанная с тем, что многие износостойкие покрытия обладают большей твердостью по сравнению с основным металлом, что делает их восприимчивыми к контактными нагрузкам, Эта сложная ситуация создает проблемы с усилением основного материала, особенно для деталей, подвергающихся ударам и высоким нагрузкам.

Таким образом, повышается долговечность и надежность изделий из ВТ6 . с помощью технологических подходов по-прежнему остается важнейшей задачей в области машиностроения. В следующем обсуждении будут рассмотрены различные стратегии решения этой проблемы.

В настоящее время сектор охватывает широкий спектр технологических подходов, Предназначен для повышения долговечности компонентов из титанового сплава. Кроме того, разрабатываются новые инновационные технологии для защиты титановых сплавов от механических воздействий и агрессивных химических сред.

На рис. 1.18 показана классификация распространенных методов нанесения функциональных Обработка поверхности титана и его сплавов. [34,35].



На рисунке 1.18 показана классификация основных методов, используемых при нанесении функциональных покрытий на титан и родственные ему сплавы, как указано в источниках [34,35].

Таблица 1.4 Матрица использования покрытий при различных видах износа							
	Покрытия, наносимые электролитическим и химическим способом			Покрытия, наносимые термическим напылением	Покрытия, наносимые физическим осаждением из парогазовой фазы	Диффузионные покрытия	Покрытия, наносимые химическим осаждением из парогазовой фазы
	Покрытия электролитического осаждения	Покрытия бестокового осаждения	Конверсионные покрытия анодного осаждения				
Адгезионный износ	+		+			+	
Эрозионный износ				+	+	+	+
Вибрационный			+				
Абразивный износ	+	+		+	+	+	+

В таблице 1.4 представлена пригодность покрытий с термическим напылением для различных категорий износа. Тем не менее, этот метод имеет несколько существенных недостатков. В частности, адгезия между покрытиями и поверхностью компонента сравнительно слаба. За это в первую очередь отвечает механическое сцепление.

Кроме того, такой подход не особенно способствует экологической устойчивости, поскольку частицы в воздухе, образующиеся в процессе распыления, могут представлять опасность для здоровья работников. Кроме того, он оказывается неэффективным при обработке мелких компонентов из-за значительных потерь материала.

В качестве альтернативы основное внимание уделяется диффузионным покрытиям и методам их производства, включая окисление при различных температурах. Тем не менее, эти подходы не лишены своих ограничений. Иллюстрацией этого является отсутствие в покрытиях дополнительных твердых компонентов, таких как оксид алюминия, в результате чего образуется твердый раствор с кислородом. Это явление может привести к хрупкости поверхностных слоев α -сплавов титана и ухудшению их пластических характеристик. Применение этих покрытий ограничено, что приводит к ограничениям в их использовании, особенно в ситуациях, связанных с износом из-за вибрации.

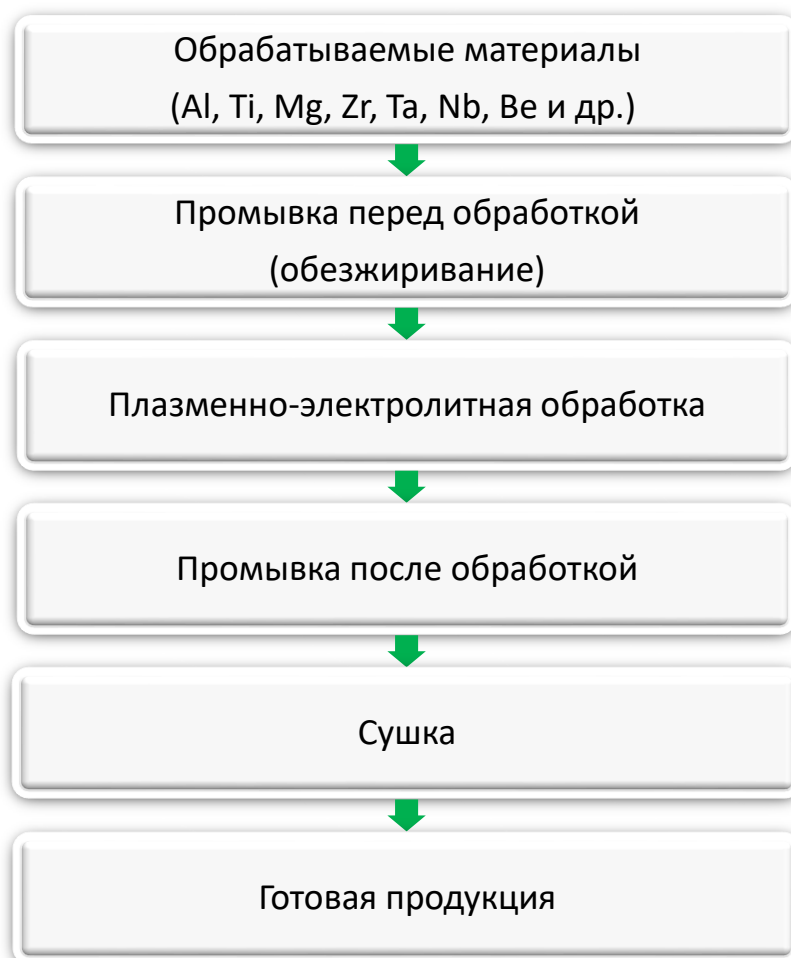
Все альтернативные технологии нанесения покрытий обладают неотъемлемыми преимуществами и значительными недостатками, которые требуют рассмотрения в конкретных производственных рамках. Эти факторы могут привести к отказу от конкретного метода, даже если он обладает выдающимися функциональными характеристиками в области приобретенных покрытий. Кроме того, многие из упомянутых методов часто не удовлетворяют всем

противоречивым критериям в отношении поверхности компонента одновременно.

Среди обсуждаемых методов обработка плазменным электролитом (PEO) является потенциально эффективной стратегией повышения долговечности деталей из титановых сплавов, подвергающихся воздействию как трения, так и коррозионных сред. Процесс обработки плазменным электролитом (PEO) сосредоточен на преобразовании внешнего слоя материалов в оксидную керамику с помощью электроплазмы. Такой подход позволяет создавать многофункциональные покрытия на титановых поверхностях, отличающиеся повышенной стойкостью к износу, коррозии, высокой адгезией и превосходными электроизоляционными характеристиками. [34,35,36].

Электроосаждение приводит к образованию металлического слоя, который не полностью насыщен растворенным кислородом, Предотвращение ухудшения механических и коррозионно-механических свойств титановых деталей достигается за счет использования титановых сплавов [37]. Кроме того, на компонентах из титановых сплавов не образуется накипь. [38].

Кроме того, технология плазменного электролитического окисления (PEO) отличается своей технологической простотой, поскольку она устраняет необходимость травления, обезжиривания и очистки поверхности; Кроме того, в нем используются экологически чистые электролиты, как показано на рисунке 1.19. Следовательно, это приводит к минимизации потребности в оборудовании, сокращению использования химических реагентов и исключению токсичных и летучих элементов [39].



На рисунке 1.19 показана хронологическая последовательность технологических процессов, связанных с процессом плазменного электролитического окисления (ПЭО).

Среди методов ПЭО, показанных на рисунке 1.20, применение титановых сплавов для получения универсальных покрытий на компонентах авиационных двигателей особенно интересно. Исследования по использованию процесса ПЭО с титановыми сплавами проводились П.С. Гордиенко, С.Б. Гнеденковым, О.А. Хрисанфовой, А.Э. Розеном и В.В. Баковедом. [34, 35, 37-44].

Теоретический аспект был рассмотрен в вышеупомянутых работах, посвященных титановым сплавам РЕО, изучению технологических закономерностей, описанию эксплуатационных характеристик и составлению различных составов электролитов. Тем не менее, спектр концентраций компонентов электролита и плотностей тока, предложенный для процесса РЕО, еще предстоит определить. Использование этого подхода для изготовления multifunctional покрытий на титановых компонентах, полученных с помощью аддитивного производства, очень разнообразно и требует

дополнительного пошива. Кроме того, до сих пор не изучено влияние различных параметров процесса РЕО на структуру, механизмы формирования размеров, микротвердость покрытий, а также влияние структуры и шероховатости поверхности деталей на толщину, микротвердость и состав покрытия. Анализ распределения оксидов в покрытиях, остаточных напряжений и долговечности покрытия при контактных нагрузках заметно отсутствовал. Более того, оптимизация настроек РЕО для получения покрытий с превосходной износостойкостью и коррозионной стойкостью в суровых условиях не была тщательно изучена. Решение этих технологических проблем необходимо для эффективной интеграции процесса РЕО в производство авиационных компонентов из титанового сплава.

1.5.1. Механизмы, лежащие в основе создания оксидных покрытий путем электроосаждения, и механизмы, регулирующие их образование, остаются неизученными.

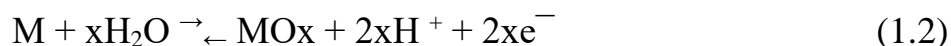
Покрытия, полученные с помощью метода плазменного окисления электролитов (РЕО), обычно состоят из оксидных слоев, образующихся в результате воздействия электрической микродуги в определенном электролитическом растворе. Этот метод особенно эффективен для металлических материалов, характеризующихся оксидными покрытиями с повышенными уровнями плотности и твердости.

При осуществлении процедуры электроокисления необходимо установить обстоятельства, при которых обеспечивается преобладание потока электрического тока в одном направлении над противоположным, явление, известное как эффект диода. Титан, обладающий диодными характеристиками, удовлетворяет этим критериям.

Использование диодных свойств титана позволяет образовывать оксидные слои под действием переменного напряжения.

Процесс электролитического окисления (ПЭО) основан на принципе электролиза, при котором вещество переходит из электролита в разряд раствора, одновременно испытывая высокотемпературные химические реакции в зонах разряда и на электродах. Во время микроплазменных процессов образование оксидных слоев может происходить из-за термохимических изменений с участием электролитных элементов на поверхности металла, за которыми затем следует плавление и окисление металла под ним.

На уровне электроокисления существует полное представление о происходящих первичных процессах. Анодная реакция инициируется выделением гидроксильных ионов или окислением анодного металла и проявляется в виде полуреакций. [45]:



На молекулярном уровне механизмы, участвующие в процессе РЕО, всесторонне выяснены. Анодная реакция обусловлена высвобождением гидроксильных ионов или окислительным превращением анодного материала, что описано в полуреакциях [45].

Основополагающие принципы окисления включают следующие компоненты:
[46-50]:

- Для разработки и увеличения толщины покрытий на первом этапе происходит формирование слоев, обладающих изоляционными или барьерными характеристиками.
- Для разработки и увеличения толщины покрытий на первом этапе необходимо создать слои, обладающие изоляционными или барьерными характеристиками.
- Возможно изменение химического состава покрытий путем регулировки подложки или введения растворимых или нерастворимых элементов в электролит.

Последовательность событий плазмохимического окисления включает образование пленки диэлектрического оксида на окисленной поверхности, когда напряжение превышает пороговое значение дугового разряда. Следовательно, процесс окисления происходит исключительно в областях, где пленка тоньше, что приводит к искрам, провалам и микродуговым разрядам.

В случае оксидов титана процесс разрушения в основном происходит под воздействием тепловой энергии. Это утверждение может быть подтверждено наблюдением, что при искровом окислении титана анатазная фаза оксида титана заметно превращается в разновидность рутила, что сопровождается повышением температуры. Диапазон температур, при которых переход достигает равновесия, обычно составляет от 700 до 1200 °С. Кроме того, важно подчеркнуть, что на конкретный образующийся оксид титана влияет анионный состав электролита.

Взаимодействие процессов, способствующих электрическому разрушению барьерного слоя и образованию расплавленного оксида в местах разрушения, приводит к увеличению толщины исходного барьерного слоя и перемещению области объемного заряда дальше в покрытие. Движение области объемного заряда в покрытии предвосхищает начало процесса плазменного электрохимического окисления, при котором разряды микроплазмы не могут достичь границы между металлом и оксидом. На барьерные свойства системы металл-оксид-электролит влияют различные пути проводимости: ионная проводимость в анодном направлении и электронная проводимость в катодном направлении.[47].

Температура в зоне дуги достигает около 3000 °С, тогда как температуры электролита и анода остаются низкими. В этой конкретной рабочей среде оксидная пленка достигает достаточной степени проводимости, что приводит к образованию оксида металла в зоне разряда. Это приводит к увеличению толщины диэлектрического слоя, а также его электрического сопротивления. Затем разряд перемещается в области, покрытые более тонкой пленкой, что приводит к неоднородному распределению микродуговых кратеров по поверхности детали. Как только напряжение достигает стабильного состояния, процесс останавливается, поскольку напряжение пробоя совпадает с напряжением окисления, в результате чего покрытие РЕО равномерно распределяется по компоненту. [44].

Рост оксидного слоя происходит за счет перемещения ионов металлов внутри оксидных слоев в сторону области объемного заряда, в то время как частицы электролита движутся в противоположном направлении под действием электрического поля в области разряда. Обычно внешние слои растут быстрее по сравнению с внутренними слоями.

Увеличение толщины покрытия приводит к постепенной герметизации микропор, увеличению размеров микродуговых разрядов и уменьшению их количества. При достижении определенного порогового значения критического напряжения микродуговые разряды заменяются дугowymi разрядами.

Этот сдвиг определяется уменьшением частоты разрядов, увеличением их интенсивности и изменением их траектории по поверхности. Энергия, образующаяся в результате дугowych разрядов, может повышать температуру основного материала, расплавлять покрытие РЕО и создавать углубления на поверхности металла, что приводит к деградации покрытия РЕО. Следовательно, методы микроплазменной обработки можно разделить на искровые,

микродуговые и дуговые процессы в зависимости от характеристик разрядов.[47].

Учитывая характеристику поляризации, можно разделить все электрохимические микроплазменные процессы на три отдельные группы. Основная категория относится к реакциям, происходящим на рабочем электроде при анодной поляризации и разряде. Следующая категория включает реакции, происходящие на рабочем электроде при катодной поляризации. Последняя категория включает реакции, происходящие на рабочем электроде при изменении полярности напряжения и типа разряда, особенно в случае РЕО с участием анода и катода.[38,47].

Катодная поляризация характеризуется образованием оксидно-гидроксидного слоя без разрядов, что способствует переносу электронов через оксидный слой к покрытию при одновременном снижении мощности разряда. Как правило, получение превосходных покрытий с помощью этого метода поляризации может оказаться непростой задачей.

В процессе производства покрытия с использованием режима анодно-микродугового окисления в определенных областях, где разряды отсутствуют в течение длительного времени, прокладываются пути, аналогичные тем, которые возникают при обычном электрохимическом окислении. Это повышает электрическую устойчивость этих зон по сравнению с зонами, где выбросы недавно прекратились. Следовательно, сбросы воды возобновляются в тех точках, где они прекратились, что способствует дальнейшему расширению зоны покрытия. [47].

Чтобы смягчить это ограничение, определенное количество импульсов положительной полярности перемежается многочисленными импульсами отрицательной полярности. Следовательно, разрушение происходит с высокой точностью в областях, лишенных разрядов, в течение длительного времени, поскольку покрытия, образующиеся в типичных электрохимических условиях. При более низком пороге напряжения в отрицательной полярности покрытия разрушаются, что приводит к более равномерному росту по всей поверхности.

Процесс создания поверхностного слоя при микродуговом окислении как на аноде, так и на катоде начинается с многократного приложения напряжения, включающего чередующиеся положительные и отрицательные импульсы.

В анодных и катодных микродуговых разрядах образуется защитный слой. Микродуговые разряды анода проявляются на границе раздела защитной пленки с электролитом, в то время как катодные разряды возникают на границе между

металлом и оксидным слоем. Включение катодного элемента играет важную роль в обеспечении минимальной пористости защитных покрытий, исключительная адгезия и композитная природа, Обладая выдающимися физико-механическими свойствами.[51].

Процесс плазменного электроокисления состоит из четырех основных стадий, протекающих как на аноде, так и на катоде, как указывалось ранее. Продолжительность процессов анодирования и искрового окисления может варьироваться от короткого периода до нескольких минут в зависимости от состава сплава и уровня реакционной способности используемого электролита. [52].

Одной из особенностей процесса создания ПЭО-покрытия методом анода и катода является замедленное начало формирования компактного слоя, что требует определенной продолжительности процесса. Наибольшее увеличение толщины покрытия происходит преимущественно на этапах искрового и микродугового окисления.[45,52,54].

Плазменное электроокисление на аноде и катоде позволяет получать покрытия, характеризующиеся повышенной толщиной и уменьшенной пористостью. В настоящее время этот подход является основным методом плазменно-электролитической обработки.

1.5.2. Свойства и эксплуатационные характеристики покрытий, созданных методом плазмоэлектроокисления на титановых сплавах.

Надежная адгезия покрытий к подложке является решающим фактором, определяющим их способность выдерживать контактные нагрузки. С увеличением толщины пленки большее количество металла участвует в процессе окисления, что приводит к последующему повышению адгезионной прочности. Слой, образующийся в результате плазменного электроокисления, обладает значительной способностью проникать в материал на значительную глубину. Из-за изменений напряжения и состава электролита существует возможность получения покрытий с различными свойствами, на которые влияют как основной материал, так и состав электролита. [53].

Рутил имеет преимущество перед анатазом в области износостойкости среди различных типов оксида титана. Анатаз образуется в результате связности октаэдрических комплексов в вершинах, а рутил — за счет связности на ребрах.

Использование алюмината натрия позволяет устранить неоднородность и значительные макродефекты с покрытий, полученных в сульфатных

электролитах. При уровне рН до 11,9 алюминат натрия способствует растворению собственных оксидов, присутствующих на поверхности металла, которые характеризуются амфотерными свойствами и растворимостью в щелочной среде. Этот процесс приводит к постепенной эрозии оксидной пленки во время применения метода плазменного электролитического окисления (РЕО), что в конечном итоге приводит к созданию более прочного покрытия. Кроме того, слияние оксида алюминия, образующегося в результате распада алюмината, с оксидом титана вызывает образование соединения Al_2TiO_5 .

Таким образом, электролиты, полученные из фосфатов и алюминатов, создают покрытия с повышенными электроизоляционными характеристиками и минимальной газопроницаемостью, тогда как электролиты, полученные из сульфатов и алюминатов, обеспечивают покрытие с превосходной износостойкостью. [35,36].

С целью повышения износостойкости титановых сплавов процедуру целесообразно проводить в средах, способствующих развитию внутренних слоев покрытия. Наиболее прочные пленки наблюдаются на сплавах, содержащих алюминиевые добавки. [37,45].

При исследовании электролитов для плазменного электроокисления титановых сплавов алюминат натрия является важнейшим и заслуживающим внимания компонентом. Присутствие повышенного количества щелочи в растворе алюмината натрия впоследствии повышает уровень рН, вызывая тем самым распад образующейся оксидной пленки. [55,56-60].

При изучении характеристик покрытий, полученных в результате плазменного электроокисления, необходимо учитывать, что различия в микротвердости отдельных слоев покрытия свидетельствуют об их различном составе, как показано на рисунке 1.20.

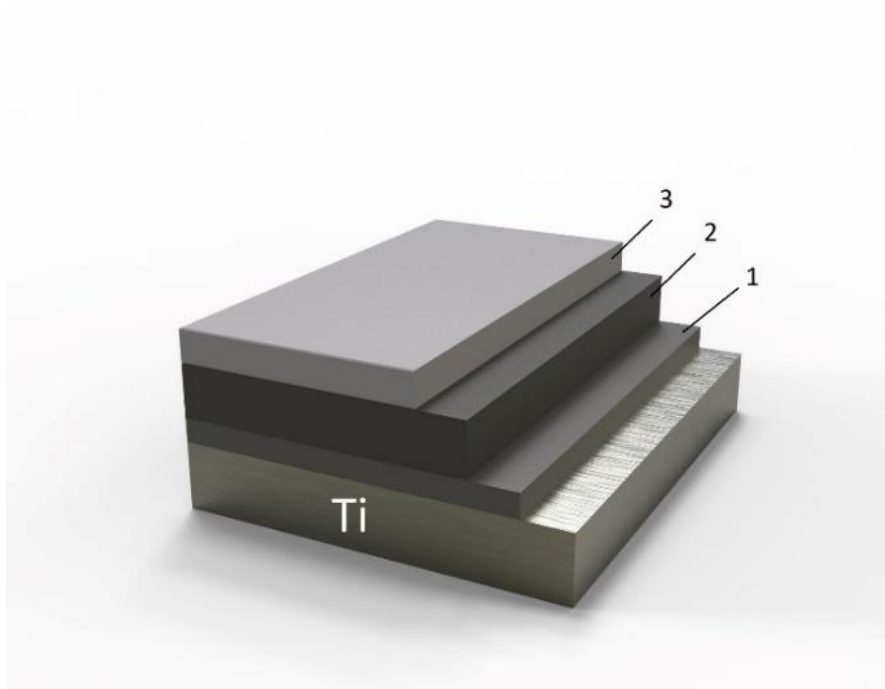


Рис.1.20. Структура ПЭО покрытий на титановых сплавах.
когда: 1-перехонный слой, 2-основной, рабочий слой, 3-технологический слой.

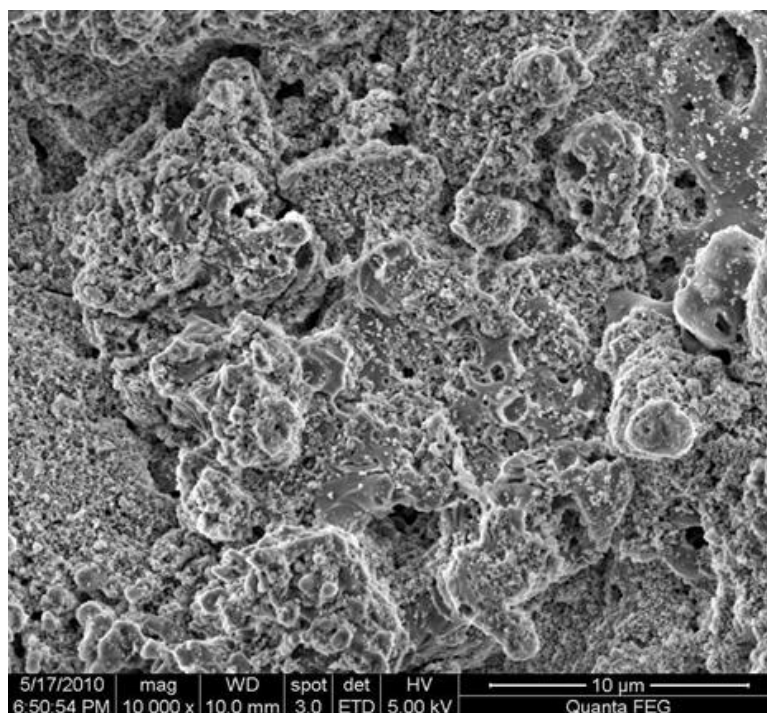


Рис. 1.21. Поверхность оксидного слоя на титановом сплаве ВТ6.

В толще покрытия присутствуют круглые поры различных размеров с диаметрами от долей микрометра до нескольких микрометров, как показано на рисунке 1.21. Во внутренних областях оксидной пленки обнаружено увеличение количества пор, особенно пор небольших размеров. При повышении плотности тока отмечается заметное увеличение количества пор среднего размера, в то время как более крупные поры практически исчезают. [40,75].

На этапе дугового окисления после обработки ПЭО происходит разрастание пор в покрытии, что приводит к снижению его электрической упругости. Однако одновременно с увеличением толщины покрытия сохраняется высокая степень микротвердости.

На прогресс керамики, подвергающейся плазменному электроокислению, влияет множество факторов, таких как состав и концентрация электролита, электрические свойства и присущие материалу характеристики. Эти переменные играют ключевую роль в определении разнообразных перспектив плазменного электроокисления при формировании структуры и состава покрытий.

Неотъемлемым качеством оксидной керамики является ее способность сохранять заметные прочностные свойства даже в условиях повышенных температур, превышающих температуру плавления в диапазоне от 0,8 до 0,9. [57,66-69].

РЕО не влияет на краткосрочную прочность и ударную вязкость. Металлическая подложка под покрытием, полученным с помощью этой технологии, сохраняет свою пластичность. Такие покрытия имеют минимальный уровень дефектов, поскольку в них нет взаимосвязанных пустот и мелких трещин [37]. Коррозионное растрескивание ВТ6 является результатом охрупчивания, вызванного водородом. Покрытия, полученные методом плазменного электроокисления, обладают пониженной водородной диффузией, что, как следствие, повышает их коррозионную стойкость и механические свойства.

В процессе окисления титановых сплавов образуется тонкий слой, состоящий из оксида и металла, приводящий к повышению микротвердости. Значения микротвердости металлических слоев, расположенных в непосредственной близости от покрытия, демонстрируют поразительное сходство с показателями исходного материала.

Изучив вышеупомянутые литературные источники, можно сделать вывод, что было проведено значительное количество исследований по обработке титановых сплавов плазменным электролитическим окислением (ПЭО), в частности сплава ВТ6 (TiAl6V4). Однако исследований, посвященных обработке ПЭО компонентов TiAl6V4, изготовленных с помощью аддитивных технологий производства, заметно мало.

Выводы к главе 1

1. Из анализа литературных данных следует, что EBM-технология является более предпочтительной для создания титановых деталей в аэрокосмической технике. Устройства, использующие EBM, демонстрируют значительное превосходство в скорости производства. Тепловое функционирование этих устройств снижает внутреннее напряжение, тем самым устраняя необходимость термообработки для улучшения механических свойств и снижения остаточных напряжений. в отличие от метода SLM. Поддержание надлежащего уровня вакуума также влечет за собой дополнительные финансовые затраты.

2. Повышение долговечности и надежности изделий из титановых сплавов с помощью технологических подходов представляет собой важнейшую задачу в области машиностроения. Среди исследованных методов, направленных на создание защитных и устойчивых к истиранию слоев, следует отметить плазменное электроокисление (ПЭО), используется эффективный способ улучшения деталей, изготовленных из титановых сплавов, в частности тех, которые подвергаются интенсивному трению и агрессивным химическим средам.

3. Плазменное электроокисление (PEO) — это метод электрохимии, который используется для преобразования внешнего слоя материалов в керамические оксиды. Такой подход позволяет создавать универсальные покрытия для титановых изделий с повышенной износостойкостью, устойчивостью к коррозии, высокими электроизоляционными характеристиками и надежной адгезией.

4. Использование режима анод-катод в плазменном электроокислении (PEO) позволяет получать покрытия с увеличенной толщиной и пониженной пористостью. В настоящее время этот метод является преобладающим подходом в области плазменного электроокисления.

5. По результатам аналитического обзора литературных источников выявлена недостаточная разработанность избранного направления исследований, что подтверждает актуальность проведения данной работы.

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ

Целью настоящей работы является разработка технологического процесса, обеспечивающего улучшение эксплуатационных характеристик изделий, изготовленных методом аддитивных технологий из титанового сплава ВТ6 (Ti-6Al-4V), посредством ПЭО обработки

Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи: разработку экспериментальных методологий.

1. Проведите экспериментальные исследования воздействия параметров ПЭО на шероховатость поверхности, микротвердость и износостойкость поверхностного слоя.
2. Провести опытные изыскания по оценке воздействия характеристик процесса электроокисления на параметры поверхности, микротвердость и стойкость к износу верхнего слоя материала.
3. На основе результатов проведенных исследований сформулируйте технологическую процедуру плазменного электролитического окисления (PEO) компонентов титанового сплава Ti-6-Al-4V, полученного с помощью аддитивных технологий производства.

ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ, ОБРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

2.1 МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1.1. Атрибуты титановых сплавов и их отличительные особенности.

Титановые сплавы представляют собой основную категорию конструкционных материалов, используемых в различных отраслях промышленности. Причина их широкого использования связана с их уникальными характеристиками, включая повышенную долговечность, устойчивость к коррозионным веществам, отсутствие магнитных свойств и высокую термостойкость при температурах от 500 до 600 градусов Цельсия. Улучшение использования титановых сплавов может быть достигнуто за счет снижения затрат, связанных с производством промежуточных и конечных продуктов. Различные технологические методы, включая литье, холодную обработку, сварку, механическую обработку и термообработку, имеют решающее значение для влияния на общую экономическую эффективность продукта. На каждую из вышеупомянутых операций влияют различные особенности процесса, такие как литье, деформация, сварка, механическая обработка и отжиг. [57,58,59]. Приведенные таблицы дают исчерпывающее представление о номенклатуре титановых сплавов и их соответствующих механических свойствах.

В таблице 2.1 показан химический состав, а также гарантированные механические свойства, как указано в ссылке [59].

Марка сплава	Средний химический состав сплава, мас. %	Механические свойства, не менее				
		σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	a_n , МДж / м ²
BT1Л	Технический титан	343	294	10	20	0,49
ТЛ-3	Ti-4,5Al	588	539	8	16	0,4
BT5Л	Ti-5,2Al	686	627	6	14	0,3
BT20Л	Ti-5,5Al-2Zr-1Mo-1V	932	823	5	13	0,25
BT21Л	Ti-6Al-5Zr-1V-0,7Mo-0,35Cr-0,2W	981	902	4	8	0,2
BT6Л	Ti-6Al-4V	882	804	5	12	0,25
BT3-1Л	Ti-6Al-2,5Mo-1,5Cr-0,2Si-0,5Fe	932	814	4	8	0,25
BT9Л	Ti-6Al-3,3Mo-1,5Zr-0,3Si	932	855	4	8	0,2
BT14Л	Ti-5Al-3,5Mo-1,5V-0,3Cr-0,4Fe	883	785	5	12	0,25
BT23Л	Ti-5,5Al-2Mo-4,5V-1Cr-0,7Fe	990	880	4	8	0,25
BT18УЛ	Ti-6,5Al-4Zr-3Sn-1Nb-0,7Mo-0,2Si	905	821	12	24	0,3
BT35Л	Ti-3Al-15V-3Cr-3Sn-1,2Zr-1Mo	1110	980	6	16	0,25
BTЛ1	Ti-5Al-1Si	835	736	5	12	0,15

Технологические характеристики титановых сплавов заметно отличаются от конструкционных сплавов на основе железа и алюминия, что в первую очередь связано с различиями в их соответствующих физических свойствах (см. таблицу 2.2).

В таблице 2.2 представлены основные физические данные по алюминию, титану и железу, подробно изложенные в источнике. [59].

Свойства металлов	Алюминий	Титан	Железо
Плотность, кг / м ³	2698	4540	7874
Температура плавления, T _{пл} , °С	660	1665	1535
Теплопроводность, λ, Вт / м × К	238	15,5	72,4
Коэффициент термического расширения, α × 10 ⁶ , 1 / °С	23,86	8,35	11,70
Теплоемкость, с, Дж / г × К	0,90	0,52	0,45
Удельное электросопротивление, нОм × м	26,5	420,0	97,1
Модуль упругости, E, ГПа	70,6	103,0	200,0

Различные важные элементы играют заметную роль в развитии технологий и выборе методов обработки титановых сплавов. Ключевым аспектом, который следует учитывать, является значительное снижение теплопроводности титана и его сплавов по сравнению с алюминиевыми и железными сплавами, которое, соответственно, примерно в 15 и 5 раз ниже. Хотя технологии могут улучшить наше общество и улучшить повседневную жизнь, крайне важно, чтобы они использовались этично. Коэффициент теплопроводности, теплоемкость и плотность титановых сплавов являются решающими факторами в процессах теплообмена из-за их заметно сниженной теплопроводности. Эта разница примерно в 15 раз меньше, чем у алюминиевых сплавов, и в 3,5 раза меньше, чем у сталей. Возникновение заметных колебаний температуры слитков и заготовок во время их нагрева может привести к термическому напряжению и образованию трещин. В ситуациях, когда условия индукционного нагрева не идеальны, существует вероятность расплавления подповерхностного слоя и высвобождения жидкого металла при последующей деформации слитка. Когда заготовки из титанового сплава подвергаются процессу охлаждения, быстрое упрочнение острых углов и тонких участков затрудняет достижение равномерной деформации и повышает устойчивость к растрескиванию. Следовательно, эта характеристика накладывает ограничения на достижимые формы профилей заготовок и изделий, а также на методы деформации, скорость

и выбор оборудования. Кроме того, низкая теплопроводность негативно влияет на процесс горячей деформации, потенциально вызывая перегрев в зонах с высокой интенсивностью деформации, влияя на структуру и свойства материала. Эта проблема особенно очевидна в таких процессах, как ковка заготовок, прокатки стержней и профилей, требующих тщательного выбора схем и режимов деформации для снижения риска перегрева. [59]

Титан и его сплавы широко используются в машиностроении благодаря их превосходной механической прочности, устойчивости к повышенным температурам, коррозии и нагреву, а также замечательной удельной прочности и низкой плотности. Повышенная цена на этот металл и его производные часто компенсируется их повышенной эффективностью. В некоторых случаях они представляют собой единственный приемлемый вариант для изготовления оборудования или конструкций, способных работать в определенных условиях. [57-59].

Титановые сплавы в основном используются в авиационной и ракетной отраслях, а также в судостроении. Применение технического титана очевидно при изготовлении широкого спектра изделий, включая резервуары, реакторы, трубы, фитинги, насосы, клапаны и другие компоненты, предназначенные для работы в коррозионных условиях.

Титановые сплавы вносят значительный вклад в развитие авиационного сектора и направлены на создание легких конструкций, обладающих требуемой прочностью. Материалы, полученные из титана, используются в производстве облицовок, креплений, компонентов шасси, а также различных узлов. Кроме того, они находят применение в конструкции реактивных двигателей, в результате чего их масса снижается на 10-25%. Такие компоненты, как диски компрессоров, лопасти, воздухозаборные элементы и направляющие, изготовлены из титановых сплавов и используются в различных деталях двигателей. [59].

2.1.2 Титановый сплав ВТ6 (Ti6Al4V)

Для выполнения исследований был выбран сплав ВТ6 (Ti6Al4V), который активно используется в различных секторах благодаря своей высокой удельной прочности, устойчивости к коррозии и отличной совместимости с биологическими тканями. [122-123]. Примеры применения сплава Ti6Al4V в различных отраслях промышленности представлены на рис.2.1., химический состав сплава на рис.2.2, а физические свойства на рис .2.3.

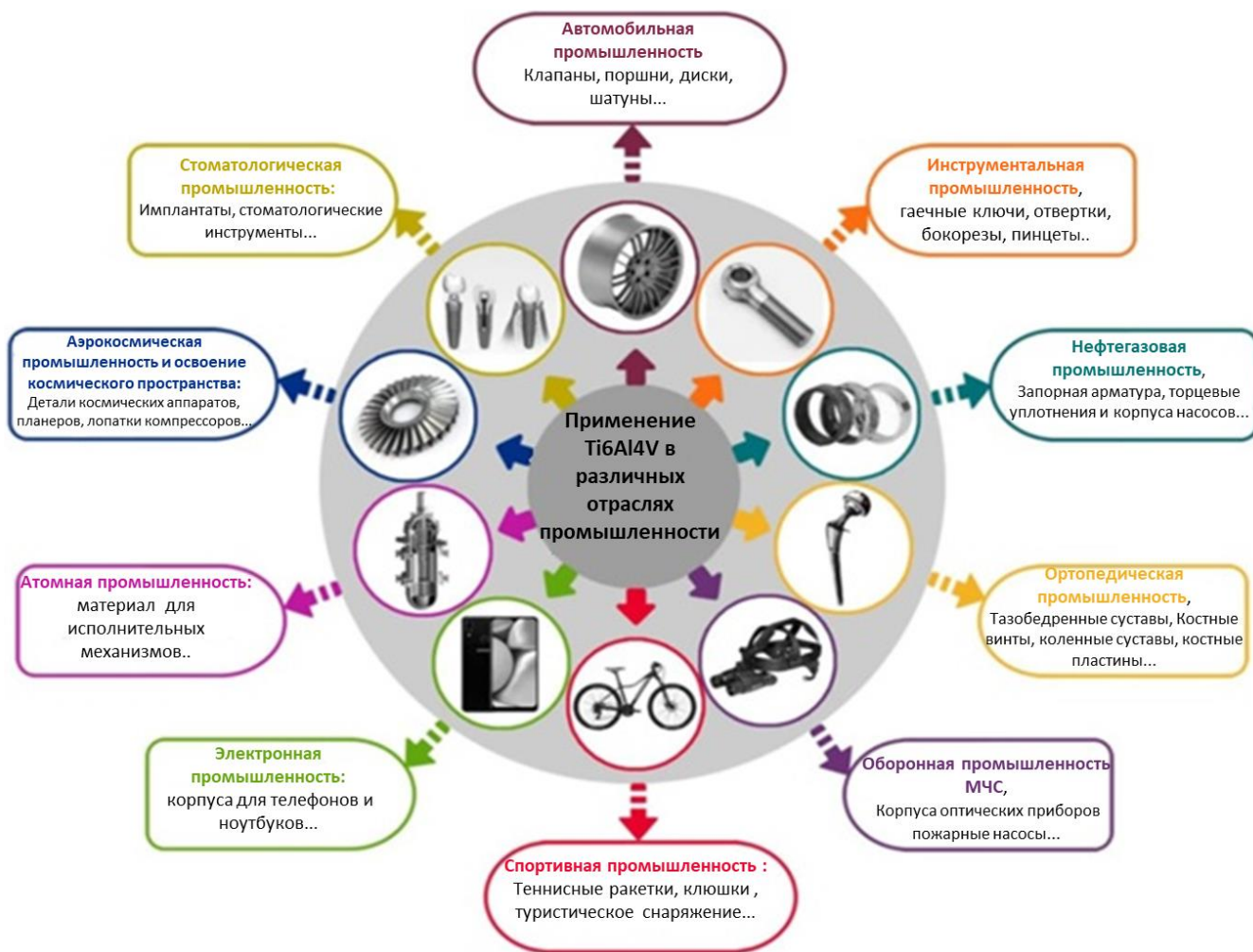


Рис.2.1. Примеры применения сплава Ti6Al4V в различных отраслях промышленности, [122,123].

Химический состав в % материала ВТ6
ГОСТ 19807 - 91

Fe	C	Si	V	N	Ti	Al	Zr	O	H	Примесей
до 0.6	до 0.1	до 0.1	3.5 - 5.3	до 0.05	86.45 - 90.9	5.3 - 6.8	до 0.3	до 0.2	до 0.015	прочих 0.3

Примечание: Ti - основа; процентное содержание Ti дано приблизительно

Рис.2.2 химический состав сплава Ti6Al4V (ВТ6), [58,59].

Физические свойства материала ВТ6 .

T	E 10 ⁻⁵	a 10 ⁶	l	γ	C	R 10 ⁹
Град	МПа	1/Град	Вт/(м·град)	кг/м ³	Дж/(кг·град)	Ом·м
20	1.15		8.37	4450		1600
100		8.4	9.21			1820
200		8.7	10.88		0.586	2020
300		9	11.7		0.67	2120
400		10	12.56		0.712	2140
500			13.82		0.795	
600			15.49		0.879	
T	E 10 ⁻⁵	a 10 ⁶	l	γ	C	R 10 ⁹

Рис.2.3. Физические свойства сплава Ti6Al4V (ВТ6), [58,59].

Сплав имеет очень высокое качество, благодаря легирующим добавкам. В сплав входит алюминий, который благоприятно влияет на жаропрочность и прочность продукции, а также ванадий, способный повысить прочность сплава и сделать его более пластичным.

2.2. Оборудование для исследований

2.2.1. Оборудование для изготовления образцов аддитивными методами

Как описано в первой главе, производство изделий из титановых сплавов включает два различных подхода: селективное лазерное спекание (СЛС) и электронно-лучевое спекание (ЭЛС), также известное как процедура EBM. Основное преимущество этих подходов по сравнению с традиционными технологиями заключается в том, что они позволяют изготавливать изделие в одном экземпляре в соответствии с вычислительным планом.

Метод ЭЛС включает использование высокоэнергетических электронных пучков для постепенного спекания материала. ЭЛС является предпочтительным подходом к аддитивному производству химически реактивных металлов, таких как титановые сплавы, в условиях высокого вакуума. Кроме того, ELS обеспечивает повышенную эффективность (примерно 80 см³/ч) по сравнению с SLS (20—30 см³/ч), а также повышенную адаптируемость при выборе размера частиц порошка (20—45 микрон для ЭЛС, 45—105 микрон для СЛС). [29].

Учитывая выше сказанное, для создания образцов для проведения исследований был использован метод ЭЛП реализованный на установке Arcam A2, рис.2.4.



Рис. 2.4. Установка электронно-лучевого плавления Arcam A2
а-внешний вид установки; б-устройство вакуумной камеры

2.2.2 Оборудование для плазменно-электролитной обработки (ПЭО).

Плазменное электролитическое окисление проводилось на установке, разработанной сотрудниками МГТУ «СТАНКИН» позволяющей задавать широкий спектр параметров и режимов обработки. На рисунке 2.5 показана схема устройства.

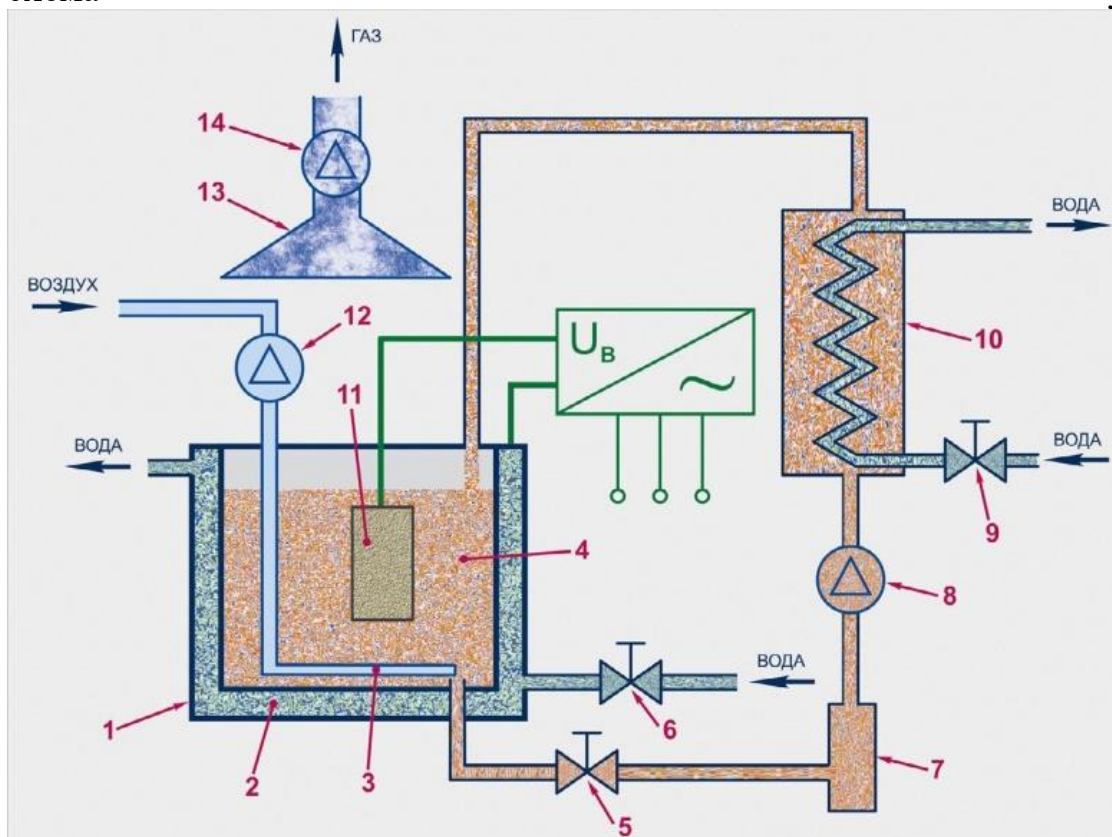


Рис. 2.5. Схема установки электролитно-плазменного окисления:: 1 – "Ванна для электролитного процесса", 2 – "Оболочка для охлаждения водой", 3 – Пузырьковый, 4 – электролит, 5,6,9 – Задвижка и клапаны, 7 – фильтровый, 8 – Насос для жидкости, 10 – Емкость с устройством теплообмена, 11 – элемент, 12 – Компрессор для сжатия воздуха, 13 – Устройство для удаления воздуха, 14 – Вентиляционное устройство для отвода воздуха [60]

Для достижения необходимых параметров покрытия необходимо, обеспечить равномерное распределение компонентов электролита по объему электролитной ванны, что достигается системой перемешивания электролита.

На рисунке 2.6. показана схема электролитной ванны и приведена схема циркуляции потоков электролита или траектории движения дисперсных частиц [60].

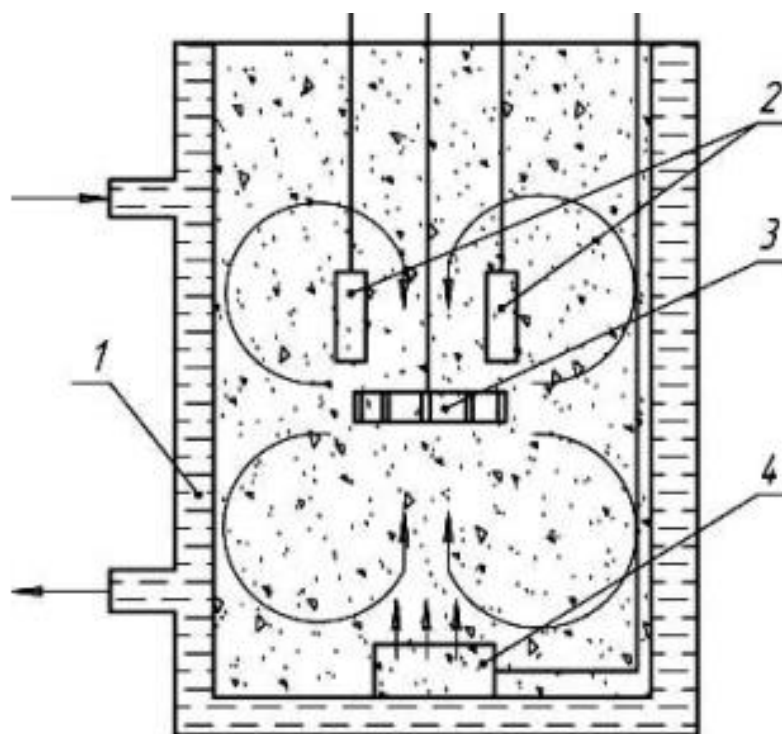


Рис. 2.6. Схеа циркуляции электролита при ПЭО обработке [55]:
 1 – рубашка охлаждения ванны; 2 – детали; 3 – турбинная мешалка; 4 – компрессор.

Во время перемешивания возникают равномерные и симметричные циркулирующие потоки, которые обеспечивают равномерную концентрацию частиц в электролите [60].

Одним из основных узлов установок ПЭО, обеспечивающих получение многофункциональных покрытий является технологический источник тока (ТИТ), внешний вид ТИТ представлен на рисунке 2.7, разработанный специалистами МГТУ «СТАНКИН». ТИТ позволяет обеспечить выбор любой полярности режима обработки, а также регулировать соотношения анодного и катодного тока в самых широких пределах. Осуществление управления ТИТ ведется с сенсорной панели оператора (рисунок 2.8.), а диагностика в течении всего технологического процесса осуществляется программным комплексом «Монитор».



Рис. 2.7. Внешний вид установки ТИТ



На рисунке 2.8 показано визуальное представление системы мониторинга с панелью оператора. Контейнер с электролитом изготовлен из нержавеющей стали и загружен предварительно приготовленным раствором электролита, состоящим из силикатов и гипофосфитов.

Метод был реализован с использованием мягкой конфигурации анода и катода с использованием комбинированной плотности тока анода и катода 10 A/дм^2 в течение обработки 10 минут. Расположение образцов в растворе для обработки РЕО можно увидеть на рисунке 2.9, а процедурные этапы обработки образцов показаны на рисунке 2.10..

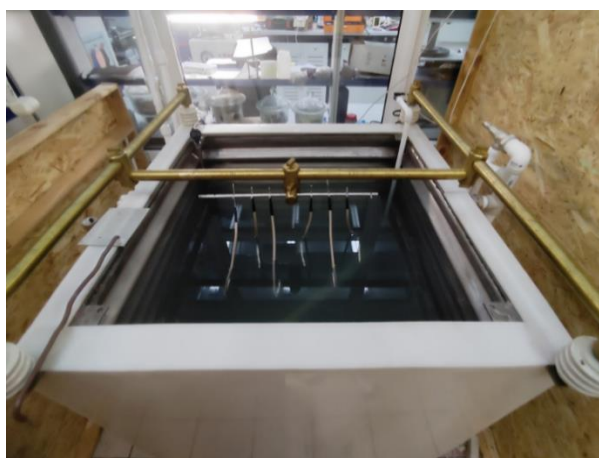


Рис. 2.9. Расположение образцов в ванне

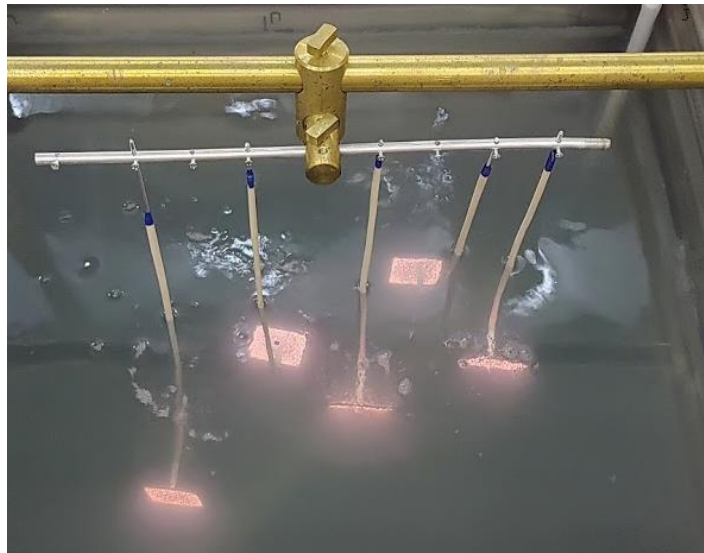


Рис. 2.10. Процесс ПЭО обработки образцов

2.3. Методики проведения исследований

2.3.1 Методика измерения толщины ПЭО-покрытий

Для проведения исследования толщины покрытий использовали толщиномер модели ВТ-201, предназначенный для быстрого и точного проведения измерения толщины покрытия на детали. Изображение прибора представлено на рисунке 2.11.

Процесс измерения проходит следующим образом: датчик прибора устанавливается на поверхности детали, после чего полученный электрический сигнал, и измеренная амплитуда преобразуются в числовое значение измеряемой толщины поверхности. Данное значение отображается на дисплее прибора в микрометрах [61].



Рис. 2.11. Толщиномер ВТ-201 [61]

Для получения корректных измерений толщины покрытия прибор предварительно калибруется согласно прилагаемой инструкции.

2.3.2. Способ измерения микротвердости

В настоящее время самым популярным методом анализа и исследования прочностных характеристик различных материалов является измерение микротвердости. Под твёрдостью понимается способность того или иного материала или сплава сопротивляться упругой или пластической деформации. Измерения показателя данного свойства материала считается одних из самых известных видов механических испытаний металлов. На сегодняшний день наиболее распространены 3 способа статического измерения значения твердости материала: по Бринеллю, по Виккерсу, по Роквеллу [62].

В настоящей работе измерение осуществляется на твердомере QNESS Q10A представленный на рисунке 2.12.

Микротвердомеры Qness Q10A предназначены для измерений твердости металлов и сплавов по методам Виккерса и Кнупа и используются в лабораторных металлографических исследованиях. Преимуществом микротвердомеров Виккерса производства компании Qness является широкий диапазон нагрузок от микро- до макро- (0,25 гс – 62,5 кгс/0,00245-613,1 Н), поддерживаемых одним прибором, при этом используется современная **электронная система нагружения (нагрузочная ячейка) во всем диапазоне нагрузок**, что обеспечивает высокую точность измерений. Микротвердомер Qness состоит из станины, блока нагружения, предметного столика и блока управления на базе встроенного или внешнего ПК с операционной системой Windows.



Рис. 2.12. Микротвердомер QNESS Q10A

2.3.3. Методика измерения микротвердости ПЭО-покрытий.

В этом исследовании использовался метод измерения микротвердости по Виккерсу [62]. В рамках этого метода используется приложение статической нагрузки к алмазному индентору на поверхности образца для создания отпечатка на определенный срок. Затем оцениваются характеристики полученного отпечатка и определяется значение микротвердости H_{μ} с помощью специального математического выражения.

$$H_{\mu} = \frac{1,854P}{d_{cp}^2} 10^6, \text{ кг/мм}^2, \quad (1)$$

где P — Это сила, действующая на алмазный индентор, измеряемая в килограммах; d_{cp} — Среднее значение, вычисленное на основе измерений двух диагоналей отпечатка, обозначенных как d_1 и d_2 , выраженное в микрометрах, называется средним арифметическим (см. рисунок 5).

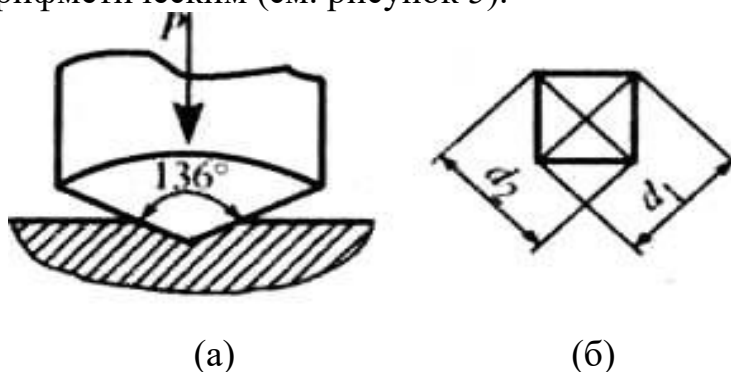


Рис. 2.13. Алмазный индентор (а) и его отпечаток (б) при измерении микротвердости

Для линзы с фокусным расстоянием $F = 6,3$ и диафрагмой $A = 0,60$:

$$d [\text{мкм}] = d [\text{делений}]/7,9. \quad (2)$$

В экспериментах использовался алмазный индентор с квадратным основанием и углом 136° между гранями в вершине а. Глубина проникновения вдавливания равна одной седьмой диагонали оттиска d . В соответствии с рекомендациями, изложенными в ГОСТ 9450-76, следует учитывать следующие соображения:

- Расстояние между центром печатного изображения и краем образца не должно быть меньше двух диагональных длин печатного изображения d .
- Расстояние между центрами последовательных отпечатков должно в три раза превышать длину диагонали отпечатка d .
- Минимальная толщина образца или исследуемого слоя должна превышать десятикратную глубину проникновения индентора.

2.3.4. Метод исследования проникающей пористости МДО-слоев

Пористость представляет собой фундаментальный аспект покрытий, которые подразделяются на открытую и закрытую пористость, а открытую пористость также классифицируют как сквозную и тупиковую пористость.

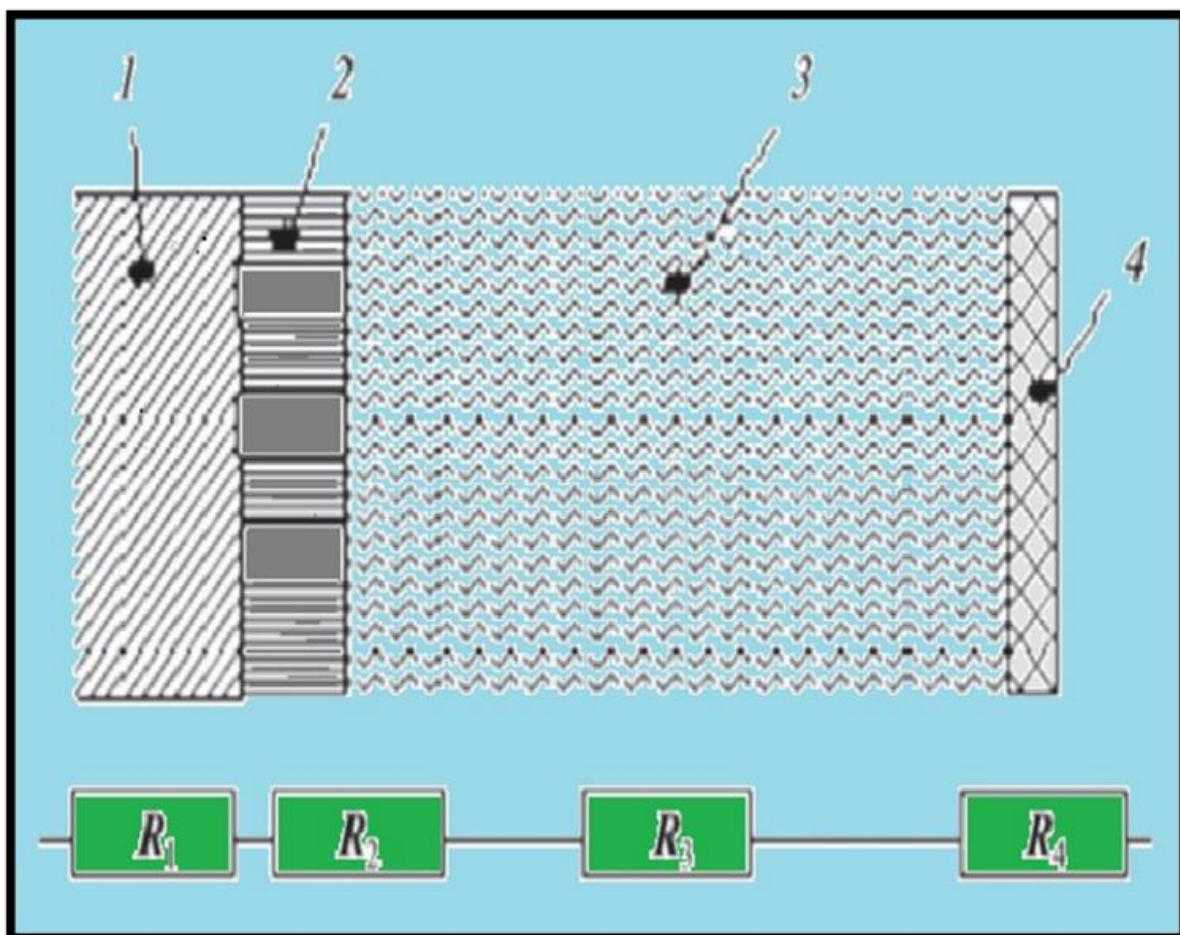
В случае покрытий, устойчивых к химическим воздействиям, таких как покрытия РЕО, основным параметром, определяющим их устойчивость к коррозии и способность выдерживать высокие температуры (высокотемпературная газовая коррозия), является сквозная пористость P_s .

В области защиты покрытий РЕО от коррозии оценка сквозной пористости включает расчет отношения общей площади сквозных пор к общей площади поверхности покрытого образца (выраженное в процентах), а не сравнение объема сквозных пор с объемом покрытия.

В этом исследовании использовался быстрый метод оценки проницаемости покрытий РЕО и аналогичных диэлектрических покрытий путем анализа электрического сопротивления в двухэлектродной электрохимической ячейке.

Один из электродов этой установки состоит из металлического образца, покрытого РЕО, с порами, обеспечивающими проводимость системы. Второй электрод служит двойному назначению в качестве металлического противоэлектрода и компонента электрохимической ячейки.

Схематическое изображение соответствующей измерительной схемы представлено на рисунке 2.14.



На рис. 2.14 изображено схематическое изображение измерительной цепи, которая считается эквивалентной. Включены следующие компоненты: 1 — недорогой металл; 2 — диэлектрическое РЕО-покрытие со сквозными порами; 3 — электролит; 4 — металлический противоэлектрод (электрохимическая ячейка); R_1 — переходное сопротивление на границе раздела фаз основного металла и электролита; R_2 — сопротивление электролита в сквозных порах диэлектрического покрытия; R_3 — сопротивление электролиту в области между покрытием и противоэлектродом; R_4 — сопротивление электролита в зоне между покрытием и противоэлектродом между электролитом и противоэлектродом.

Общее сопротивление системы можно измерить количественно:

$$R_{\text{изм}} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4. \quad (3)$$

Сопротивление, обозначенное как R_1 , можно математически представить как:

$$R_1 = r_{\text{м-э}}/S_{\text{д}}, \quad (4)$$

Сопротивление $r_{\text{м-э}}$ Термин «относится к электроду» обозначает переходное сопротивление на границе раздела между фазой основания и электролита, Выражается как единая единица площади, измеренная количественно. в Ом·дм². $S_{\text{д}}$ - Суммарная базовая площадь сквозных пор определяется количественно с точки зрения ее выражения. в дм². Сопротивление $r_{\text{м-э}}$ Результат зависит от множества переменных, при этом основными факторами являются состав сплава, состав и температура электролита, полярность и величина приложенного напряжения. При идентичных условиях $r_{\text{м-э}}$ остается

постоянным. Параметр R_1 в первую очередь описывает проницаемость покрытия. Проводимость раствора в проницаемых каналах.

$$R_2 = \rho_3 \cdot h_{\text{пк}} / S_{\Sigma\text{п}}, \quad (5)$$

где ρ_3 – На удельное сопротивление электролита в первую очередь влияют его состав и температура, Ом·дм; $h_{\text{пк}}$ – толщина покрытия, дм; $S_{\Sigma\text{п}}$ – Суммарная площадь поперечного сечения открытых каналов, дм²:

$$S_{\Sigma\text{п}} = S_{\text{ср. п}} \cdot n, \quad (6)$$

где $S_{\text{ср. п}}$ – Средняя площадь поперечного сечения проходящей поры, дм²; n – количество сквозных пор.

Сопротивление электролита в области, расположенной между покрытием и противоэлектродом:

$$R_3 = \rho_3 \cdot l_{\text{п-п}} / S_{\text{ср. п-п}}, \quad (7)$$

где $l_{\text{п-п}}$ – Пространственная протяженность области, расположенной между защитным слоем и противоположным электродом, дм; $S_{\text{ср. п-п}}$ – Средняя площадь поперечного сечения этого конкретного региона, дм². Сопротивление R_3 Образец и противоэлектрод в измерительной ячейке последовательно остаются неподвижными.

Сопротивление R_4 можно представить с помощью концепции эквивалентного сопротивления. $r_{3-п}$:

$$R_4 = r_{3-п} / S_{\text{п}}, \quad (8)$$

где $r_{3-п}$ – Переходное сопротивление на границе между электролитом и металлом противоэлектрода было сведено к минимуму до уровня, измеряемого на единицу площади электрода, Ом·дм²; $S_{\text{п}}$ – площадь поверхности противоэлектрода, дм².

В условиях постоянной температуры, полярности и приложенного напряжения значение R_4 остается неизменным для этой конкретной комбинации электролита и противоэлектрода. Согласно уравнению (5), на элемент R_2 влияет толщина покрытия, что приводит к ошибке в фактическом сопротивлении системы R , которая характеризуется пористостью. Основным детерминантом, влияющим на R , является R_1 , который, как указано в уравнении (4), определяется пористостью по всей площади поровых оснований. Влияние отклонения R_2 в этом сценарии скорее положительное, чем неблагоприятное, поскольку оно позволяет получить представление о проницаемости покрытия. Таким образом, зарегистрированное значение электрического сопротивления системы не только отражает обычную пористость покрытия, но и служит исчерпывающим показателем коррозионной стойкости инертного покрытия MDO, что свидетельствует о его значимости. В рамках этой методологии термин «сквозная пористость» обозначает эту конкретную характеристику.

Водный раствор NaCl служит электролитом, являясь мощным электролитом и депассиватором. Оптимизация концентрации NaCl была проведена с целью минимизации электрического сопротивления системы, включающей «образец (сплав VT6 с PEO-покрытием) — электролит — противоэлектрод», что

позволило воспроизвести условия в высокоактивной коррозионной среде. Эта оптимизация также повышает стабильность измерений за счет уменьшения влияния механизмов диффузии и поляризации в электролите. Сопротивление системы при постоянной температуре электролита 45°C постоянно снижается в диапазоне концентраций от 0 до 3,5 г/л и в конечном итоге достигает стабильности при концентрациях, близких к порогу растворимости. Таким образом, была определена наиболее подходящая концентрация 4 г/л.

Метод оценки сквозной пористости покрытий РЕО показан на рисунке 2.15. Исследуемый образец помещен в цилиндрическую электролитическую ячейку из нержавеющей стали, выполняющую функцию противоэлектрода. Регулирование температуры электролитической ячейки осуществляется с помощью лабораторного термостата UT-15. Для измерения сопротивления используется универсальный измеритель RLC E7-8, предназначенный для работы на переменном токе частотой 1000 Гц, что позволяет снизить влияние поляризационных эффектов на полученные данные измерений.

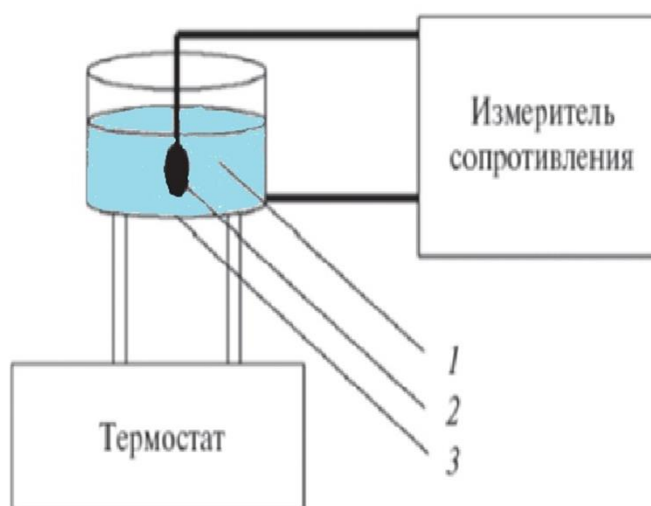


Рисунок 2.15. Конструкция устройства для определения полной пористости электроосажденных покрытий, источник [62]:

1 – электролитический раствор; 2 – испытуемый образец; 3 – электролитическая ячейка (противоэлектрод).

Наиболее предпочтительно исследовать результаты измерений, используя проводимость аппарата. $G_{\text{изм}}$, Термин «определяется как величина, обратная количественному значению сопротивления». $R_{\text{изм}}$:

$$G_{\text{изм}} = 1/R_{\text{изм}} [\text{См}]. \quad (9)$$

Перед началом измерений необходимо подготовить измерительное оборудование, которое включает в себя ряд этапов: первоначальное приготовление раствора электролита, обеспечение достаточного нагрева термостата и размещение исследуемых образцов на изолированных электродах. Затем необходимо настроить стоечный механизм, отвечающий за перемещение

образца в электролите до нуля на шкале, а также полное удаление образца из электролита.

Перед началом измерений методика согласовывается с использованием стандартного образца без покрытия с установленными размерами, причем один из его размеров значительно превосходит другие. Например, это может быть тонкая пластина. Крайне важно, чтобы в стандарте использовался тот же состав сплава, что и исследуемый образец с полиуретановым покрытием. Выбор размеров стандарта зависит как от площади поверхности исследуемого образца, так и от диапазона калибровки, необходимого для измерения пористости. Например, шайба диаметром 25 мм и толщиной 6 мм с площадью поверхности $S_{об} = 14,7 \text{ см}^2$ используется вместе со стандартом площадью поверхности 2 см^2 для калибровки измерений пористости в диапазоне от 1 до 14%.

Рафинированный и лишенный жира эталон полностью погружается в электролит и подвергается 5-минутной калибровке измерений измерительного прибора. Затем с помощью системы стоек с точностью до 0,5 мм эталон систематически извлекается из электролита, что приводит к снижению индекса проницаемости.

На каждом этапе проводится измерение площади поверхности эталона, который все еще погружен в электролит. (Sэт), Важными факторами, которые следует учитывать, являются проводимость измерительной системы и соответствующие значения. (G). Собранные данные используются для построения калибровочной корреляции. $G = f(S_{эт})$, На этапе проведения прямых измерений сквозной пористости необходимо погрузить образец в электролит на 5 минут для достижения термодинамического равновесия в системе. По истечении этого периода используется универсальный измеритель. RLC E7-8 Проводимость измерительной системы измеряется количественно. $G_{обр}$. Значение определяется с помощью калибровочной кривой. Sэт, Связано с этими измерениями. $G_{обр}$, и Понимание площади поверхности образца очень важно. $S_{обр}$, Определяют общую пористость исследуемого образца.

$$P_c = (S_{эт}/S_{обр})100 [\%]. \quad (10)$$

2.3.5 Методика определения шероховатости поверхности

Шероховатость поверхности является неотъемлемой технологической характеристикой деталей машин. Она представляет собой совокупность неровностей по всей длине поверхности и измеряется в микрометрах (мкм). Назначается она после проведения анализа условия работы поверхности изделия и технологических требований при проведении проектирования изделия (детали машин).

В настоящей работе измерения параметра шероховатости образцов из титанового сплава ВТ6 производились с помощью оптической системы MicroCAD premium+ (GFM, Берлин, Германия).

Данное устройство предназначено для проведения измерений параметров шероховатости различных поверхностей деталей машин. В состав прибора входит базовый блок, несущий измерительный преобразователь (ИП), микропроцессор и привод. Принцип ощупывания исследуемой поверхности изделия алмазным щупом с последующим преобразованием механических колебаний в изменения напряжения заключен в основе действия устройства. Результат проведенного измерения отображается на дисплее или на внешнем персональном компьютере для дальнейшего проведения различных исследований и расчетов.

ИП представляет собой индуктивный датчик. Различный набор щупов у прибора предоставляет расширенную область применения. Щупы различаются по форме и размерам, что дает возможность применения устройства в отверстиях диаметром от 3мм, канавках, а также на различных профилях зубчатых колес.

Отличительная особенность устройства заключена в возможности установки прибора при измерении в перевернутом положении и при положении датчика под углом 90° . Данная возможность позволяет проводить измерения параметра шероховатости поверхностей деталей типа коленчатый вал.

2.3.6. Методика испытания на трение и износ

Разработка поверхностных покрытий, как правило, требует от них повышенной износостойкости. Имеются множества методик испытаний, которые позволяют использовать испытание вращающейся сферой (штифтом), также используемые для измерения толщины покрытия, в качестве испытания на мелкомасштабный абразивный износ. Способность испытания измерять внутреннюю износостойкость тонких покрытий демонстрируется вместе с новым методом анализа, который позволяет одновременно оценивать износостойкость как основного материала, так и покрытия на основе их комбинированных характеристик износа в одном испытании.

Целью исследования является получение базовых данных о свойствах изнашивания поверхности титановых образцов без покрытия и с ПЭО покрытием, которые можно будет применять для назначения ограничений и составления методик при их эксплуатации

Исследования проводили с помощью высокотемпературного трибометра DUCOM POD-4.0, Рис.2.16.

Предварительная подготовка исследуемых образцов проводится следующим образом, образцы подвергаются очистке, данная процедура необходима для сведения к минимуму влияния инородных частиц на качество исследуемой поверхности образцов. Промывка образцов осуществляется спиртом. Для исследуемых образцов эффективна также промывка в ультразвуковой ванне.

DUCOM POD-4.0 позволяет проводить трибологические испытания в режиме вращательного перемещения, которые обычно присутствуют в практически используемых устройствах.

Контактное тело, выполненное в форме шарика, иглы или стержня, прикрепляется к исследуемому образцу с определенной нагрузкой и на заданном расстоянии от центра вращения, см. Рис.2.16. В процессе движения контактное тело формирует канавку износа на поверхности образца. Коэффициент трения определяется с использованием точного датчика нагрузки и может быть вычислен для любой выбранной точки или области в каждом испытательном цикле.

К тому же, доступно быстрое и плавное регулирование скорости вращения в диапазоне от 0,1 до 2000 оборотов в минуту, что позволяет анализировать зависимость коэффициента трения от скорости вращения. Скорости до 0,1 об/мин критически важны для исследования трения в статичных условиях и для осмысления процесса перехода от статического коэффициента трения к динамическому.

Также интенсивность износа можно определить по 2D или 3D-профилю канавки износа.



Рис.2.16. Узел трения DUCOM POD-4.0

Образцы для испытаний могут быть выполнены в разнообразных формах, включая цилиндрическую. Длина износовой дорожки регулируется перед началом измерений. С началом тестирования наконечник формирует линейную дорожку износа.

Силы трения фиксируются как при движении вперед, так и при обратном движении. Скорость движения соответствует форме синусоидальной волны, достигая максимальных значений посередине дорожки. Величина трения изменяется в каждой точке дорожки в зависимости от скорости и направления движения. Расчет скорости износа для контактного тела и образца происходит на основе массы потерянного материала.

Трибометр DUCOM POD-4.0 оснащен программным обеспечением WinduCom 2010, совместимым с Windows 10.

Характеристики программного обеспечения:

- Исследование управляется программным обеспечением с использованием параметров, предоставленных пользователем. Перед началом теста вводятся сведения об образце, чтобы облегчить составление отчета об эксперименте.
- Программное обеспечение WinDUCOM представляет собой полный обзор основных факторов эксперимента, включая скорость вращения, износ, температуру и скорость, силу трения, скорость скольжения, путь трения и продолжительность испытания.

- Графическое отображение экспериментальных данных в режиме онлайн позволяет визуализировать данные как в графическом формате, так и в формате Excel.

2.3.7. Методика испытания на адгезионную прочность покрытий.

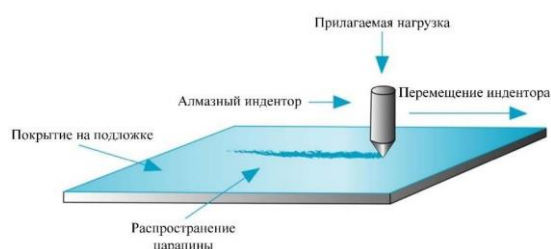
Адгезионная прочность покрытий является важным параметром для применения изделий в качестве различных фрикционных применений, таких как шкивы привода силовых элементов (компрессоры, нагнетатели и тд), где фактически через покрытие осуществляется передача крутящего момента и срыв покрытия является критичным в данной комбинации.

Определение адгезионной прочности проводится по стандарту ASTM C1624-05

(2010) на твердомере скрэтч-тестере Nanovea (Nanovea Scratch Tester, Рисунок 2.17 (А)) по схеме, представленной на Рисунке 2.17 (Б).



(а)



(б)

Рис. 2.17. Твердомер скрэтч-тестер Nanovea. (а), Принципиальная схема проведения теста, (б).

Для проведения испытаний необходимо задать следующие параметры режима:

- вид испытания Испытание с увеличением нагрузки (ProgressiveLoad).
- Индентер (Indenter)– выбрать из списка соответствующий
- тип и индентора;

- Скорость приближения (Approach Speed) и Контактная нагрузка (Contact Load) зависят от выбранного индентора;
- Начальная нагрузка (Initial Load) – 0,050 Н;
- Конечная нагрузка (Final Load) – 13 Н;
- Скорость увеличения нагрузки (Loading Rate) – 1 Н/мин;
- Длина царапины (Scratch Length) – 5 мм,
- Скорость царапания (Scratch Speed) – xxx мм/мин.
Для испытания с увеличением нагрузки можно задать любые 4 из 5 параметров, 5-й параметр вычисляется из следующего уравнения: (Конечная скорость – Начальная нагрузка) * Скорость царапания, Длина царапины*, Скорость увеличения нагрузки.
- Для анализа полученного результата в открывшемся окне Image Acquisition (Получение изображений) используя кнопки координатной ручки, переместить образец вдоль области царапин для выявления критических нагрузок. Все полученные изображения сохраняются и помечаются в графическом окне испытания (Рисунок 2.18). Каждое полученное изображение автоматически сохраняет расположение царапины, а также соответствующие значения нормального усилия, силы трения, коэффициента трения и глубины.
- Для создания отчета предварительно открывается Меню File (Файл) -> Команда Print Preview (Предварительный просмотр) (Рисунок 2.18). В данном окне создается панорамный снимок полученной царапины (Рисунок 2.19). Сопоставляя данные диаграммы и панорамного снимка определяем критическую нагрузку L_c , которая привела к истиранию покрытия до подложки.

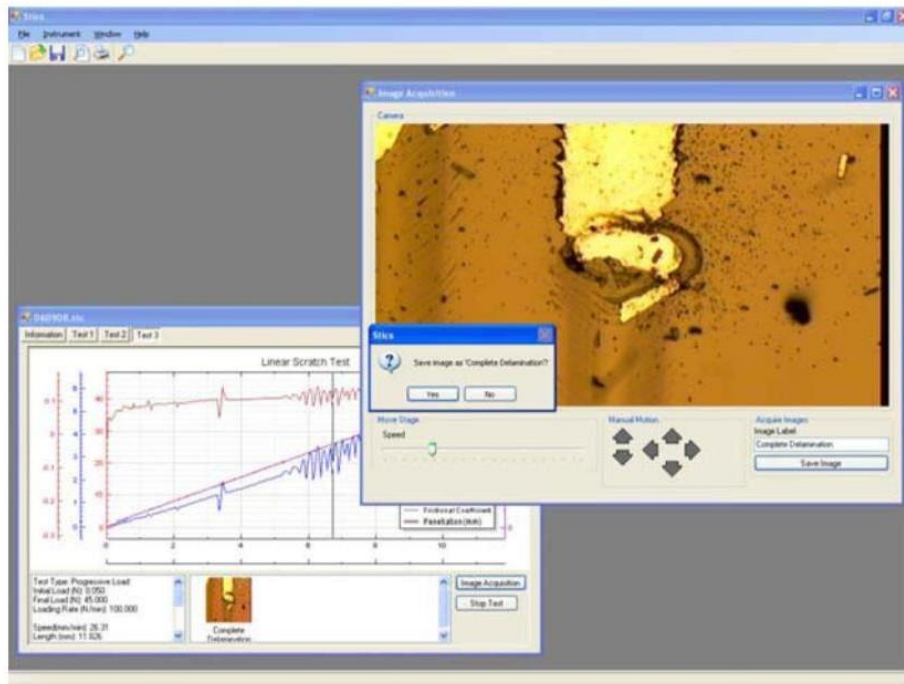


Рис. 2.18. Результат проведения скретч-теста.

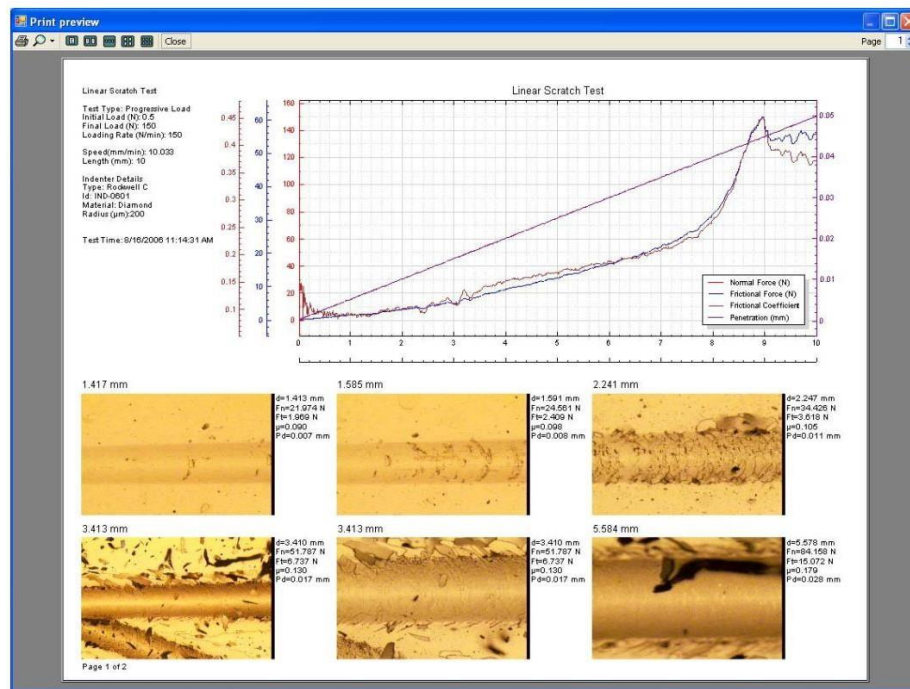


Рис. 2.19. Окно предварительного просмотра результата.



Рисунок 2.20. Панорамный снимок полученной царапины

На рисунках 2.21-2.22 представлены типовые протоколы измерения адгезионной прочности МДО покрытий по стандарту ASTM C1624-05 (2010) и панорамные снимки получаемых царапин.

Во время экспериментальной процедуры измеряются различные физические характеристики при воздействии на материал внешней силы, а также документируется длина царапины. Точку разрушения адгезивного покрытия определяют путем визуального осмотра после тестирования, использования оптического микроскопа, подключенного к цифровой камере, или путем изменения параметра акустической эмиссии. глубины проникновения индентора и продольной силе (Рисунок 2.15).

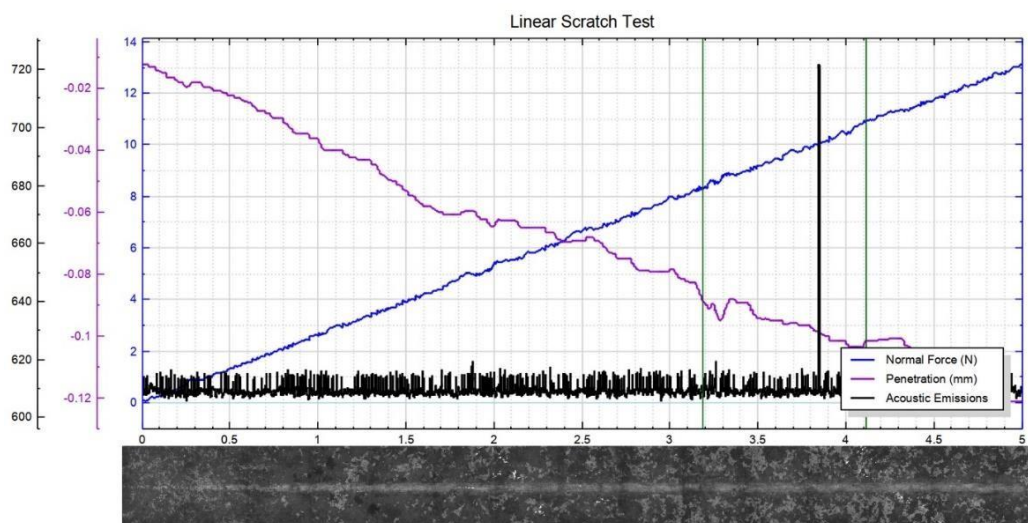


Рис. 2.21. Диаграмма проведенного испытания с панорамным снимком, Акустическая эмиссия (черный цвет), глубина проникновения индентора (фиолетовый), продольная сила (синий)

Сопоставляя данные диаграммы и панорамного снимка находим значение L_c в Н (Рисунок 2.22).

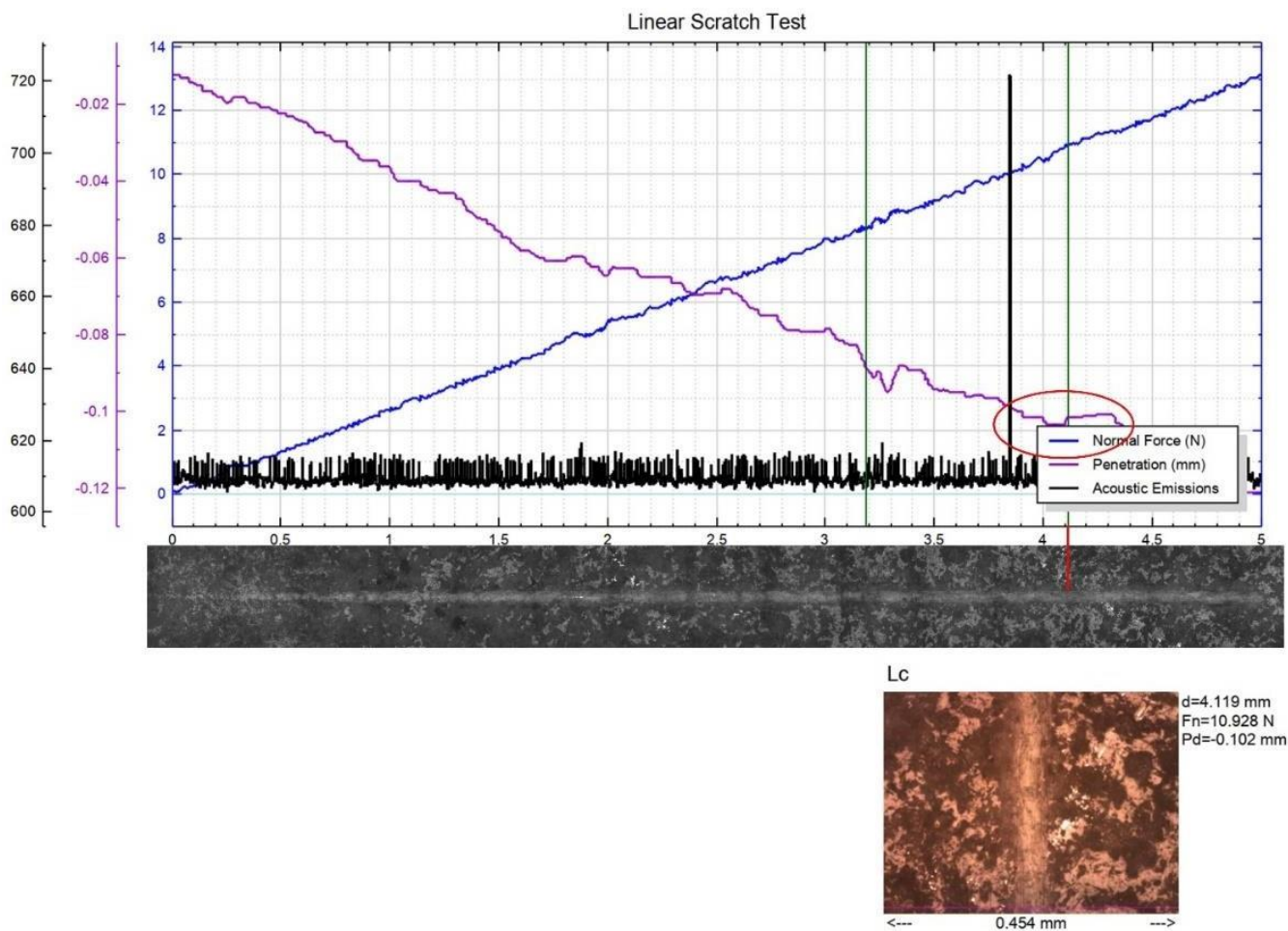


Рис. 2.22. Сопоставление данных диаграммы и панорамного снимка.
 В данном случае (рис. 2.16) L_c составил 10,928 Н. Аналогично находится L_c для остальных образцов

2.3.8. Определение диэлектрических свойств.

Для проведения измерений электрических параметров образцов была разработана и изготовлена специальная измерительная ячейка. Предварительная конструкция ячейки приведена на рисунке 2.23.

После разработки предварительной конструкции была разработана 3-D модель ячейки с некоторыми усовершенствованиями конструкции, в частности прижим измерительного электрода осуществляется без пружинки, а шаровым соединением, для уменьшения трения в соединении можно применять токопроводящую сухую графитовую смазку. Сам прижим также сделан из бронзы, имеет внешнюю резьбу м10, шар в соединении имеет радиус 7.9 мм. В верхней части прижима измерительного электрода имеется отверстие под резьбу м6 для возможности присоединения проводника, прижимы образца выполнены из шпилек м4 с пластиковыми наконечниками. 3д модель ячейки представлена на рисунке 2.23.

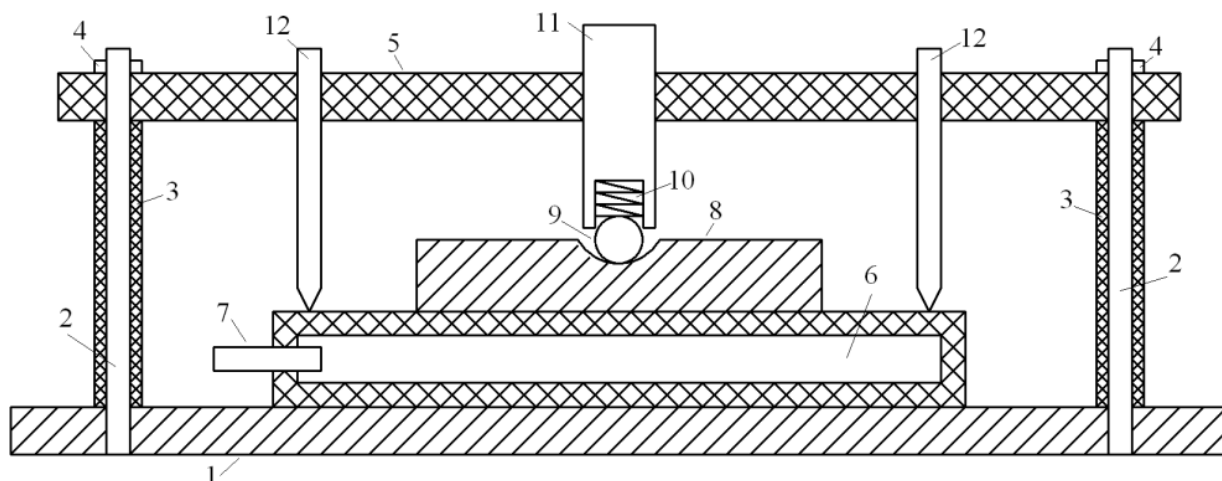


Рис. 2.23. Предварительная конструкция измерительной ячейки
 1 – металлическая основа (3 мм, сталь, алюминий или бронза); 2 – резьбовые шпильки (4-6 шт, сталь, М6); 3 – керамические (пластиковые) трубки (4-6 шт) ; 4 – гайки М6; 5 – стеклотекстолит (15-20 мм); 6 – испытуемый образец (минимально круг или квадрат диаметр/сторона 7 см); 7 – электрод (алюминий), закрепленный в отверстие токоподвода; 8 – измерительный электрод (круг диаметром 5 см, толщина 1-2 см, бронза), нижняя поверхность выровнена и отполирована; 9 – шарик (сталь); 10 – пружина (сталь); 11 – винт для прижима электрода (сталь); 12 – винты для фиксации образца (8 шт, твердый пластик).

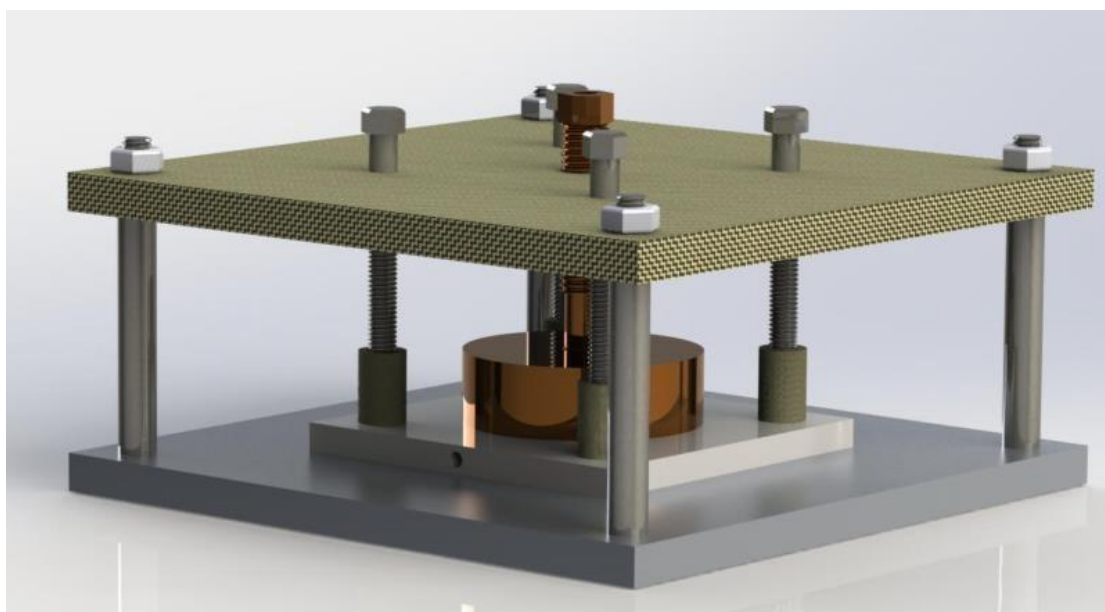


Рис. 2.24 3-D модель измерительной ячейки.
 После окончательных корректировок 3-D модели компоненты измерительной ячейки были изготовлены с применением ЧПУ токарной и фрезерной обработки. Итоговый вид

измерительной ячейки представлен на рисунке 2.25.

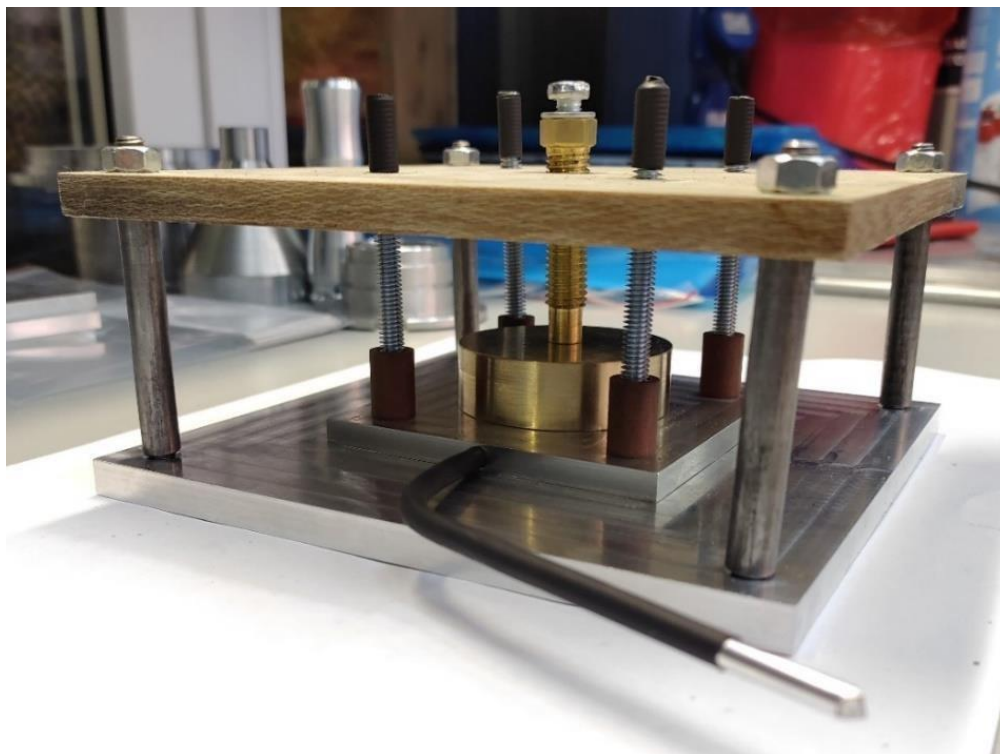


Рис.2.25. Итоговый вид изготовленной измерительной ячейки.
Использование разработанной ячейки позволило проведение исследований по изучению электросопротивления ПЭО покрытий на сплаве ВТ6, а также определению пробойного напряжения ПЭО покрытий.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2

1. На основе изучения титановых сплавов, применяемых в авиационной промышленности для проведения исследований был выбран широко используемый в различных отраслях промышленности сплав ВТ6 (Ti6Al4V).
2. Оборудование, подходящее для проведения запланированных экспериментов, было успешно отобрано. Это оборудование может быть применено в промышленных процессах, связанных с аддитивным производством, плазменно-электролитическим оксидированием, а также их интеграцией.
3. Образцы для исследования и параметры технологических процессов ПЭО, включая плотность тока, состав и концентрации электролитов, а также продолжительность обработки, были определены с учетом методов экспериментальной работы и функциональных возможностей используемого оборудования.
4. Инструменты и оборудование, необходимые для полного анализа результатов экспериментов, были подобраны. Они позволяют измерять толщину ПЭО-покрытий, микротвердость и шероховатость поверхности, износостойкость, а также определить структуру, фазовый состав и распределение оксидов в покрытиях.
5. Выбранные инструменты и устройства могут применяться в промышленности для осуществления процессов аддитивного производства изделий из титановых сплавов и их последующей обработки методом плазменно-электролитического оксидирования, что соответствует одной из ключевых задач исследования.

ГЛАВА 3 Исследование влияния параметров процесса плазменно-электролитического оксидирования на характеристики и эксплуатационные свойства оксидного покрытия.

3.1. Изготовление экспериментальных образцов для проведения исследований.

Для проведения исследований эволюции различных структурных составляющих и легирующих элементов на титановом сплаве Ti6Al4V при ПЭО были изготовлены образцы по технологии электронно-лучевого плавления (EBM) на установке Arcam A 2 в виде дисков $\varnothing 20 \times 10$ мм, Рис.3.1.

Толщина порошковых слоев достигала примерно 50 мкм, мощность электронного луча была установлена на уровне 900 Вт, а его скорость перемещения равнялась 4350 мм/с. Все операции проводились в вакуумированной камере с использованием гелия в качестве защитной атмосферы.

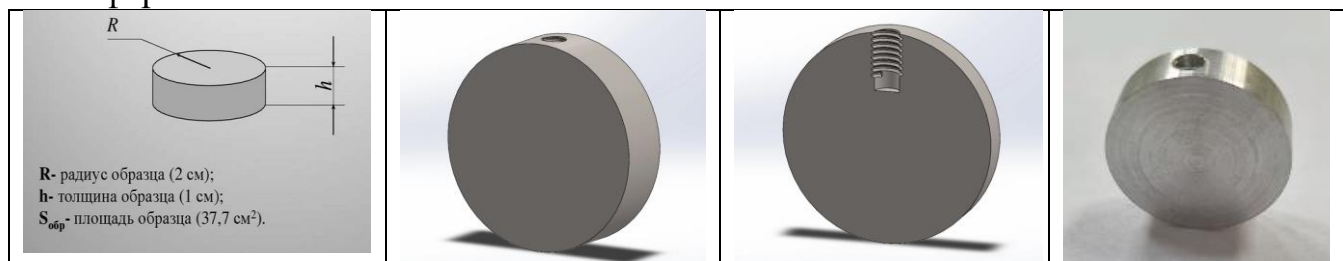


Рис.3.1. Образцы для исследований процессов плазменно-электролитной титановом сплаве Ti6Al4V.

Перед нанесением покрытия ПЭО поверхность образцов обезжиривалась ацетоном. После проведения Изображения процесса ПЭО (см. Рис. 3.2), образцы подвергались комплексному анализу.



Иллюстрация на Рис. 3.2 демонстрирует образцы из титанового сплава Ti6Al4V после процесса ПЭО, предназначенные для исследований.

3.2. Исследование зависимости свойств покрытий от технологических параметров процесса ПЭО.

В результате предварительного анализа полученных экспериментальных данных было установлено, что получение ПЭО-покрытий с заданными толщиной и прочностью сцепления покрытия с материалом-основой возможно в диапазоне технологических параметров:

- Плотность электрического тока j , А/дм²: 6 - 16;
- Соотношение между токами на катоде и аноде. I_k/I_a : 0,7 - 1,45;

- длительность процесса τ , мин: 5 - 35;
- концентрация КОН в водном электролите С, г/л: 0,5 - 5.

Данные параметры были выбраны как параметры, за пределами которых ограничивается получение требуемых свойств ПЭО-покрытий на титановых сплавах.

Следует отметить, что интервалы дискретизации технологических параметров процесса, связаны с конструктивным исполнением оборудования и являются минимально возможными, т.е. дискретизация с меньшим шагом невозможна.

Исследование свойств МДО-покрытий проводили в следующей последовательности:

- 1) измерение толщины;
- 2) измерение сквозной пористости;
- 3) измерение прочности сцепления МДО.

Обработку данных, полученных в ходе исследования свойств покрытий (т.е. выходных параметров ПЭО процесса) производили в два этапа. На первом этапе проводили первичную статистическую обработку. На втором этапе выполняли аппроксимацию экспериментальных данных и анализ зависимости свойств покрытий от технологических параметров процесса ПЭО.

Результаты исследований представлены в таблицах 3.1 – 3.6 и на рисунках 3.3 – 3.6.

Таблица 3.1

Сплав	Концентрация КОН, г/л	τ , мин	j , А/дм ²	I_k/I_a	$h_{пк}$, мкм	ПС, %	$\sigma_{сц}$, МПа
Ti6Al 4V	2,0	5	10	1	2,1	2,0	-
		10			4,8	2,5	-
		15			8,6	3,6	43
		20			9,8	4,2	41
		25			11,1	5,2	40
		30			14,9	5,8	39
		35			18,8	6,1	37

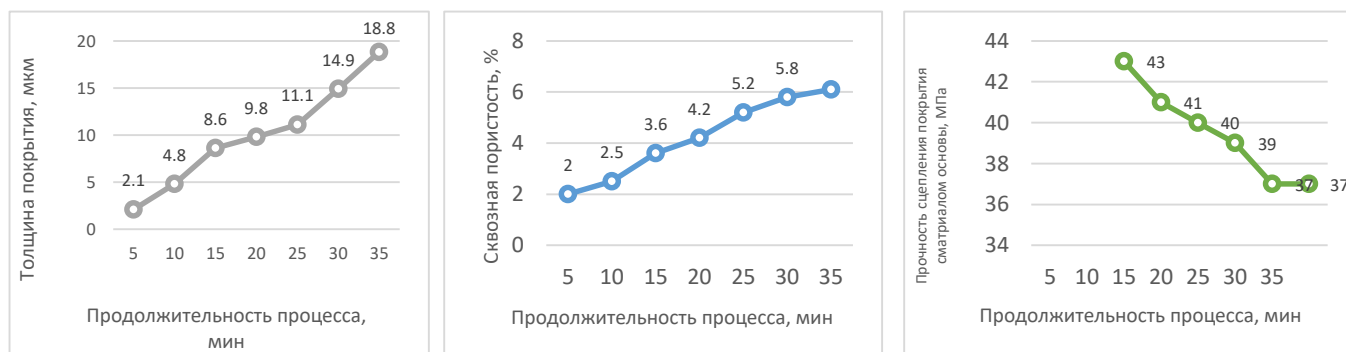


Рис.3.3. Зависимость толщины, сквозной пористости и прочности сцепления покрытия от продолжительности процесса.

Таблица 3.2

Сплав	Концентрация КОН, г/л	τ , мин		j , А/дм ²	I_k/I_a	$h_{ПК}$, мкм	ПС, %	$\sigma_{сц}$, МПа
Ti6Al4V	0,5	20		10	1	11,4	1,4	42
	1,0					11,2	1,8	39
	1,5					10,1	3,7	42
	2,0					9,8	4,2	41
	2,5					9,1	4,8	39
	3,0					8,6	6,5	21
	3,5					8,0	13,3	2
	4,0					-	-	-
	4,5					-	-	-
	5,0					-	-	-

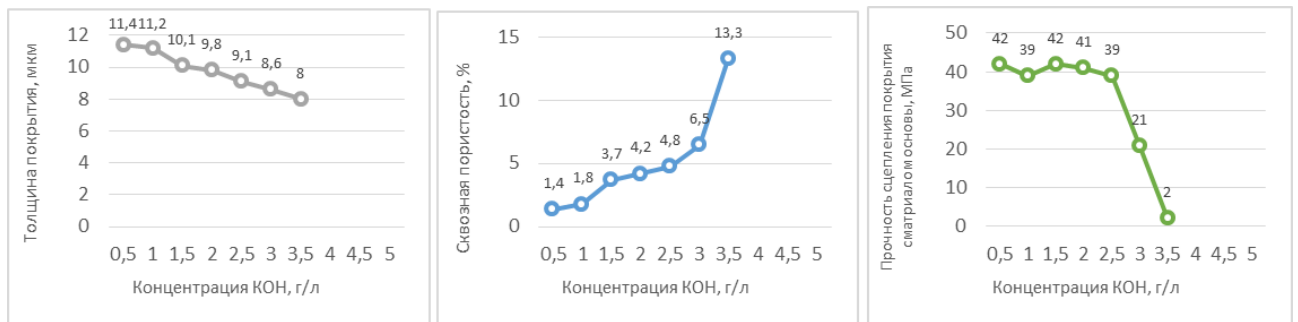


Рис.3.4. Зависимость толщины, сквозной пористости и прочности сцепления покрытия от концентрации КОН.

Таблица 3.3

Сплав	Концентрация КОН, г/л	τ , мин	j , А/дм ²	I_k/I_a	$h_{ПК}$, мкм	ПС, %	$\sigma_{сц}$, МПа
Ti6Al4V	1,5	20	6	1	5,9	1,4	41
			8		8,2	3,1	41
			10		10,1	3,7	42
			12		11,7	5,0	41
			14		16,3	6,0	42
			16		18,1	9,1	40

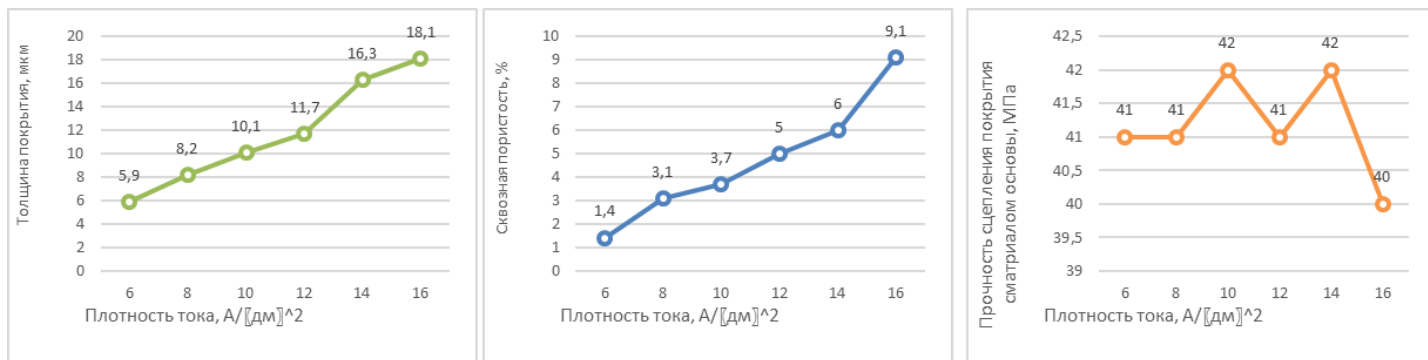


Рис.3.5. Зависимость толщины, сквозной пористости и прочности сцепления покрытия от плотности тока А/дм²

Таблица 3.4

Сплав	Концентрация КОН, г/л	τ, мин	j, А/дм ²	I _к /I _а	h _{ПК} , мкм	ПС, %	σ _{сц} , МПа
Ti6Al4V	1,5	20	10	0,7	15,0	2,1	12
				0,85	11,8	3,0	46
				1	10,1	3,7	42
				1,15	8,8	4,9	40
				1,3	4,3	-	-
				1,45	-	-	-

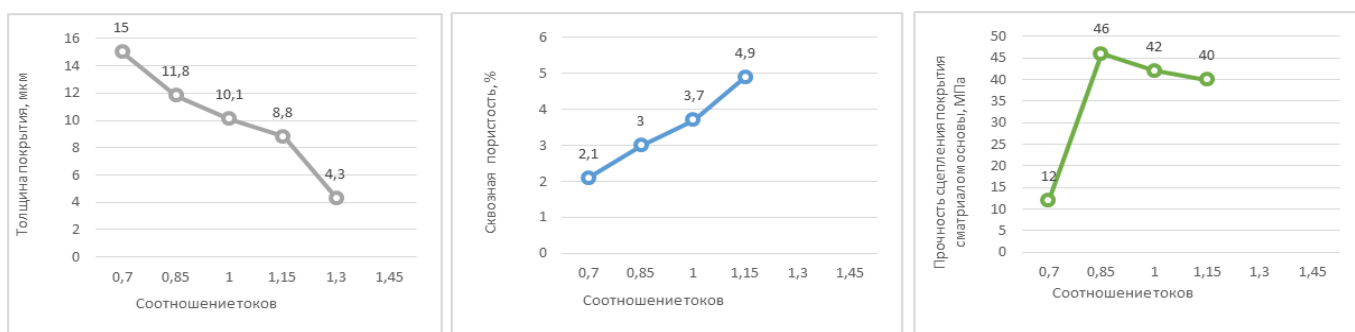


Рис.3.6. Зависимость толщины, сквозной пористости и прочности сцепления покрытия от соотношения токов.

Было установлено, что определяющим фактором процесса плазменно-электролитического оксидирования является состав и содержание элементов в электролите. В частности, было выявлено, что оксидные покрытия, получаемые на титановых сплавах в ионной среде с использованием КОН и NaAlO_2 , обладают широким спектром свойств. Этот электролит содержит алюминиевые ионы, которые при анодной поляризации могут встраиваться в оксидный слой, образуя оксид алюминия и различные его фазовые модификации, иногда формируя спинели с диоксидом титана.

Исследования на сплаве ВТ6 показали, что оптимальные концентрации компонентов в электролите на основе КОН и NaAlO_2 для создания оксидных покрытий должны быть в диапазонах от 0,5 до 4 г/л и от 2 до 26 г/л соответственно. При указанных концентрациях, практически при всех приемлемых технологических условиях ПЭО, формируются оксидные слои, соответствующие минимальным требованиям качества. Однако, наиболее выдающиеся характеристики оксидного слоя достигаются при следующих условиях:

- для Ti6Al4V при КОН от 2 до 2,5 г/л, и NaAlO_2 от 16 до 26 г/л.

3.3 Исследование трибологических и механических свойств ПЭО покрытий.

Как уже отмечалось в данной работе (Рис. 2.1.) Титановые сплавы находят применение в самых разнообразных отраслях, таких как аэрокосмическая, химическая и биомедицинская индустрии, благодаря их уникальным характеристикам. Эти материалы отличаются низкой плотностью, высокой механической прочностью и отличной устойчивостью к воздействию коррозии.

Однако недостаточные триботехнические свойства, такие как высокий коэффициент трения, склонность к заеданию и низкая износостойкость, ограничивают их применение. [68].

На сегодняшний день было проведено несколько исследований, касающихся механических и трибологических свойств ПЭО -покрытий на титановых сплавах [69-79] Большинство из этих исследований сосредоточены на разработке твердых и износостойких оксидных покрытий и сравнивали их трибологические характеристики с непокрытыми подложками. Сообщалось, что несущая способность покрытий улучшалась с увеличением толщины, и это приводило к повышению износостойкости.

Тем не менее, на данный момент практически не существует исследований, посвященных изучению воздействия плазменно-электролитического оксидирования на трибологические свойства деталей из титановых сплавов, произведенных с использованием технологии электронно-лучевого плавления (ЕВМ).

Для выполнения исследовательских работ были созданы образцы в форме дисков размером $\varnothing 20 \times 10$ мм с использованием технологии электронно-лучевого плавления (EBM) на аппарате Argam A2 из сплава ВТ6 (Ti-6Al-4V), (Рис.3.1.). Перед началом ПЭО обработка поверхность дисков подверглась шлифовке с использованием бумаги на основе карбида кремния (SiC) с зернистостью 800 и последующей дегрезировке ацетоном. ПЭО обработка осуществлялась в алюминатно-щелочной электролитной среде с концентрацией КОН 2,2 г/л и NaAlO₂ 20 г/л. Процедура проводилась с использованием полезной конфигурации анода и катода с плотностью тока 10 А/дм² на аноде и 20 А/дм² на катоде, а продолжительность процесса составляла 30 минут.

Толщина модифицированного слоя составила при этом 24 и 39 мкм соответственно. После ПЭО процесса, верхний пористый слой покрытия, был отполирован на станке Tegramin-30 (Struers, Ballerup, Дания) на бумаге SiC с зернистостью 800.

Износостойкость покрытий исследовали в условиях сухого трения с использованием схемы "шар на плоской поверхности" (шар из Al₂O₃ ($\varnothing 6$ мм), Рис. 3.7.

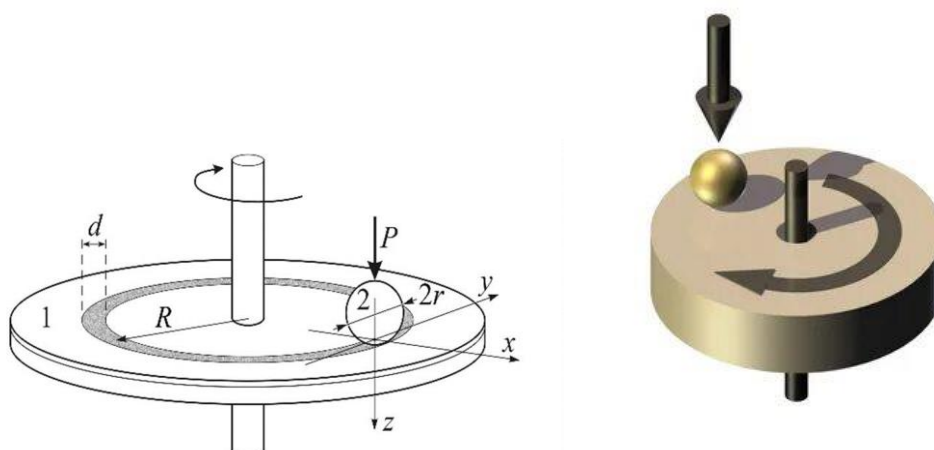


Рис. 3.7. Схема "шар на плоской поверхности»

Исследования проводили при нормальных нагрузках 5 и 10 Н с применением фиксированной скорости скольжения $0,06 \text{ мс}^{-1}$ (70 об/мин) для каждой нормальной нагрузки на трассе трения $S = 500$ м при комнатной температуре $T = 23^\circ\text{C}$ и относительной влажности воздуха 45...60%. Для каждого измерения было проведено по три теста.

Потери объема материала оценивались по профилю следов износа с помощью профилометра поверхности Talysurf CLI 500 (Taylor Hobson, Лестер, Великобритания), который отображает измеряемую площадь по контакту наконечника с поверхностью образца с шагом и скоростью сканирования 0,01

мкм и $0,1 \text{ мм} \cdot \text{с}^{-1}$, соответственно. В случае неоднородного следа износа прямое измерение объема износа с помощью профилометра намного точнее, чем рекомендуется в ASTM G-99. Программное обеспечение profilometer Italy map позволяет выбрать только зону износа и рассчитать весь объем удаляемого материала. Скорость износа была рассчитана по следующему соотношению:

$$W = V/(P \cdot S)$$

3.1.

Здесь V - потеря объема после испытаний (мм^3), P - приложенная нагрузка (N) и S - расстояние скольжения (м).

Поскольку шероховатый внешний (технологический) слой нежелателен для трибологических исследований, этот слой был удален полировкой для получения гладкой поверхности.

Репрезентативная трехмерная топография следа износа для образца длиной 0,5 М после скольжения по шарiku из оксида алюминия представлена на рисунке 3.8.

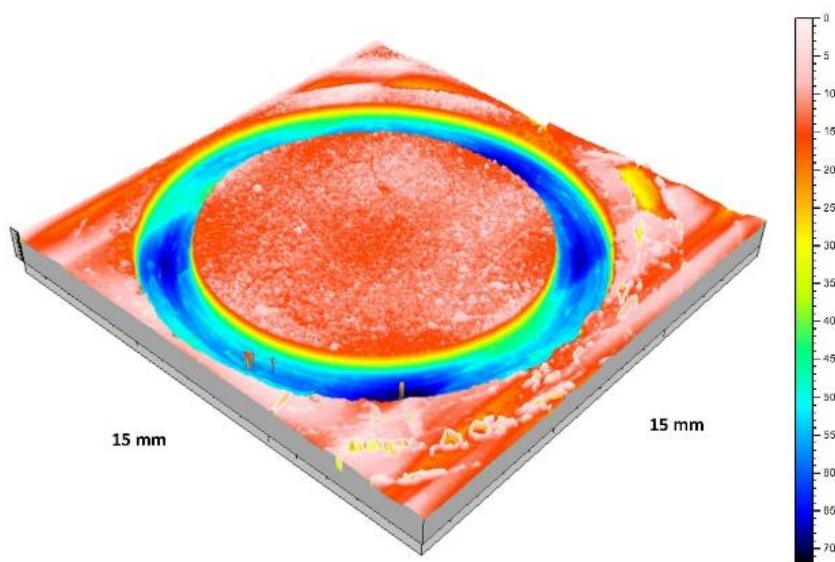


Рис.3.8 Изображение трехмерной поверхности следа износа, с указанием глубины в микрометрах (цветовая градация).

На основе полученных трехмерных топографий поверхности следов износа была рассчитана потеря объема для определения скорости износа с использованием уравнения 3.1.

Коэффициент трения и скорость износа обработанных образцов при этом составили соответственно:

Коэффициент трения - 0.76 ± 0.02

Скорость износа, $\text{мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$ - $(18.04 \pm 0.1) \cdot 10^{-4}$

В то время, как скорость износа необработанных образцов составила $(450-475) \pm 0.1 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$ $\cdot 10^{-4}$, Рис 3.9.

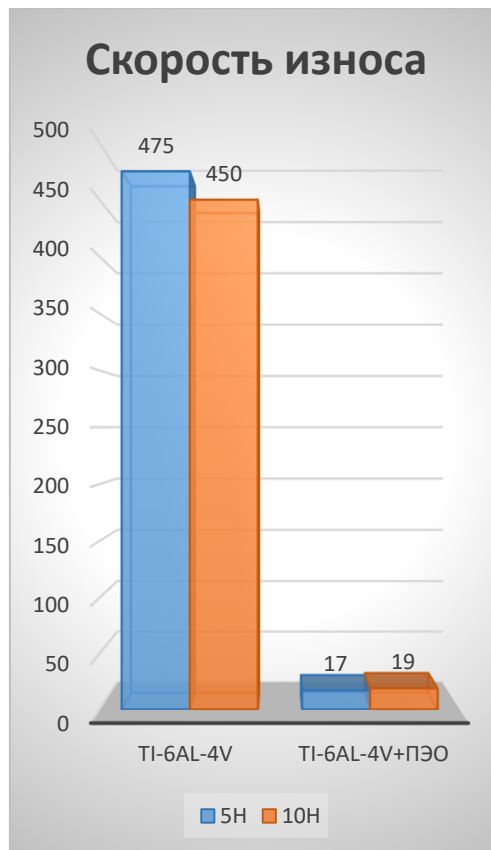


Рис. 3.9 Скорость износа обработанных и не обработанных образцов. SEM изображения следов износа на образцах при нагрузках 5Н и 10Н

соответственно представлены на Рис.3.10.

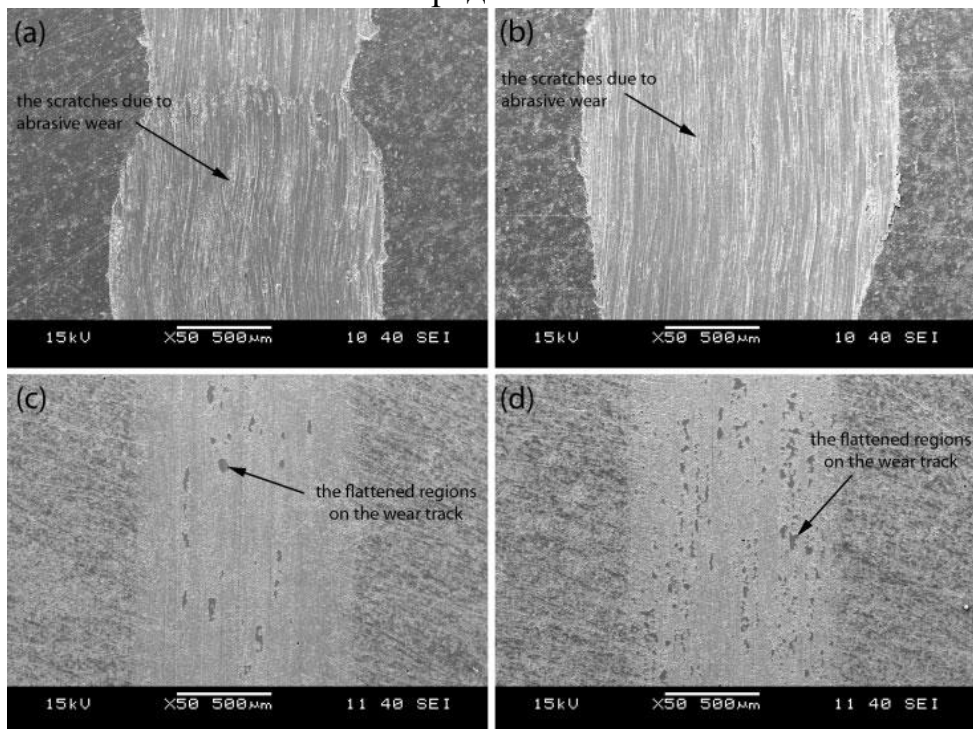


Рис.3.10. SEM изображения следов износа на образцах при нагрузках (а, с, - 5 Н и b, d - 10 Н, где а, b – VT6; с, d VT6 –ПЭО.

Как видно из представленных данных, скорость износа покрытия и его характер на образцах с ПЭО покрытием значительно меньше, чем у титанового сплава Ti6Al4V.

Также необходимо отметить, что у образцов с ПЭО покрытием в начале испытаний наблюдается увеличение коэффициента трения до 0,85 в начале, а затем медленное снижение и колебание между 0,6 и 0,7 к концу испытания на износ. Снижение коэффициента трения после прохождения расстояния ~10 м, по нашему мнению, связано с образованием трибослоя на границе раздела трущихся поверхностей.

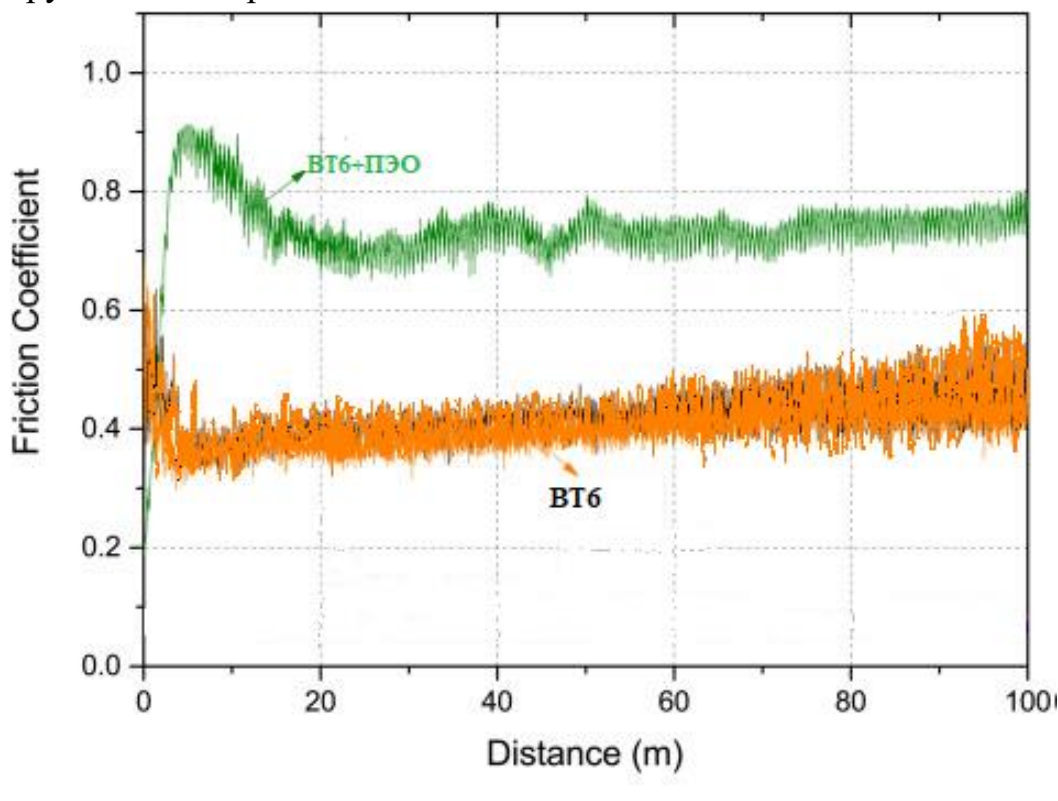


Рис.3.11. Изменение коэффициента трения при трибологических испытаниях на износ подложек с ПЭО покрытием и без него.

3.4. Механические и коррозионные свойства ПЭО-покрытий.

Механические свойства ПЭО-покрытий, такие как микротвердость, оценивали с помощью микротвердомера QNESS Q10A по методике описанной во второй главе настоящей работы.

Измерения проводились на полированных участках покрытия при пиковых нагрузках, достигающих 100 мН. Это было сделано для того, чтобы глубина покрытия не превышала 10% от общей толщины покрытия от поверхности, что позволило избежать влияния свойств материала подложки на данные о глубине под нагрузкой. Микротвердость покрытия оценивали непосредственно на поверхности и по всей поверхности с использованием нагрузки 100 г, что

позволило выявить постоянный диапазон температур во всех образцах от 680 до 700 HV.

Результаты проведенных коррозионных исследований, проведенным по методике, изложенной во второй главе показали, Испытания поляризации образцов сплава ВТ6 (Ti 6Al 4V) с ПЭО-покрытиями показывают наличие длительной зоны пассивации, что свидетельствует об их высокой устойчивости к коррозии. Было обнаружено, что для образцов из сплава ВТ6 после нанесения ПЭО-покрытия токовая плотность в пассивной зоне уменьшается примерно в восемь раз. (см. рис. 3.12).

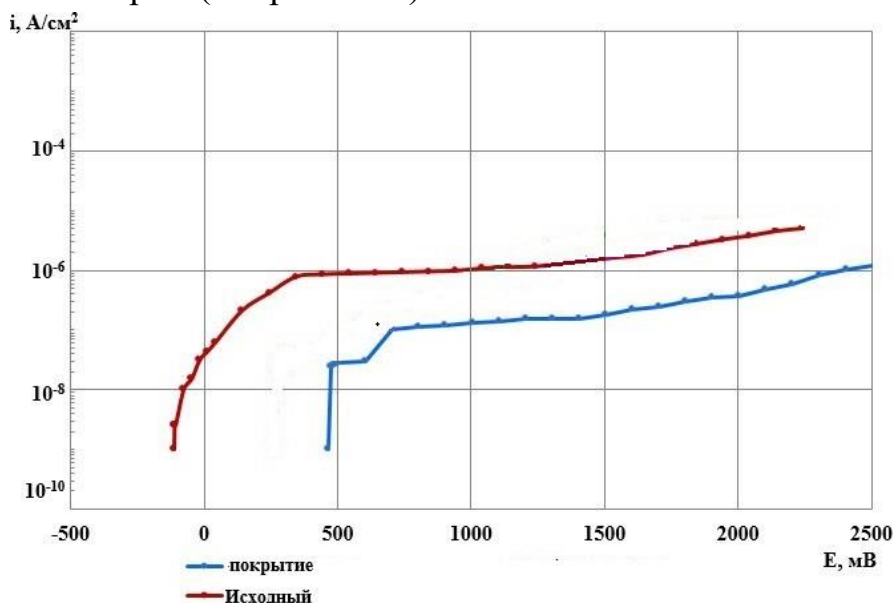


Рис. 3.12. Измерения анодных поляризационных кривых образцов из сплава ВТ6.

3.5 Исследование изменений в структуре и фазовом составе в процессе плазменно-электролитического оксидирования (ПЭО).

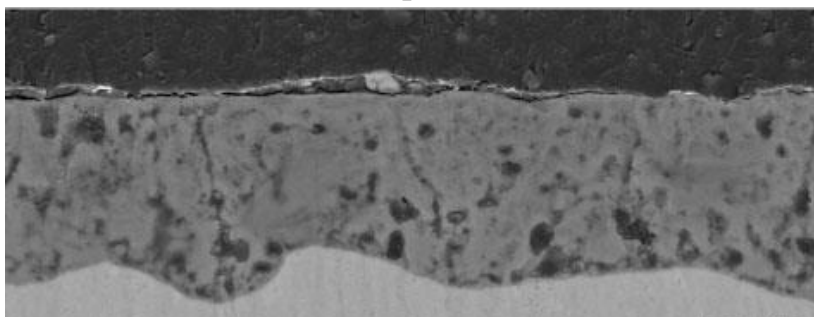
Характеристики оксидных покрытий, полученных методом плазменно-электролитического оксидирования (ПЭО). определяются их структурными характеристиками, элементным составом и фазовой структурой, которые зависят как от внутренних факторов (материал основания, его термическая обработка и прочее), так и от внешних условий (состав электролита, параметры и продолжительность процесса формирования).

Фазовое исследование покрытий проводилось с помощью рентгеновского анализа. Использовался рентгеновский дифрактометр Empyrean (Panalytical, Almelo, Нидерланды) со спектром Cu-K α (длина волны 1,5405981 Å), работающим при 60 кВ и токе пучка 30 мА. Угол сканирования варьировался от 2° = 20 до 80 градусов.

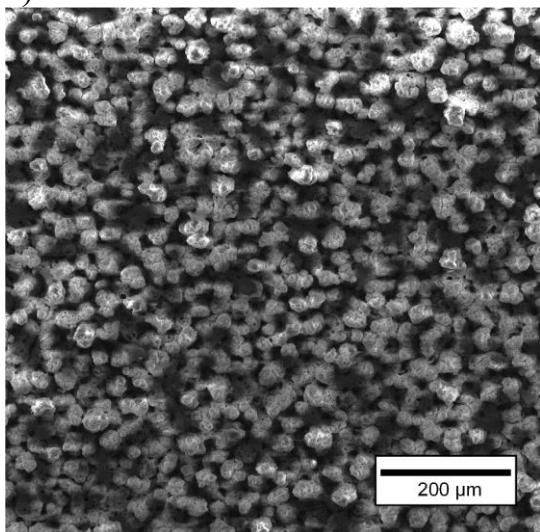
Структура поперечных сечений образцов была исследована с помощью сканирующего электронного микроскопа (SEM) модели VEGA 2 LMH производства компании Tescan в Брно, Чешская Республика, который был

оснащен энергодисперсионным рентгеновским спектрометром (EDS).

Для подготовки к исследованию микроструктуры, образцы с поперечными сечениями ПЭО-покрытий встраивались в эпоксидную смолу, после чего проходили этапы последовательного шлифования и полировки. Шлифовка и полировка выполнялись на устройстве Tegamin-30 (Struers, Баллеруп, Дания). Изображения SEM в поперечном сечении толщины покрытий приведены на рис. 3.13, а, и непосредственно поверхности сплава ВТ6 после ПЭО, рис. 3.13, б, а на рис. 3.14. карты распределения элементов на поверхности образцов. Как видно из изображения, по всей толщине покрытия имеются многочисленные мелкомасштабные микропоры. Микропоры, по всей вероятности, являются результатом захвата газа в выпускных каналах во время процесса ПЭО, что может быть связано с образованием мощных микродуг на более поздних стадиях обработки ПЭО и их проникновением в сплав подложки. Кроме того, из-за этих мощных микродуг может увеличиваться температурный градиент на границе раздела электролит/покрытие, и вызвать быстрое затвердевание большого объема расплавленных оксидов что могло образовывать усадочные трещины на самом внешнем слое покрытия.



а)



б)

Рис. 3.13. СЭМ изображение а-поперечного сечения ПЭО покрытия, б-поверхности образца.

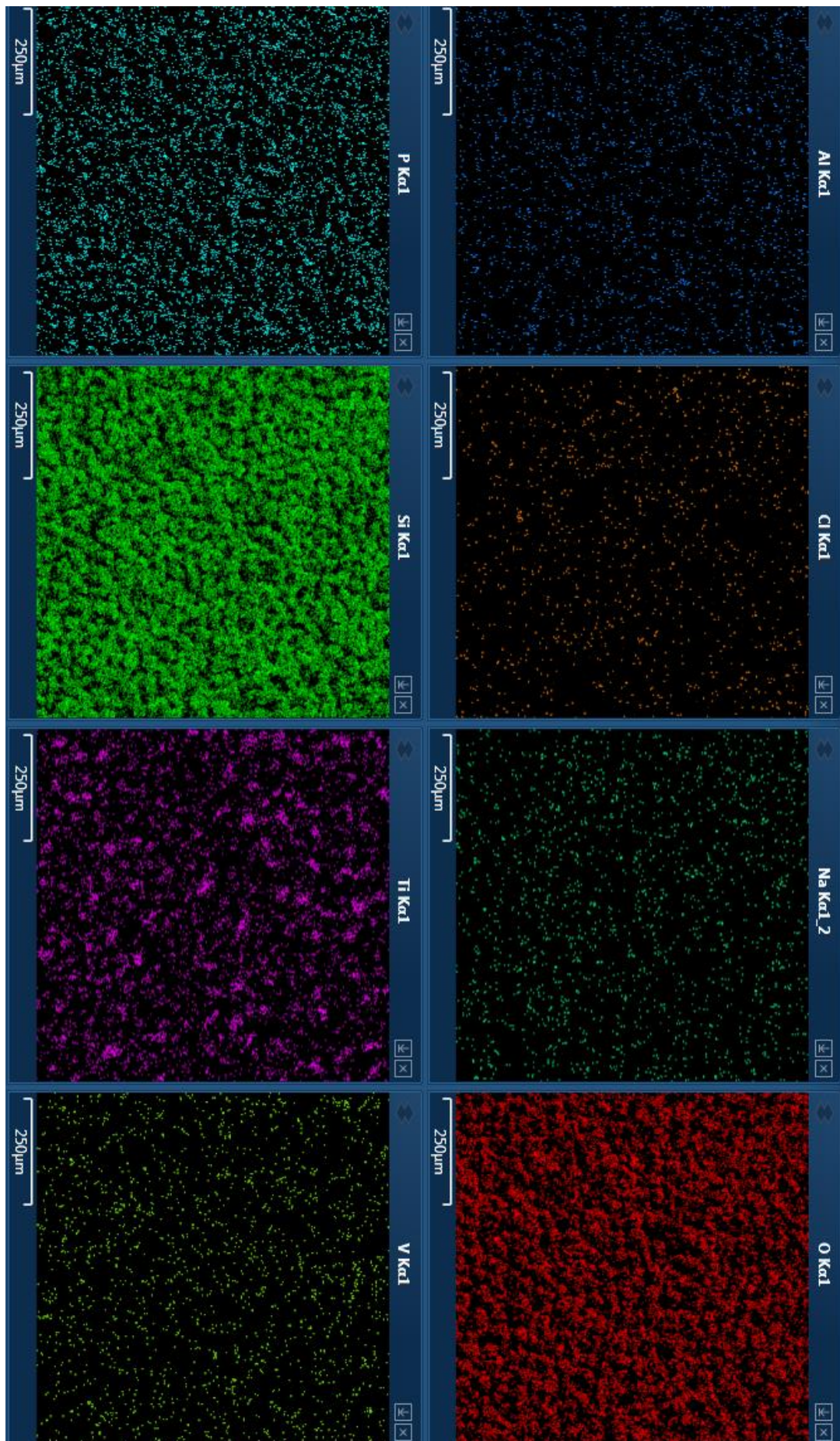


Рис. 3.14. Карта распределения элементов на поверхности образцов после ПЭО.

Рентгенографические картины дифракции ПЭО-покрытий на рис. 3.15 показывают, что в ПЭО покрытия проявляют фазовые модификации оксида титана (TiO_2) и алюминия $\alpha-Al_2O_3$. Это говорит о том, что росту покрытия в основном способствовало анодное окисление металла подложки. Наличие в покрытии только из рутиловой фазы TiO_2 показывает, что температура поверхности была достаточно высокой для превращения метастабильного анатаза в рутил. В нашем случае, помимо рутила, в структуре наблюдался титанат алюминия (Al_2TiO_5). Титанат алюминия образуется в результате включения в структуру покрытия компонентов электролита, вероятно, гидроксидов алюминия через выпускные каналы. При контакте гидроксидов алюминия с расплавленным оксидом титана образуется кристаллическая фаза титаната алюминия в соответствии с химическими реакциями, осуществляемыми при помощи плазмы, предложенными Ерохиным и соавторами. [10].

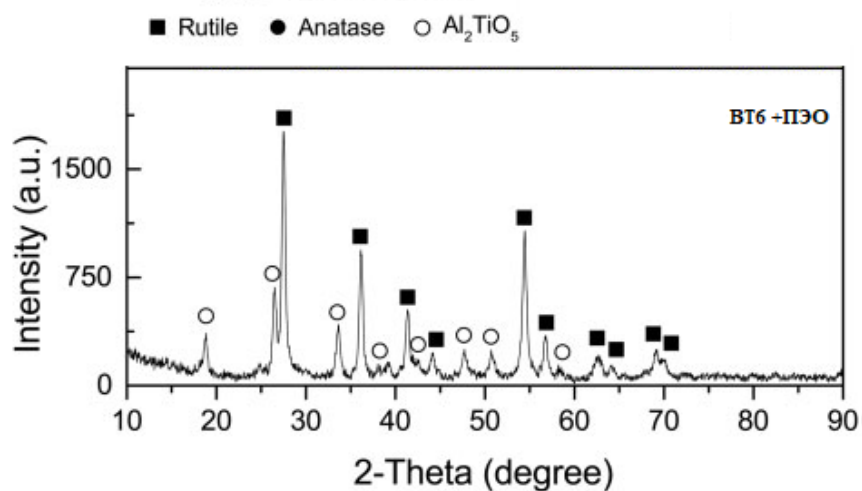


Рис. 3.15. Рентгено-фазовая диаграмма образцов после ПЭО.

На рисунке 3.16 рентгенограммы показывают присутствие двух различных кристаллических фаз в подложке как до, так и после нанесения покрытия. После процесса ПЭО наблюдается значительное снижение интенсивности дифракционных пиков α -и β - Ti , при этом β - Ti фаза имеет тенденцию к полному исчезновению. Это происходит потому, что в ходе оксидирования сформированное покрытие маскирует исходную структуру поверхности образца. При этом сохранение видимости α -фазы объясняется пористостью созданного ПЭО покрытия.

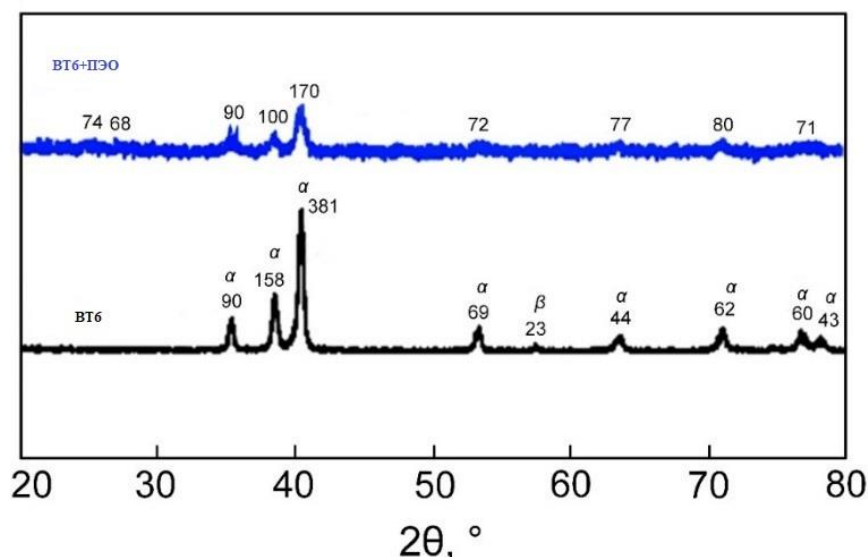
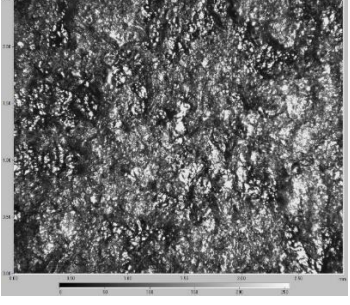
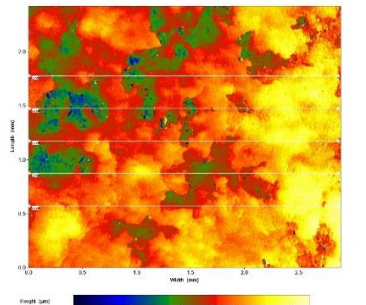
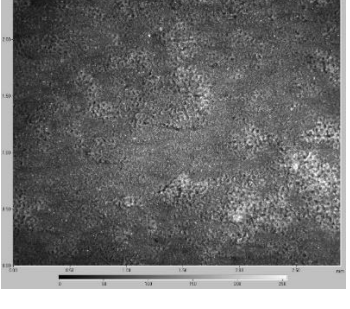
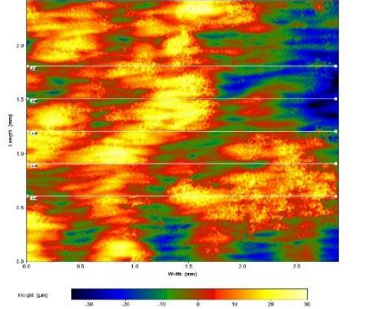


Рисунок 3.16. – Изображение рентгеновской дифрактограммы титанового сплава до и после выполнения процедуры ПЭО.

Информация о шероховатости поверхности исследуемых образцов приведена в таблице 3.1. Выводы на основе полученных результатов следующие, После процедуры ПЭО шероховатость поверхности уменьшилась (Перед нанесением покрытия из микродугового оксида (MDO) был подготовлен образец): $R_a=5,62$ мкм, $R_z=32,12$ мкм; шероховатость после ПЭО-покрытия: $R_a=1,82$ мкм, $R_z=10,04$ мкм, соответственно). Снижение шероховатости поверхности можно объяснить равномерным распределением покрытия, что способствует герметизации пор и дефектов, возникающих при испарении электронным пучком.

Таблица 3.1

Различия в шероховатости поверхности титановых образцов, подвергнутых исследованию

Титановый сплав ВТ6 без покрытия ПЭО.			Ra, мкм	Rz, мкм
Титановый сплав ВТ6 с покрытием из ПЭО.			Ra, мкм	Rz, мкм
			5,62	32,12
			1,82	10,04

3.6 Исследование диэлектрических свойств.

3.6.1. Исследование величины электрического сопротивления

Для исследования диэлектрических характеристик покрытий РЕО было изготовлено пять образцов, каждый из которых имел толщину покрытия от 5 до 25 микрон, постепенно увеличивающуюся на 5 микрон. Покрытия наносились на основе заранее определенных параметров:

- плотность тока электричества j , А/дм²: 10;
- Пропорцијата на електричната струја што тече на катодата со електричната струја што тече на анодата. I_k/I_a : 1,0;
- Время обработки τ , мин: от 5 до 35;
- Концентрация гидроксида калия (КОН) в растворе на водной основе, используемом для процесса электролиза. C , г/л: от 3 до 5.

На полученных покрытиях при помощи измерителя иммитанса Е7-23, согласно методики, изложенной во второй главе данной работы была измерена величина электрического сопротивления, для чего измеритель иммитанса Е7-23 подключался к измерительной ячейке, (Рис. 3.17).



Рис. 3.17. Подключение E7-30 к измерительной ячейке.

Данные измерений, а также средние значения измеренных параметров представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2

Значения сопротивления Ti-сплав ВТ6 с ПЭО-покрытием

Образец №	Материал	Ti-сплав ВТ6 с ПЭО-покрытием
1	Сопротивление, Ом	$1,8 \cdot 10^6$
2		$3,0 \cdot 10^6$
3		$1,5 \cdot 10^6$
4		$5,0 \cdot 10^6$
5		$4,0 \cdot 10^6$
Среднее значение сопротивления, Ом		$3,1 \cdot 10^6$

Как видно из данных приведенных в таблице 3.2 ПЭО покрытия на титановом сплаве ВТ6 обладают значительным сопротивлением, что свидетельствует о хороших диэлектрических характеристиках покрытия и возможности применения его в качестве электроизоляционного.

3.6.2. Исследование величины выдерживаемого напряжения (электрического пробоя).

Данный параметр является ключевым с точки зрения применения изделий с нанесенными покрытиями в узлах, работающих в условиях где необходимо обеспечить электроизоляцию одних узлов от других.

Для определения выдерживаемого напряжения использовались образцы, подготовленные по технологическим параметрам, описанным в начале настоящей главы.

Для проведения испытаний образцы крепились в измерительной ячейке, которая в свою очередь подключалась к пробойной установке GPT-79902, высоковольтный разъем - к измерительному электроду, общий выход - к подложке объекта испытаний (рис.6.79). Режим измерения: напряжение испытания до 2000 В постоянного тока (VDC), максимальный ток до 20 миллиампер (мА), время нарастания напряжения 10 секунд, длительность испытания 60 секунд, ручной режим.

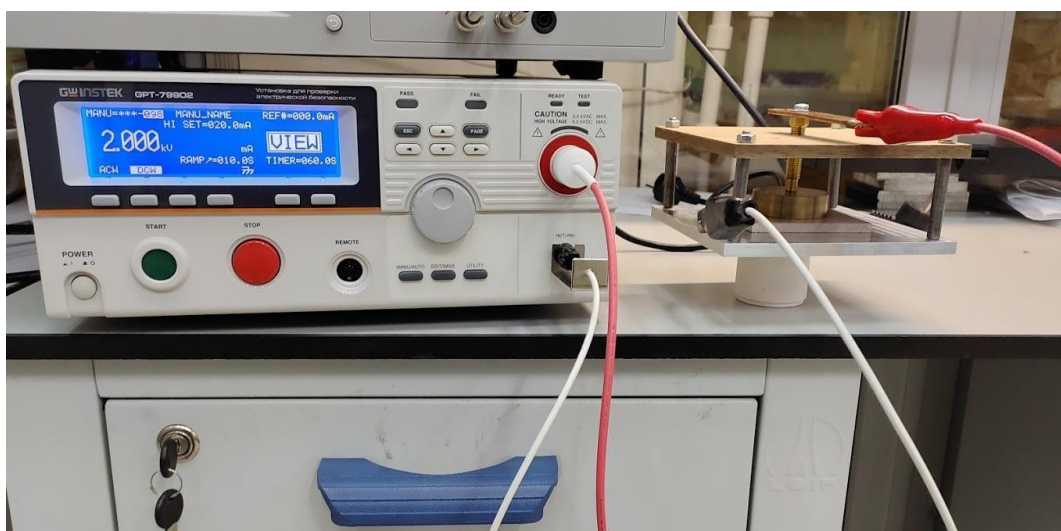


Рис. 3.18. Подключение измерительной ячейки к пробойной установке GPT-79902

Данные о результатах тестирования на пробой содержатся в таблице 3.3.

Таблица 3.3
Исходы тестирования ПЭО-покрытий на пробой.

Образец №	Параметр	Ti-сплав ВТ6 с ПЭО-покрытием
1	$U_{\text{проб}}, \text{В}$	180
2		225
3		200
4		175
5		202
Среднее значения $U_{\text{проб}}, \text{В}$		201

Анализируя величину пробивного напряжения, можно определить электрическую прочность этих пленок с учетом толщины диэлектрических пленок.

$$E_{\text{проб}} = U_{\text{проб}} / d \quad (3.1)$$

где $U_{\text{проб}}$ – напряжение пробоя; d – толщина пленки диэлектрика.

В таблице 3.4 показаны значения электрической прочности, рассчитанные для полученных покрытий РЕО, а также соответствующие средние значения.

Таблица 3.4
Значение электрической прочности

Образец №	Параметр	Ti-сплав ВТ6 с ПЭО-покрытием
1	$E_{\text{пр}}, \text{В/м}$	$1,80 \cdot 10^9$
2		$2,25 \cdot 10^9$
3		$2,00 \cdot 10^9$
4		$1,75 \cdot 10^9$
5		$2,03 \cdot 10^9$
Среднее значение $E_{\text{пр}}, \text{В/м}$		$2,01 \cdot 10^9$

Исследования показали, что фактически на напряжение пробоя оказывает значительное влияние только толщина покрытия и состояние образца. Если образец перед проведением испытаний промывался не менее 180 минут в ультразвуковой ванне, за тем не менее 24 часов сушился в вакуумном сушильном шкафу при температуре 100°C, то результаты улучшаются приблизительно на 20%, однако по мере насыщения влагой из атмосферы результаты ухудшаются.

Кроме того, применение комбинированных режимов нанесения фактически не приводит к ощутимым изменениям пробойного напряжения, изменения меньше разброса между измерениями.

Полученные данные говорят о том, что для выполнения требований к ПЭО покрытиям в части увеличения пробойного напряжения требуется дополнительно заполнять поры покрытия высокотемпературным полимером методом вакуумной инфузии. Без данной дополнительной процедуры максимально достигаемая величина пробойного напряжения составила 250В для ПЭО покрытия толщиной 20-25 мкм.

Выводы по главе 3

1. С использованием электронно-лучевой технологии плавления были произведены образцы из титанового сплава Ti-6Al-4V, на которые впоследствии было нанесено покрытие методом плазменно-электролитического оксидирования (ПЭО). Изучены зависимости толщины покрытия, сквозной пористости и прочности сцепления покрытия с основой в зависимости от состава электролита
2. Изучены зависимости толщины покрытия, открытой пористости и прочности сцепления ПЭО с основой в зависимости от плотности электрического тока.
3. Исследованы зависимости толщины, исследованы зависимости сквозной пористости и прочности сцепления покрытия ПЭО с основой от соотношения анодной и катодной токовых плотностей.
4. Были изучены взаимосвязи между толщиной, проницаемостью пор, а также прочностью адгезии ПЭО-покрытия к основанию и временем проведения процесса ПЭО.
5. Фазовые модификации оксида титана, наблюдаемые в покрытиях РЕО, полученных в алюминатно-щелочном электролите, указывают на то, что рост покрытия в основном вызван анодным окислением металла подложки. Присутствие различных соединений в водном растворе алюминатно-щелочного электролита влияет на структуру покрытия и приводит к увеличению толщины. Это связано с образованием шпинельной фазы титаната алюминия (Al_2TiO_5) в процессе нанесения покрытия.
6. Установлено, что адгезия ПЭО покрытия улучшается при увеличении толщины, что обеспечивает лучшую несущую способность и приводит к значительному, в несколько раз, повышению износостойкости.
7. Исследования показали, помимо состава электролита и концентрации его компонентов, важную роль играют характеристики оксидных слоев, формируемых на титановом сплаве ВТ6, значительное влияние оказывают температура электролита, время оксидации и электрические параметры процесса ПЭО.
8. Обработка ПЭО в алюминатно-щелочной среде способствует уменьшению шероховатости поверхности титановых образцов ВТ6, изготовленных с использованием технологии АТМ.
9. Определено, что фактически на электроизоляционные характеристики ПЭО покрытия оказывает значительное влияние только толщина покрытия и состояние образца, а для увеличения пробойного напряжения требуется дополнительно заполнять поры покрытия высокотемпературным полимером методом вакуумной инфузии.

ГЛАВА 4

Разработка технологического процесса плазменно-электролитного оксидирования (ПЭО) деталей из титанового сплава Ti-6-Al-4V, сформированных методом электронно-лучевого плавления (ЕВМ).

Разработка технологии плазменно-электролитной обработки материалов с целью получения нанокompозитных керамических покрытий на титановом сплаве Ti6Al4V включает в себя комплекс работ, а именно: разработку требований к покрываемым поверхностям, описание основных операций, разработку схемы технологического участка для нанесения ПЭО-покрытий и требований по обустройству технологического участка, а также последовательность технологических операций при ПЭО (технологическая карта).

4.1. Разработка требований к покрываемым поверхностям

Как отмечалось ранее, одним из достоинств ПЭО технологии является отсутствие специальной предварительной подготовки поверхности: травления, осветления (за исключением случаев наличия плакированного слоя на поверхности алюминиевых сплавов).

В тоже время к поверхностям деталей и образцов в зависимости от их функциональных задач при ПЭО обработке предъявляются следующие требования:

4.1.1 По ГОСТ 2789-73, шероховатость поверхности базового металла, измеряемая в микрометрах, не должна превышать указанное значение.:

- Ra 10 (Rz 40) — для нанесения защитных покрытий;
- Ra 2,5 (Rz 10) — для нанесения защитно-декоративных покрытий;
- Ra 1,25 (Rz 6,3) — для нанесения твердых, износостойких и электроизоляционных покрытий.

Шероховатость поверхности основного металла для функциональных покрытий должна соответствовать параметрам, указанным в нормативно-технической и/или конструкторской документации на изделие, что также должно быть зафиксировано в Техническом задании.

Эти требования к шероховатости поверхности не распространяются на нерабочие труднодоступные для обработки участки и нерабочие внутренние поверхности деталей, резьбовые поверхности, поверхности среза штампованных деталей толщиной до 4 мм, рифленые поверхности, а также на детали, шероховатость основного металла которых регулируется соответствующими стандартами. Необходимость доведения шероховатости поверхностей до заданных значений должна быть указана в конструкторской документации и отражена в Техническом задании.

4.1.2 Острые углы и края деталей, если это не требуется по техническим соображениям, должны быть округлены с радиусом не менее 0,3 мм; для деталей, предназначенных под износостойкие и электроизоляционные покрытия, радиус округления должен быть не менее 0,5 мм.

4.1.3 На поверхности изделий не допускается присутствие:

- не допускается присутствие оксидов и наростов.;
- слоистости и растрескивания, включая те, которые обнаруживаются после процессов эцэ, полировки или шлифовки;
- коррозионных повреждений, пористости и трещин.

4.1.4 Поверхность изготовленных методом печати деталей должна быть свободной от газовых и усадочных дефектов, посторонних включений, спаек и трещин. Допустимые недостатки на таких поверхностях (тип, размер и количество) определяются в соответствующих нормативно-технических и конструкторских документах и должны быть указаны в Техническом задании.

4.1.5 После механической обработки поверхность деталей должна быть чистой, без видимых остатков смазки или эмульсии, металлической стружки, заусенцев и продуктов коррозии, а также без включений частиц чужеродного материала.

4.1.6 После абразивной обработки, такой как гидropескоструйная обработка, галтовка и другие методы, поверхность деталей должна быть свободна от травильного шлама, шлаковых остатков, продуктов коррозии и заусенцев.

4.1.7 Поверхность деталей после шлифовки и полировки должна быть ровной и однородной, без следов забоин, вмятин, прожогов, царапин, заусенцев и дефектов, возникших в результате использования рихтовочного инструмента.

4.1.8 После термической обработки на поверхности деталей не должны присутствовать забоины, царапины, трещины, пузыри, участки коррозии, слоистость или искривления.

Запрещается применение ПЭО-покрытий на деталях с паяными или клееными соединениями.

На обработанной поверхности следующие особенности не считаются дефектами:

- неоднородность цвета на участках с разной термической и механической обработкой;
- наличие отдельных матовых и светлых зон на поверхности деталей, которые не подлежат декоративным требованиям;
- исчезновение оксидного слоя или заметное уменьшение его толщины в труднодоступных местах, таких как щели, зазоры, глухие отверстия диаметром до 15 мм и сквозные отверстия до 10 мм, а также в отверстиях и углублениях, к которым сложно применить ПЭО обработку, если иное не прописано в конструкторской документации или не указано в Техническом задании.
- следы водяных подтеков;
- следы контакта с приспособлениями, проявляющиеся как матовые и темные участки;
- при необходимости, механическая полировка мест контакта с приспособлениями и для достижения точных размеров детали после обработки;
- следы механической обработки основного металла перед ПЭО обработкой и другие отклонения, разрешенные нормативно-технической документацией на исходный материал.

4.2. Процесс выполнения ПЭО-обработки

Процесс ПЭО включает три этапа: подготовительные, основные и заключительные операции.

Подготовительные этапы.

- Процесс включает создание электролита определенного состава и концентрации в функциональном растворе (в качестве растворителя рекомендуется использовать высококачественную воду).
- Корректировка состава электролита, который использовался в течение определенного периода времени, путем добавления необходимых компонентов, таких как вода, до исходного уровня после химического анализа результатов.
- Изоляция поверхностей деталей, которые не будут обрабатываться методом ПЭО, с применением специализированных средств. (например, использование фторопластовых прокладок или деталей из капролона, конденсаторной пленки из фторопласта и вакуумных резин) либо с использованием герметика высокой температуры (например, силиконового состава, термостойкой ленты).
- Установка токоподводящих элементов на детали. Обычно токоподводы

изготавливают из алюминия (или титана) и их сплавов в виде проволоки или стержней (чаще всего с диаметром 4-6 мм) и закрепляют с использованием резьбовых или других методов, обеспечивающих механическую прочность и Чтобы обеспечить надежное электрическое соединение, при необходимости к компонентам можно прикрепить дополнительные электроды из нержавеющей стали с помощью специальных инструментов.

- Экстракция жировой ткани из определенных участков включает нанесение нагретого (40-60°C) мыльного раствора или очищающего средства (например, смеси, содержащей 40 г/л Na_3PO_4 и 40 г/л Na_2CO_3 в воде).
- Промывка компонентов в холодной проточной воде.
- Размещение компонентов, оснащенных проводами для подачи электрического тока, в специальном электрическом узле в растворе электролита имеет решающее значение.
- Эти элементы должны быть полностью погружены в электролит. Частицы равномерно распределены в ванне, поэтому они не соприкасаются друг с другом, стенами и полом ванны или с дополнительными электродами.
- Также важно предотвратить образование пузырьков воздуха или газа в пустотах компонентов как во время их
- позиционирования, так и в процессе последующего окисления.

Основные этапы.

- Включите защитный экран электролитной ванны, запустите водяное охлаждение, активируйте систему вытяжной вентиляции и начните процесс смешивания электролита, такой как механическое перемешивание, аэрация сжатым воздухом или циркуляция через холодильное устройство.
- Активируйте технологический источник питания, откалибруйте основные переменные процесса РЕО и последовательно поддерживайте их на протяжении всей процедуры с помощью ручных или автоматических средств.
- На протяжении всего процесса окисления важно наблюдать и анализировать токи и напряжения как на аноде, так и на катоде.
- По завершении процесса РЕО рекомендуется деактивировать подачу питания на технологический источник, отключить системы вентиляции, охлаждения и смешивания электролита, а затем открыть защитный барьер электролитной ванны (подождать не менее двух минут после отключения подачи тока конденсатора). Наконец, приступайте к извлечению деталей из электролитной ванны.

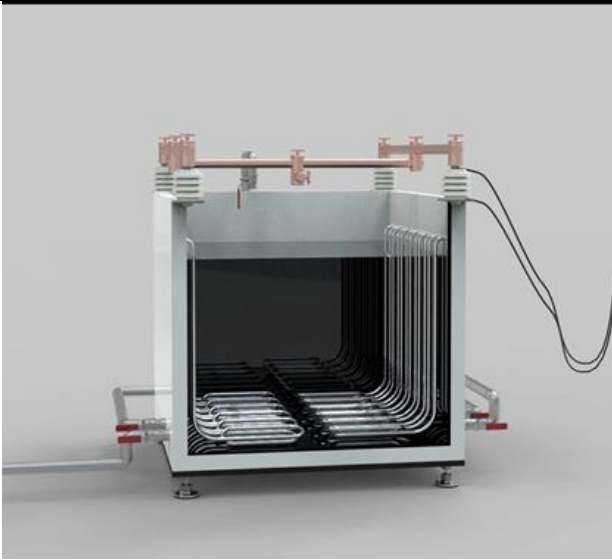
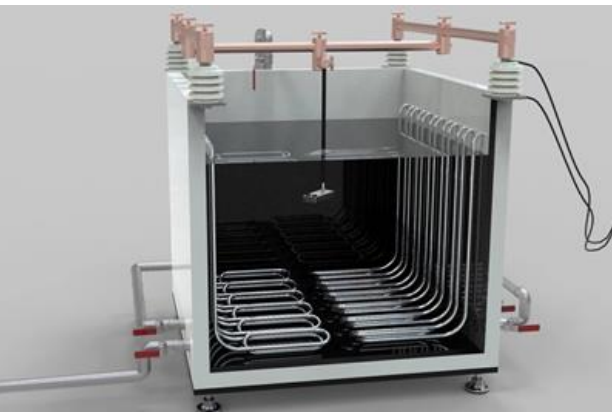
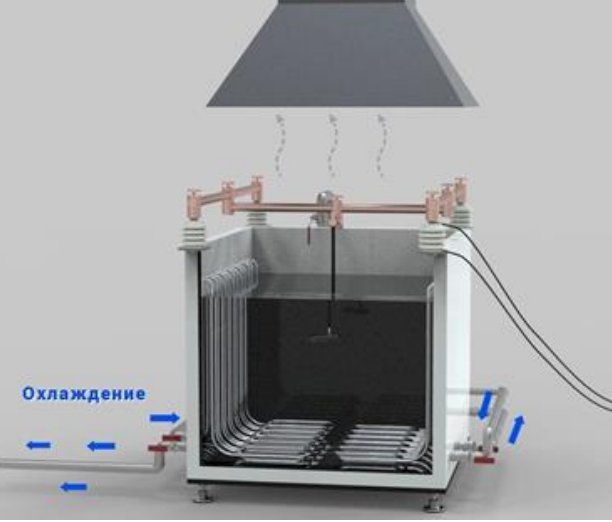
Заключительные этапы.


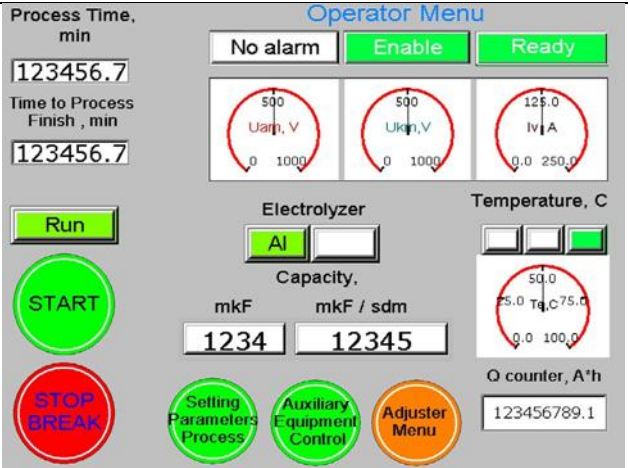
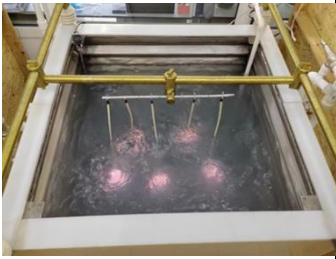

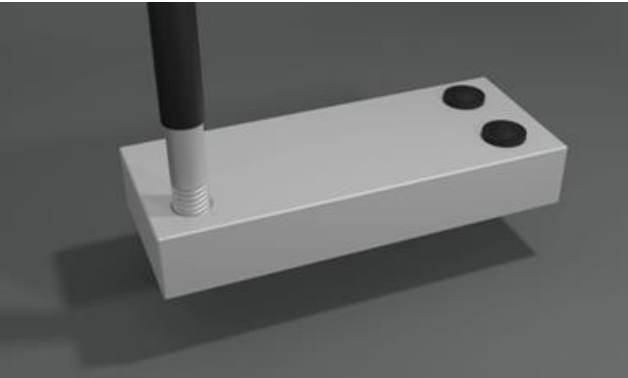
- Промывка компонентов холодной проточной водой в течение от 0,5 до 1,5 часов в зависимости от продолжительности обработки методом MDO.
- Удаление загрязнений из компонентов путем продувки их сжатым воздухом под давлением примерно 0,15 МПа до полного высыхания снаружи, что является дополнительным этапом.
- Сушка компонентов в специальном корпусе при диапазоне температур от 50 до 70 градусов Цельсия в течение 30-40 минут (в качестве альтернативы можно также использовать естественную сушку на открытом воздухе).
- Удаление существующих приспособлений, специальных инструментов, дополнительных электродов, уплотнений и других деталей в случае их установки.
- Удаление технологического слоя ПЭО-покрытий (при необходимости) с применением абразивной струйной обработки или шлифовки, с последующей продувкой сжатым воздухом.
- Контроль ПЭО-покрытий на отсутствие видимых дефектов (трещин, сколов, прогаров и т.п.), а далее контроль основных характеристик покрытий (толщина, микротвердость), а при необходимости – изменения конечных размеров деталей, износостойкости, пористости, коррозионной стойкости, пробойного напряжения и др.
- Упаковка готовых деталей.


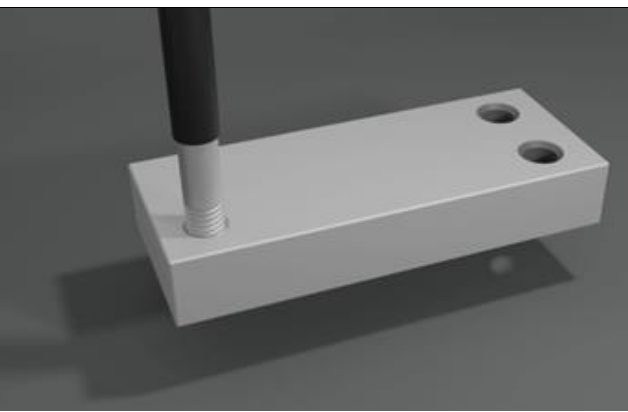
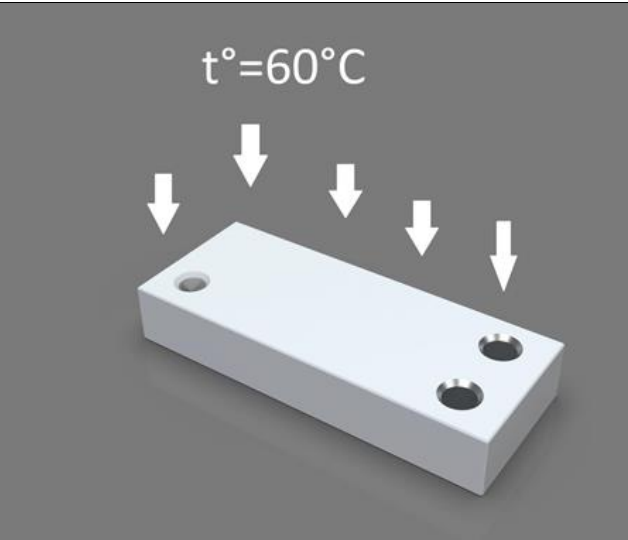

Последовательность технологических операций при ПЭО представлена ниже.

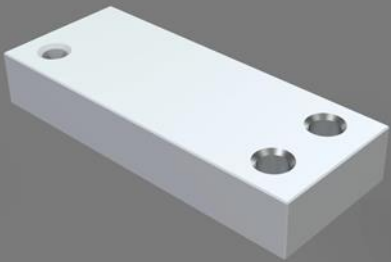
Таблица 4.1. Последовательность технологических операций при ПЭО

№ п/п	изображение	операция	примечание
1		Визуальный контроль	1. При обнаружении дефектов поверхности изложенных в п.1.3-1.10 деталь признается дефектной
2		Удаление жировых загрязнений	Загрязненные поверхности деталей очистить от жира с использованием Раствор моющего средства или мыла, обычно нагретый до температуры от 40 до 60 градусов Цельсия, может состоять из таких веществ, как 40 граммов на литр Na_3PO_4 и 40 граммов на литр Na_2CO_3 , растворенных в воде.
3		Установка токоподвода и защитной оснастки	1. Закрывать заглушками места не подлежащие обработке. 2. Место присоединения токоподвода с деталью изолировать фторопластовой лентой

4		<p>Наполнение ванны подготовленным электролитом</p>	<p>Состав электролита для титанового сплава Ti6Al4V: 1/5г/л KOH+15 г/л NaAlO₂</p>
5		<p>Закрепление детали за токоподвод на токовых шинах ванны</p>	
6		<p>Включение вытяжной вентиляции, барботирования и системы охлаждения ванны</p>	<p>Все работы производить при закрытом ограждении</p>

7		<p>Включить технологический источник тока и оксидировать деталь согласно ТЗ</p>	<p>Установить на ТИТ следующие режимы: Для титанового сплава Ti6Al4V: режим ПОЭП, диапазон соотношения катодного и анодного токов $I_k/I_d = 0,78 - 1.0$; суммарная плотность тока $1200 + 1400 \text{ A/m}^2$. Время обработки 60-120 минут.</p>
8		<p>Ход технологического процесса отслеживать по параметрам на панели оператора</p>	<p>Осуществлять визуальный контроль за процессом через окно в ограждении или на видео мониторе.</p> 
9		<p>Выключить технологический источник тока, отключить вентиляцию, барботаж и систему охлаждения ванны</p>	
10		<p>Открыть защитное ограждение, достать деталь из ванны</p>	

11		Промыть деталь под струей воды	Время промывки в проточной воде от 15 до 30 минут
12		Отсоединить токоподводы и удалить оснастку	
13		Установить деталь в камеру для сушки (время сушки 60-120 минут)	Допускается сушка на воздухе
14		Измерение толщины оксидного слоя толщиномером	При необходимости или согласно ТЗ перед измерением удалить технологический слой

15		Деталь маркировать и упаковать	
----	---	-----------------------------------	--

4.4. Требования по обустройству технологического участка для размещения оборудования для реализации лабораторной технологии плазменно-электролитной обработки.

Общие сведения

Комплект лабораторно-промышленного электротехнического и вспомогательного оборудования (далее Оборудование) предназначен и может быть использован для разработки и реализации лабораторных и опытно-промышленных электрохимических технологических процессов формирования многофункциональных покрытий и модифицированных. Формирование оксидных покрытий на поверхностях изделий различных отраслей промышленности, обеспечивающих защиту от сцепления и заедания при трении, распылении и покрытии, коррозии (включая фреттинг-коррозию, контактную коррозию и другие виды), эрозии, кавитации, окислительного, коррозионно-механического, водородного и других видов износа, а также для придания декоративных, биоцидных и биоадаптивных, теплоизоляционных, гигроскопических, диэлектрических, полупроводниковых и других функциональных свойств рабочей поверхности.

4.4.1 Типовой состав участка плазменно – электролитной обработки

В Таблице 4.2 приведен проект основного состава оборудования участка плазменно – электролитной обработки.

Другое производимое оборудование, сборочные единицы и изделия, а также дополнительные покупные комплектующие изделия и материалы, предлагается уточнить, при необходимости.

Таблица 4.2 – Проект основного состава оборудования участка плазменно – электролитной обработки

№ п/п	Наименование	Ед. изм.	Кол-во	Электрическая мощность установленная, кВА
1	Технологический источник тока	шт.	1	100
1.1	Базовая программно-аппаратная система контроля (мониторинга) технологических параметров процесса (МДО-Монитор)		-	3
2	Ванна электролитная	шт.	1	-
2.1	Устройство крепления токопроводов деталей	шт.	-	-
2.2	Устройство перемешивания электролита	шт.	-	-
2.3	Электромеханическое устройство слива электролита	шт.	-	-
2.4	Бортовое электромеханическое устройство удаления технологических газов	шт.	-	-
3	Ванна смесительная	шт.	1	1
3.1	Устройство автоматизированного приготовления и замены электролита с системой коррекционного дозирования	шт.	1	-
4	Система охлаждения электролита (чиллер)	шт.	1	30
5	Защитное ограждение	шт.	1	-
6	Пандус	шт.	1	-
7	Ванна промывочная	шт.	1	-
8	Сушильный шкаф ШС-80-0	шт.	1	2
9	Дистиллятор ДЭ-25	шт.	1	20
10	Комплект монтажных, установочных, электро-коммутационных изделий и материалов	шт.	1	-
11	Комплект основной лабораторной мебели и химической посуды	шт.	1	-
12	Комплект запасного имущества и приборов	шт.	1	-

4.4.2 Технические описание и характеристики типового участка.

Достаточная рекомендуемая площадь участка не менее 50 м².

На этой площади размещается:

1. Зона подготовки деталей и оснастки – не менее 10 м²;
2. Зона обработки – не менее 12 м²;
3. Зона подготовки электролита – не менее 14 м²;
4. Зона контроля и хранения заготовок и готовой продукции – не менее 14 м²;

Общие требования для размещения:

1. Сжатый воздух класс 3 ГОСТ 17433-80 (сушка и очистка деталей, барботаж), 6-8 бар, 1200 л/мин;
2. Питающая электрическая сеть 3-фазы и глухо-заземленная нейтраль, 380В, 50Гц, 170кВА; при необходимости выравнивающий переключатель фаз трансформатор.
3. Заземление на участке, не более 4 Ом;
4. Вода техническая с подсоединением не менее 1 дюйм (в случае проточного охлаждения) и расходом, не менее – 100 л/мин.
5. Вода техническая с подсоединением не менее ½ дюйма (для промывки деталей и подготовки электролита) и расходом, не менее 20 л/мин.
6. Вытяжная вентиляция над зоной обработки, не менее 0,8 м³/мин;
7. Вытяжная вентиляция в зоне приготовления электролита, не менее 0,3 м³/мин;
8. Приточная вентиляция не менее 1,5 м³/мин;
9. Основание места размещения электролитной ванны должно выдерживать постоянную расчетную сосредоточенную нагрузку от электролитной ванны в зоне максимального изгибающего момента (в случае перекрытий), не менее – 2,2 т/м²; нормативная распределенная нагрузка на перекрытие 1,6 т/м² или 0,8т сосредоточенной нагрузки от пяти опор.
10. Высота помещения в чистоте, не менее - 3м;
11. Покрытие полов стойкое к длительным воздействиям слабых растворов кислот и щелочей – керамическая плитка, промлеолеум, промламинат.
12. Наличие канализации. Специальных требований к системе канализационных трубопроводов не имеется. Допустимы все существующие материалы (полипропилен, полиэтилен, поливинилхлорид, сталь).
13. Специальных требований, относительно утилизации проектируемых растворов электролита не имеется. Очистных сооружений, дополнительного оборудования для утилизации не требуется. Растворы проектируемых электролитов не содержат щелочей и кислот, а также других химически и биологически активных веществ, потребляющих кислород, тяжёлых металлов и токсинов в концентрациях, превышающих существующие нормы.

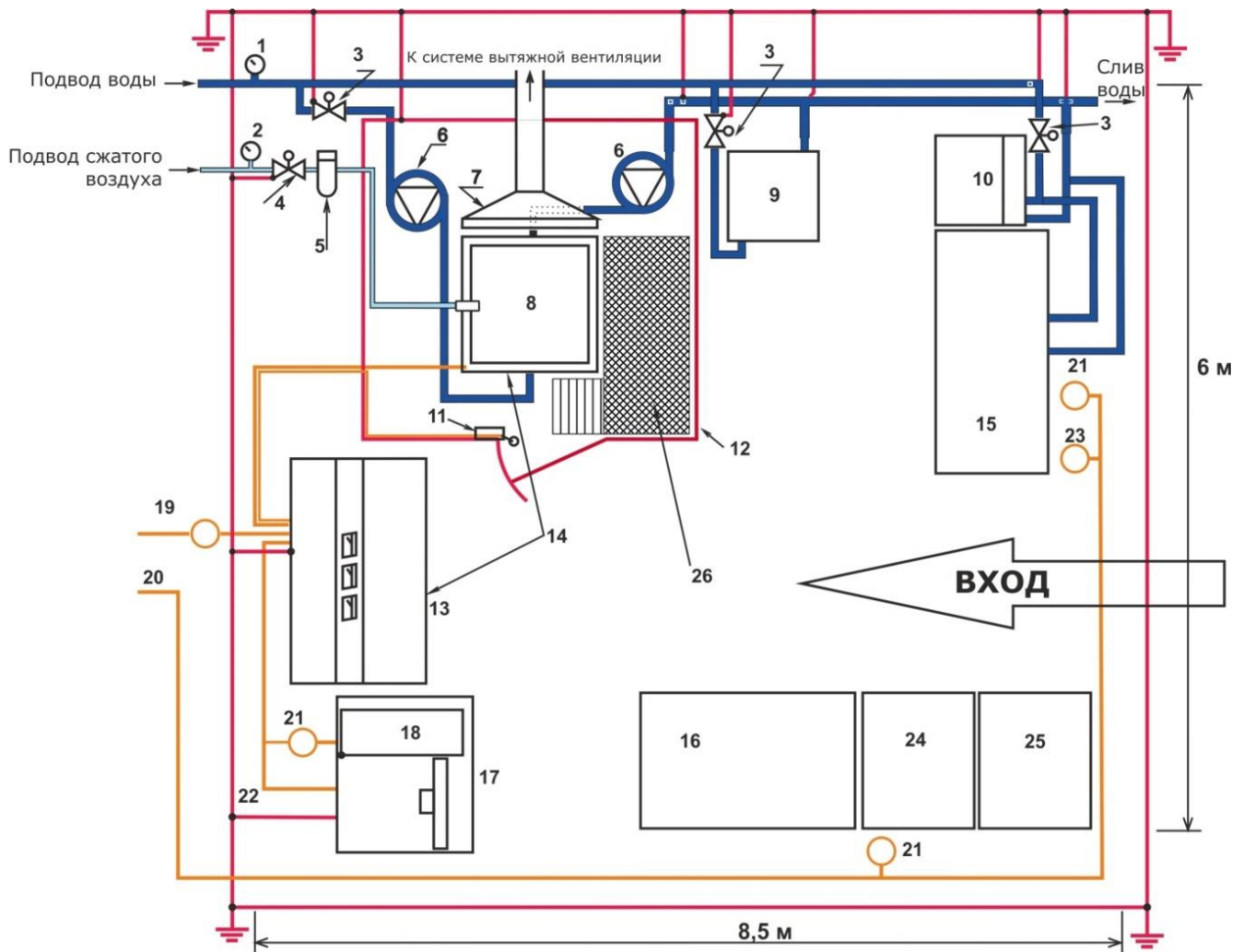


Рисунок 4.1. Рекомендуемая планировка участка плазменно-электролитной обработки

- | | |
|---|---|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Водяной манометр; 2. Воздушный манометр; 3. Водозапорный вентиль; 4. Воздушная арматура; 5. Влагомаслоотделитель; 6. Стойка со шлангом; 7. Бортовой отсос; 8. Основная ванна; 9. Промывочная ванна; 10. Водопроводная раковина + кран; 11. Контактный датчик; 12. Металлическое защитное ограждение; 13. Источник питания и управления; 14. Комплект поставки = Основная ванна + Блок питания и управления; 15. Система охлаждения электролита (чиллер); 16. Рабочее место для контроля выходных параметров; 17. Система мониторинга; 18. Персональный компьютер; | <ol style="list-style-type: none"> 19. Электрический ввод ~ 220/380 В, ток фаза- фаза 300 А; 20. Электрический ввод ~ 220/380 В, 15 кВА; 21. Две эл. розетки ~ 220 В, 1 кВА; 22. Контур защитного заземления; 23. Две эл. розетки ~ 220/380 В, 5 кВА; 24. Вытяжной шкаф; 25. Шкаф для хранения реактивов; 26. Пандус. |
|---|---|

Основными элементами участка являются источник питания и управления (13) и электролитная ванна (8).

Источник питания предназначен для контроля и управления технологическими параметрами процесса плазменно-электролитной обработки.

Электролитная ванна размещается внутри металлического заземленного ограждения (12). Контроль доступа внутрь ограждения осуществляется с помощью контактного датчика (11). В ограждении предусмотрены смотровые окна для визуального контроля процесса. Покрытие пола внутри ограждения должно быть неэлектропроводным. Вокруг электролитной ванны предусмотрен пандус высотой не менее 80 мм.

После окончания процесса детали перемещаются в промывочную ванну (9), а затем – на рабочее место контроля выходных параметров (16).

С помощью системы мониторинга (17) контролируются, визуализируются и архивируются основные технологические параметры процесса.

В целом, при подготовке участков рассматриваются возможности обеспечения следующей инфраструктуры:

- подготовки электролита;
- нейтрализации электролита перед утилизацией;
- подготовки (промывочные ванны и прочее) и загрузки (манипулятор) изделий;
- подготовки сжатого воздуха (6-8атм, 1200 л/мин, класс 3 ГОСТ 17433-80);
- подготовки деионизованной воды ($TDS \sim 0$ мг/л, $G > 4$ МОм*см);
- подготовки деминерализованной воды (дистиллированная $TDS < 7$ мг/л, $G > 0,1$ МОм*см);
- очистки аспирационной среды;
- хладоподготовки;
- энергоснабжения;
- обвязки участка (прочие материалы и комплектующие).

Для визуализации технологического участка была разработана типовая 3D модель, представленная на рисунках 4.2.-4.3.



Рисунок 4.2 – 3D модель типового участка размещения оборудования для реализации технологии ПЭО. Общий вид



Рисунок 4.3. – 3D модель типового участка размещения оборудования для реализации технологии ПЭО. Дополнительный вид.

4.5. Комплексная технология создания изделий методом АТ из сплава Ti6Al4V с ПЭО покрытием.

На основании проведенных исследований в настоящей работе комплексная технология создания изделий методом АТ из сплава Ti6Al4V с ПЭО покрытием представлена на рис. 4.4 и сочетает в себе как процессы АТ, так и ПЭО.

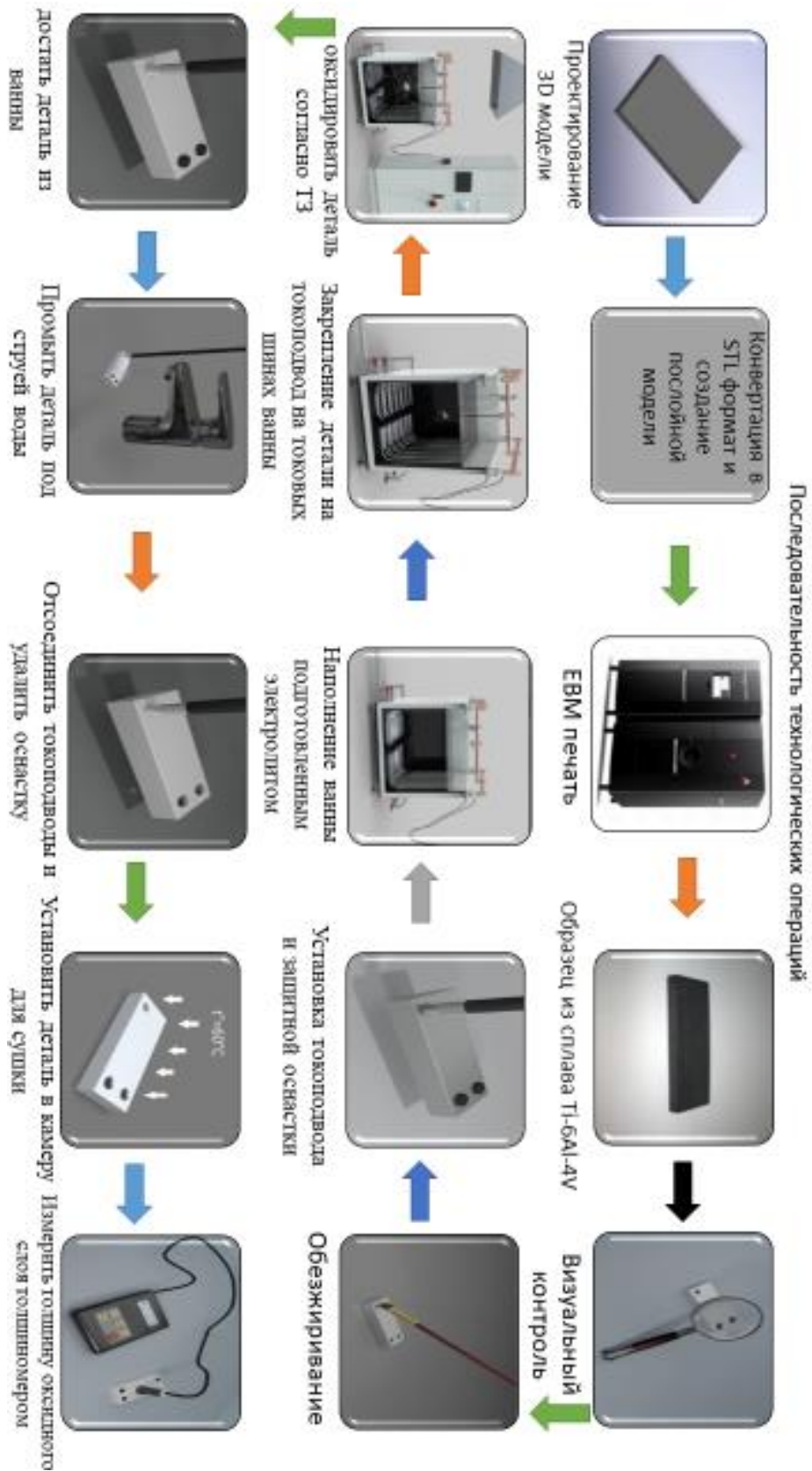


Рис.4.4 Последовательность технологических операций разработанной технологии.

Выводы по главе 4.

1. Создан способ плазменно-электролитного окисления (PEO) на компонентах титанового сплава Ti-6-Al-4V, полученных методом электронно-лучевого плавления (EBM).
2. Сформулированы требования к покрываемым поверхностям.
3. Установлено, что технологический процесс ПЭО должен содержать три группы операций: подготовительные, основные и заключительные.
4. Определена последовательность технологических операций при ПЭО.
5. Сформулированы требования по обустройству технологического участка для размещения оборудования и реализации лабораторной технологии плазменно-электролитной обработки.
6. Приведен проект основного состава оборудования участка плазменно – электролитной обработки и сформулированы требования для его размещения, а также 3D модель типового участка.
7. Приведен порядок операций (технологическая карта) для комплексной технологии создания изделий методом АТ из сплава Ti6Al4V с ПЭО покрытием

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. По итогам проведённых теоретических и практических исследований была решена важная научно-техническая задача, значимая как для предприятий машиностроения, так и для медицинской промышленности. Задача заключалась в разработке процессов изготовления разнообразных изделий из Ti сплава [ВТ6] с использованием аддитивных технологий, таких как электронно-лучевая плавка (EBM).

2. Изучение литературных источников показало, что наиболее предпочтительным способом получения титановых компонентов с использованием аддитивных технологий является метод электронно-лучевого плавления (EBM). Устройство EBM демонстрирует заметную эффективность в производстве. Термическая эксплуатация оборудования снижает внутреннее напряжение, возникающее при производстве изделий, тем самым сводя на нет необходимость термической обработки для улучшения механических свойств и устранения стойких напряжений, как это необходимо в процедуре SLM. Тем не менее поддержание необходимого уровня вакуума сопряжено с дополнительными расходами.

3. Повышение долговечности и надежности изделий из титановых сплавов с использованием аддитивных технологий является важнейшей задачей в области машиностроения. Плазменно-электролитическая обработка (PEO) является перспективным подходом к защите титановых сплавов от износа в узлах трения и суровых химических средах. Среди различных методов, изучаемых для нанесения защитных и износостойких покрытий.

4. Плазменно-электролитическая обработка (PEO) — это процедура, при которой внешний слой компонентов претерпевает превращение в оксидную керамику за счет использования электроплазмохимических условий. Этот

метод позволяет создавать универсальные покрытия на поверхности титановых компонентов, обладающие такими заметными характеристиками, как повышенная износостойкость, устойчивость к коррозии, превосходные электроизоляционные характеристики и благоприятные адгезионные свойства.

5. Плазменно-электролитическая обработка с использованием анодно-катодного ПЭО позволяет создавать покрытия, обладающие большей толщиной и меньшей пористостью. В настоящее время этот метод является основным в области обработки поверхностей.

6. Проведенный аналитический обзор литературных источников показал довольно низкую степень разработанности выбранного направления работы и подтвердил актуальность работы.

7. На основе анализа титановых сплавов, применяемых в авиационной промышленности для проведения исследований был выбран широко используемый в различных отраслях сплав ВТ6 (Ti6Al4V).

8. Было подобрано специализированное оборудование, которое позволяет провести необходимый объем экспериментальных работ. Это оборудование может быть использовано для внедрения процессов анодного и плазменно-электролитического оксидирования, а также их комбинаций, в промышленной сфере.

9. Выбранные инструменты и оборудование могут успешно применяться в промышленности для интеграции процессов анодного оксидирования с последующей обработкой методом плазменно-электролитического оксидирования титановых сплавов. Это соответствует одной из задач данной работы по внедрению технологий в производство.

10. Образцы из титанового сплава ВТ6 (Ti-6Al-4V) были изготовлены с использованием метода электронно-лучевой плавки, после чего на них было нанесено покрытие путем плазменно-электролитической оксидации (ПЭО).

11. Исследованы зависимости толщины, сквозной пористости, прочности сцепления ПЭО-покрытия с основой от заданной концентрации компонентов электролита.

12. Исследованы зависимости толщины, сквозной пористости, прочности сцепления ПЭО-покрытия с основой от плотности тока, соотношения катодного и анодного токов, длительности процесса ПЭО.

13. Покрытия РЕО, полученные в алюминатно-щелочном электролите, демонстрируют изменения в фазе оксида титана, что указывает на то, что анодное окисление основного металла в первую очередь влияет на развитие покрытия. Кроме того, было замечено, что вещества, присутствующие в водном растворе алюминатно-щелочного электролита, играют роль в составе покрытия и увеличивают его толщину, способствуя образованию шпинельной фазы титаната алюминия (Al_2TiO_5).

14. Установлено, что адгезия ПЭО покрытия улучшается при увеличении толщины, что обеспечивает лучшую несущую способность и приводит к значительному, в несколько раз, повышению износостойкости.

15. Исследования показали, что помимо состава электролита и его концентрации, на характеристики оксидных слоев, формируемых на титановом сплаве Ti6Al4V (ВТ6), значительное воздействие оказывают температура электролита, время проведения процесса оксидирования и электрические параметры метода плазменного электролитического оксидирования.

16. ПЭО обработка в алюминатно-щелочном электролите приводит к снижению шероховатости поверхности образцов из титанового сплава Ti6Al4V (BT6), полученных по АТ технологии.

17. Определено, что фактически на электроизоляционные характеристики ПЭО покрытия оказывает значительное влияние только толщина покрытия и состояние образца, а для увеличения пробойного напряжения требуется дополнительно заполнять поры покрытия высокотемпературным полимером методом вакуумной инфузии.

18. Создан метод плазменно-электролитного окисления (ПЭО) для обработки компонентов титанового сплава Ti-6-Al-4V, полученных методом электронно-лучевого плавления (EBM).

19. Сформулированы требования к покрываемым поверхностям.

20. Установлено, что технологический процесс ПЭО должен содержать три группы операций: подготовительные, основные и заключительные.

21. Определена последовательность технологических операций при ПЭО.

22. Сформулированы требования по обустройству технологического участка для размещения оборудования и реализации лабораторной технологии плазменно-электролитной обработки.

23. Приведен проект основного состава оборудования участка плазменно – электролитной обработки и сформулированы требования для его размещения, а также 3D модель типового участка.

24. Приведен порядок операций (технологическая карта) для комплексной технологии создания изделий методом АТ из сплава Ti6Al4V с ПЭО покрытием.

Публикации.

- 1) Dhiaa H.Hilfi , Suminov Igor «Additive Manufacturing Using Material Ti-6AL-4V Titanium Alloy: Review», NEUROQUANTOLOGY | March 2023 | Volume 21 | Issue 5| Page 1530-1556| doi: 10.48047/nq.2023.21.5.NQ222145
- 2) Dhiaa H.Hilfi, Suminov Igor «Microsturctural Characteristics and Mechanical Properties of Ti 6Al 4V Alloy in Additive Manufacturing», International Journal of Membrane Science and Technology, 2023, Vol. 10, No. 2, pp 3665-3681
- 3) Суминов И.В., Хилфи Диаа Х.Ч. «Аддитивные технологии в современной промышленности: применение и перспективы на примере титановых сплавов», обзор, Кузнечно-штамповочное производство, обработка материалов давлением, №3, 2024 год, стр.36-44.
- 4) Суминов И.В., Хилфи Диаа Х.Ч. «Экспериментальное исследование влияния технологических параметров процесса электрохимическое оксидирование на свойства оксидного слоя и его эксплуатационные характеристики», испытания, измерения и контроль, Кузнечно-штамповочное производство, обработка материалов давлением, №4, 2024 год, стр.51-57.
- 5) Суминов И.В., Хилфи Диаа Х.Ч. «Технологии плазменно-электролитной обработки поверхностей изделий машиностроения из титанового сплава ВТ6, сформированных аддитивными технологиями», испытания, измерения и контроль, Кузнечно-штамповочное производство, обработка материалов давлением, №4, 2024 год, стр.58-62.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Микродуговое оксидирование (теория, технология, оборудование) / И.В. Суминов, А.В. Эпельфельд, В.Б. Людин и др. — М.: ЭКОМЕТ, 2005. — 368 с. 3.
2. Малышев, В.Н. Упрочнение поверхностей трения методом микродугового оксидирования: Автореф. дис...докт. техн. наук / В.Н. Малышев. — Москва, 1999. — 53 с.
3. Attaran, M. The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing [Text] / M. Attaran // Business Horizons. — 2017. — Vol. 60. — Iss. 5. — P. 677-688.
4. Василюк, В.П. Использование аддитивных технологий при восстановлении дефектов лицевого скелета [Текст] / В.П. Василюк, Г.И. Штраубе, В.А. Четвертных / Пермский медицинский журнал. — 2013. — Т. 30. — № 3. — С. 60-65.
5. Зленко, М.А. Аддитивные технологии в машиностроении [Текст]: пособие для инженеров / М.А. Зленко, М.В. Нагайцев, В.М. Довбыш. — М.: ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. — 220 с.
6. Чемодуров, А.Н. Применение аддитивных технологий в производстве изделий машиностроения [Текст] / А.Н. Чемодуров // Известия ТугГУ. Технические науки. — 2016. — № 8. — С. 210-217.
7. Additive Manufacturing [Text] / compiled by A. Bandyopadhyay, S. Bose. — N.Y.: CRC Press, 2015. — 389 p.
8. Noorani, R. 3D Printing: Technology, Applications, and Selection [Text] / R. Noorani. — N.Y.: CRC Press, 2017. — 271 p.
9. Quinlan, H.E. Industrial and Consumer Uses of Additive Manufacturing: A Discussion of Capabilities, Trajectories, and Challenges [Text] / H.E. Quinlan, T. Hasan, et.al. // Journal of Industrial Ecology. — 2017. — Vol. 21. — P. 15-20.
10. Кузнецов, П.А. Аддитивные технологии на базе металлических порошковых материалов для российской промышленности [Текст] / П.А. Кузнецов, О.В. Васильева и др. // Новости материаловедения. Наука и техника.— 2015. — № 2 (14). — С. 4-10.
11. Dawes, J. Introduction to the Additive Manufacturing Powder Metallurgy Supply Chain. Exploring the production and supply of metal powders for AM processes [Text] / J. Dawes, R. Bowerman, R. Trepleton. // Johnson Matthey Technol. Rev. — 2015. — Vol. 59. Iss. 3. — P.

243–256.

12. Wohlers Report 2018. 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry. Annual Worldwide Progress Report [Text] / compiled by I. Campbell, O. Diegel, J. Kowen and T. Wohlers. – Fort Collins: Wohlers Associates, Inc, 2017. – 344 p.
13. Attaran, M. The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing [Text] / M. Attaran // Business Horizons. – 2017. – Vol. 60. – Iss. 5. – P. 677-688.
14. Смуров, И.Ю. О внедрении аддитивных технологий и производства в отечественную промышленность [Текст] / И.Ю. Смуров, С.Г. Конов, Д.В. Котобан // Новости материаловедения. Наука и техника. – 2015. – № 2 (14). – С. 11-22.
15. Kruth, J.P. Binding Mechanisms in Selective Laser Sintering and Selective Laser Melting [Text] / J.P. Kruth, P. Mercelis, L. Froyen, M. Rombouts // Rapid Prototyping Journal. – 2005. – Vol. 11. – Iss.1. – P. 26-36.
16. Milewski, J.O. Additive Manufacturing of Metals. From Fundamental Technology to Rocket Nozzles, Medical Implants, and Custom Jewelry. Springer Series in Materials Science 258 [Text] / J.O. Milewski. – Cham: Springer International Publishing AG, 2017. – 343 p.
17. Meier, H. Experimental studies on selective laser melting of metallic parts [Text] / H. Meier, C. Haberland // Materialwissenschaft und Werkstofftechnik. – 2008. – Vol. 39. – No. 9. – P. 665-670.
18. Волосова, М.А. Пути оптимизации процесса селективного лазерного плавления при помощи выбора стратегии обработки лазерным лучом [Текст] / М.А. Волосова, А.А. Окунькова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 14. – № 4 (2). – С. 587-591.
19. Килина, П.Н. Исследование режимов селективного лазерного плавления металлических порошков [Текст] / П.Н. Килина, Е.А. Морозов и др. // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6. – С.133.
20. Krol, M. Surface quality in selective laser melting of metal powders [Text] / M. Krol, L.A. Dobrzanski, L. Reimann, I. Czaja // Archives of Materials Science and Engineering. – 2013. – Vol. 60. – Iss.2. – P. 87-92.
21. Смуров, И.Ю. Аддитивное производство с помощью лазера [Текст] / И.Ю. Смуров, И.А. Мовчан и др. // Вестник МГТУ “Станкин”. – 2011. – № 4 (16). – С. 144-146.
22. Hebert, R.J. Viewpoint: metallurgical aspects of powder bed metal additive manufacturing

- [Text] / R.J. Hebert // J Mater Sci. – 2016. – Vol. 51 – P. 1165–1175.
23. Байтимеров, Р.М. Определение оптимальных параметров селективного лазерного сплавления титанового сплава TiAl6V4 углекислотным лазером [Текст] / Р.М. Байтимеров, П.А. Лыков и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2017. – Т. 17. – № 3. – С. 36-40.
24. Vandenbroucke, B. Selective laser melting of biocompatible metals for rapid manufacturing of medical parts [Text] / B. Vandenbroucke, J.P. Kruth // Rapid Prototyping Journal. – 2007. – № 4 (13). – P. 196-203.
25. Байтимеров, Р.М. Определение оптимальных параметров селективного лазерного сплавления титанового сплава TiAl6V4 углекислотным лазером [Текст] / Р.М. Байтимеров, П.А. Лыков и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2017. – Т. 17. – № 3. – С. 36-40.
26. Смуров И.Ю. Аддитивное производство с помощью лазера. Проведение экспериментальных работ [Текст] / И.Ю. Смуров, И.А. Ядройцев и др. // Вестник МГТУ “Станкин”. – 2012. – № 1 (18). – С. 36-38.
27. Смуров, И.Ю. Экспериментальное аддитивное прямое производство с помощью лазера [Текст] / И.Ю. Смуров, И.А. Мовчан, И.А. Ядройцев и др. // Вестник МГТУ “Станкин”. – 2012. – № 2 (20). – С. 48-50.
28. Литунов, С.Н. Обзор и анализ аддитивных технологий. Часть 1 [Текст] / С.Н. Литунов, В.С. Слободенюк, Д.В. Мельников // Омский научный вестник. – 2016. – № 1 (145). – С. 12-17.
29. Murr, L.E. Metal fabrication by additive manufacturing using laser and electron beam melting technologies [Text] / L.E. Murr, S.M. Gaytan, D.A. Ramirez, et.al. // J. Mater. Sci. Technol. – 2012. – Vol. 1 (28). – P. 3-16.
30. Kirchner, A. Process window for electron beam melting of Ti-6Al-4V [Text] / A. Kirchner, B. Klöden, J. Luft, et.al. // Powder Metallurgy. – 2015. – Vol. 4 (58). – P. 246-249.
31. Lancaster, R. Structural Integrity of an Electron Beam Melted Titanium Alloy [Text] / R. Lancaster, G. Davies, et.al. // Materials. – 2016. – Vol. 9. – P. 470.
32. Швец, А.А. Сравнительный анализ устройств для объемной печати [Текст] / А.А. Швец, А.Р. Авдеев, А.В. Дроботов // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2015. – № 1 (156). – С. 76-79.

33. Упрочнение поверхности деталей из алюминиевых, титановых и циркониевых сплавов микродуговым оксидированием/ А.Е. Розен, А.Ю. Артемьев, А.В. Прыщак, А.И. Лопухова// Тез. докл. I собр. металлосведов России (Пенза, 22-24 сент. 1993 г.). Пенза: 1993. Ч. II. С. 45-46.
34. Многофункциональные защитные покрытия на металлах и сплавах/ С.В. Гнеденков, П.С. Гордиенко, С.И. Синеврюхов и др.// Тез. докл. междунар. науч.-техн. симпозиума «Наукоемкие технологии и проблемы их внедрения на машиностроительных и металлургических предприятиях Дальнего Востока». (Комсомольск-на-Амуре, 19-24 сент. 1994 г.). Комсомольск-на-Амуре: 1994. С. 53.
35. Формирование износостойких покрытий на титане/ П.С. Гордиенко, С.В. Гнеденков, О.А. Хрисанфова и др.// Электронная обработка материалов. 1990. №5. С. 32-35.
36. Гордиенко П.С. Формирование покрытий на ряде металлов и сплавов в электролитах при микроплазменных процессах: Дис. ... д-ра техн. наук. 1991. 683 с.
37. Малоцикловая усталость титановых сплавов после МДО/ Е.Д. Шеховцев, П.С. Гордиенко, С.В. Гнеденков, Н.И. Лошакова// Защитные покрытия. Способы получения и свойства. Владивосток. 1989.
38. Образование рутила и анатаза при микродуговом оксидировании титана в водных электролитах/ П.С. Гордиенко, О.А. Хрисанфова, Т.П. Яровая и др.// Электронная обработка материалов. 1990. №4. С. 19-22.
39. Кузовлева К.Т., Гордиенко П.С. Потенциодинамическое исследование анодного оксидирования титана при высоких потенциалах// Электронная обработка материалов. 1989. №5. С. 44-47.
40. Баковец В.В. Оксидные покрытия, полученные микродуговой обработкой титанового сплава в кислых электролитах// Неорганические материалы. 1987. Т. 23. №7. С. 1226-1228.
41. Электролит для микродугового оксидирования титана и его сплавов: А.с. 1788793 РФ: МКИ С25 Д11/26.

42. Электролит для формирования покрытий на вентилях металлах: Пат. №2046156 РФ: МКИ С25 Д11/04.
43. Новое явление в электролизе/ А.В. Николаев, Г.А. Марков, Б.И. Пещевский.- Изв. СО АН СССР. Сер. хим. науки, 1977. Вып. 5. № 12. С. 32-34.
44. Технология получения покрытий микродуговым оксидированием/ Э.С. Атрощенко, И.А. Казанцев, А.Е. Розен// Новые промышленные технологии. 1996. № 1. С. 28-33.
45. Получение покрытий анодно-искровым электролизом/ В.И. Черненко, Л.А. Снежко, И.И. Папанова - Л.: Химия. Ленингр. отд-ние, 1991. 126 с.
46. Свойства оксидных пленок, сформированных переменным напряжением на титановом сплаве ВТ-1/ Е.К. Черненко, Л.А. Янов, В.И. Черненко// Электрохимия. 1971. Т. VII. Вып. 9. С. 1374-1377.
47. Микродуговые и дуговые методы нанесения покрытий/ О.П. Терлеева, Г.А. Марков, Е.К. Шулейко// Тр. ин-та. Московский ин-т нефтехимической и газовой промышленности. 1985. Вып. 185. С. 55-64.
48. Способ анодирования металлов: А.с. 534525 СССР: МКИ С25 Д11/26.
49. Барыкин Н.В. Разработка технологии восстановления и упрочнения деталей из алюминиевых сплавов микродуговым оксидированием: Дис. ... канд. техн. наук. 1994. 173 с.
50. Способ микродугового оксидирования металлических изделий и устройство для его осуществления: Пат. №2070947 РФ: МКИ С25 Д11/04.
51. Малышев В.Н. Особенности формирования покрытий методом анодно-катодного микродугового оксидирования// Защита металлов. 1996. Том 32. №6. С. 662-667.
52. Особенности строения и свойства покрытий, наносимых методом микродугового оксидирования/ В.Н. Малышев, Г.А. Марков, В.А. Федоров и др.// Химическое и нефтяное машиностроение. 1984. №1. С. 26-27.

53. Микродуговое оксидирование/ Г.А. Марков и др.// Наука и человечество: Международный ежегодник. М.: Знание, 1981.
54. Электролит для микродугового оксидирования титана и его сплавов: А.с. 1788793 РФ: МКИ С25 Д11/26.
55. Электролит для анодирования титана и его сплавов: Пат. №1156409 РФ: МКИС25 Д11/26.
56. Мусин Р.А., Конюшков Г.В. Соединение металлов с керамическими материалами. М.: Машиностроение, 1991. 224 с.
57. ГОСТ 19807-91 Титан и сплавы титановые деформируемые. Марки.
58. ОСТ 1.92077-78 Сплавы титановые. Марки.
59. https://www.splav-kharkov.com/mat_start.php?name_id=129860. Плазменно электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов/ И.В. Суминов, П.Н. Белкин, А.В. Эпельфельд и др.; под общей ред. И.В.Суминова. В 2-х томах. Т.2. М.: Техносфера, 2011. - 512с.
61. Толщиномер ВТ-201, <https://www.ntcexpert.ru/uc/tolshhinamery-pokrytij/639-tolshhinomer-pokrytij-vt-201>, дата посещения 13.05.2022
62. Микротвердомеры, твердомеры Виккерса, <http://www.s-i.ru/mikrotverdomery-tverdomery-vickersa/>, дата посещения 13.02.2022
63. Эпельфельд А.В., Людин В.Б., Суминов И.В., Крит Б.Л., Борисов А.М., Григорьев С.Н. Микродуговое оксидирование / А. В. Эпельфельд, В. Б. Людин, И. В. Суминов [и др.]. – Москва: Московский государственный технологический университет "СТАНКИН", 2020. – 94 с.
64. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий/ Ю.П. Адлер и др. М.: изд-во "Паука", 1971. 287 с.
65. Финки Д. Введение в теорию планирования экспериментов. Перев. с англ. Главная редакция физико-математической литературы изд-ва "Наука", 1970.
67. Жуков С.В. Исследование процессов и разработка технологии формирования

- многофункциональных покрытий методом микродугового оксидирования на титановых сплавах в приборостроении: Дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2009. 228 с.
68. A. Molinari, G. Straffelini, B. Tesi and T. Bacci: *Wear*, 1997, 208, (1-2), 105–112.
69. L. Ceschini, E. Lanzoni, C. Martini, D. Prandstraller and G. Sambogna: *Wear*, 2008, 264, (1-2), 86–95.
70. X.-J. Li, G.-A. Cheng, W.-B. Xue, R.-T. Zheng and Y.-J. Cheng: *Mater. Chem. Phys.*, 2008, 107, (1), 148–152.
71. X.-Z. Lin, M.-H. Zhu, J.-F. Zheng, J. Luo and J.-L. Mo: *Trans. Nonferr. Met. Soc. China*, 2010, 20, (4), 537–546.
72. C. Martini, L. Ceschini, F. Tarterini, J. M. Paillard and J. A. Curran: *Wear*, 2010, 269, (11-12), 747–756.
73. Y. M. Wang, B. L. Jiang, L. X. Guo and T. Q. Lei: *Appl. Surf. Sci.*, 2006, 252, (8), 2989–2998.
74. Y. M. Wang, B. L. Jiang, T. Q. Lei and L. X. Guo: *Surf. Coat. Technol.*, 2006, 201, (1-2), 82–89.
75. J. M. Wheeler, C. A. Collier, J. M. Paillard and J. A. Curran: *Surf. Coat. Technol.*, 2010, 204, (21-22), 3399–3409.
76. A. L. Yerokhin, A. Leyland and A. Matthews: *Appl. Surf. Sci.*, 2002, 200, (1-4), 172–184.
77. A. L. Yerokhin, X. Nie, A. Leyland and A. Matthews: *Surf. Coat. Technol.*, 2000, 130, (2-3), 195–206.
78. Y. K. Qin, D. S. Xiong, J. L. Li and R. Tyagi: *Surf. Eng.*, to be published.
79. S. L. Sinebryukhov, A. S. Gnedenkov, O. A. Khrisanfova and S. V. Gnedenkov: *Surf. Eng.*, 2009, 25, (8), 565–5
80. Цвиккер У. Титан и его сплавы. Берлин - Нью-Йорк, 1974. Пер. с нем. М.: Металлургия, 1979. 512 с.
81. Еременко В.Н. Титан и его сплавы.- Киев: Изд-во АН УССР, 1960. 500 с.
82. Тимошенко А.В. Защитные неметаллические и неорганические покрытия и материалы. Курс лекций, институт стали и сплавов, № 484, 1990 г.

83. Прикладная техника обработки поверхности металлических материалов: Справ, изд. Г. Симон, М. Тома. Пер. с нем./ Под ред. А.Ф. Пименова. - Челябинск: Metallurgiya, Челябинское отделение, 1991. 368 с.
84. Кудинов В.В. Нанесение покрытий напылением. Л., 1970. 35 с.
85. Simon H. und Suchentrunk R. Werkstoffe und Schichten für hohe Beanspruchungen in der Luft- und Raumfahrt// Galvanotechnik. 1996. № 2. S.396-411 .
86. РД 5.95066-90. Термическое оксидирование (антифрикционное и защитное) деталей из сплавов типа ПТ-3В.
87. Упрочнение поверхности деталей из алюминиевых, титановых и циркониевых сплавов микродуговым оксидированием/ А.Е. Розен, А.Ю. Артемьев,
88. А.В. Прыщак, А.И. Лопухова// Тез. докл. I собр. металлосведов России (Пенза, 22-24 сент. 1993 г.). Пенза: 1993. Ч. II. С. 45-46.180
89. Грилихес С.Я., Тихонов К.И. Электродитические и химические покрытия: Теория и практика. Л.; Химия. Ленингр. отд-ние, 1990. 288 с.
90. Кудинов В.В., Иванов В.М. Нанесение плазмой тугоплавких покрытий. М.: Мап1ИНостроение , 1981. 192 с.
91. Савочкин В.Р., Нагай Й.Н. Напряжение пробоя и защитные свойства окисных пленок на титане// Защита металлов. 1981. Том XVII. №3 . С. 318-321.
92. Гнеденков СВ . Формирование покрытий на титане методом микродугового оксидирования, их состав и свойства: Дис. ... канд. хим. наук. 1988. 165 с.
93. Формирование износостойких покрытий на титане/ П.С. Гордиенко, С В . Гнеденков, О.А. Хрисанфова и др.// Электронная обработка материалов. 1990. №5. С. 32-35.
94. Гордиенко П.С. Формирование покрытий на ряде металлов и сплавов в электролитах при микроплазменных процессах: Дис. ... д-ра техн. наук. 1991. 683 с.

95. Малоцикловая усталость титановых сплавов после МДО/ Е.Д. Шеховцев, П.С. Гордиенко, СВ . Гнеденков, Н.И. Лошакова// Защитные покрытия. Способы получения и свойства. Владивосток. 1989.
96. Федоров В.А. Модифицирование микродуговым оксидированием поверхностного слоя деталей// Сварочное производство. 1992. №8. С. 29-30.
97. Образование рутила и анатаза при микродуговом оксидировании титана в водных электролитах/ П.С. Гордиенко, О.А. Хрисанфова, Т.П. Яровая и др.// Электронная обработка материалов. 1990. №4. С. 19-22.
98. Кузовлева К.Т., Гордиенко П.С. Потенциодинамическое исследование анодного оксидирования титана при высоких потенциалах// Электронная обработка материалов. 1989. №5. С. 44-47.
99. Баковец В.В. Оксидные покрытия, полученные микродуговой обработкой титанового сплава в кислых электролитах// Неорганические материалы. 1987. Т. 23. №7. С. 1226-1228.
100. Технология получения покрытий микродуговым оксидированием/ Э.С. Атрощенко, И.А. Казанцев, А.Е. Розен// Новые промышленные технологии. 1996. № I.e . 28-33.
101. Получение покрытий анодно-искровым электролизом/ В.И. Черненко,
- 102.Л.А. Снежко, И.И. Папанова - Л.: Химия. Ленингр. отд-ние, 1991. 126 с.
103. Герций О.Ю. Технологическое обеспечение качества обработки деталей машин методом микродугового оксидирования на основе раскрытия наследственных связей между заготовкой и деталью: Дис. ... канд. техн. наук. 1996. 254 с.
104. Свойства оксидных пленок, сформированных переменным напряжением на титановом сплаве ВТ-1/ Е.К. Черненко, Л.А. Янов, В.И. Черненко// Электрохимия. 1971. Т.VII. Вып. 9. С. 1374-1377.
105. Малышев В.Н. Особенности формирования покрытий методом анодно-катодного микродугового оксидирования// Защита металлов. 1996. Том 32. №6. С. 662-667.

106. Особенности строения и свойства покрытий, наносимых методом микродугового оксидирования/ В.Н. Малышев, Г.А. Марков, В.А. Федоров и др.// Химическое и нефтяное машиностроение. 1984. №1 . С. 26-27.
107. Руднев В.С. , Гордиенко П.С. Зависимость толщины покрытия от потенциала МДО// Защита металлов. 1993. Т.29. №2. С. 304-307.
108. Оптимизация режимов получения и свойств оксидных покрытий на алюминиевом сплаве с использованием метода мультифрактального анализа/ В.Н. Малышев, А.Г. Колмаков, И.Ж. Бунин// Физика и химия обработки материалов. 1997. №5. С. 77-84.
109. Некоторые закономерности формирования микродуговых покрытий/ А.И. Слонова, О.П. Терлеева, Е.К. Шулепко, Г.А. Марков// Электрохимия. 1992. Т.28. Вып. 9. С. 1280-1285. 18
110. Справочник по триботехнике. В 3-х т. Т. 3. Триботехника антифрикционных, фрикционных и сцепных устройств. Методы и средства триботехнических испытаний/ Под общ. ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе. М.: Машиностроение, 1992. 730 с.
111. P. Pesode, S. Barve, Surface modification of titanium and titanium alloy by plasma electrolytic oxidation process for biomedical applications: a review, Mater. Today: Proc. (2020).
112. LEON A, LEVY G K, RON T, SHIRIZLY A, AGHION E, The effect of strain rate on stress corrosion performance of Ti6Al4V alloy produced by additive manufacturing process [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9: 4097–4105.
113. Isaev A., Grechishnikov V., Kozochkin M. [et al.] Structure and machinability of thin-walled parts made of titanium alloy powder using electron beam melting technology / A. Isaev, V. Grechishnikov, M. Kozochkin [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – Miskolc-Lillafured: Institute of Physics Publishing, 2016. – P. 012044.
114. Facchini L, Microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V produced by electron beam melting of pre-alloyed powders/ Facchini L, Magalini E, Robotti P, Molinari A// - Received 2009. - p 171-178.
115. J. Wang, H. Fan, H. Zhang, Q. Chen, Y. Liu, W. Ma, Anodizing process of

- titanium and formation mechanism of anodic TiO₂ nanotubes, *Progr. Chem.* 28 (2016) 284–295.
116. J.D.C. Tardelli, C. Bolfarini, A.C. Dos Reis, Comparative analysis of corrosion resistance between beta titanium and Ti-6Al-4V alloys: a systematic review, *J. Trace Elem. Med. Biol.* (2020), 126618.
117. WANG Ya-ming, JIANG Bai-ling, LEI Ting-quan, JIA De-chang, ZHOU Yu. Research progress of wear resistant coating on Ti6Al4V alloy surface [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2016, 3: 38–43.
118. X. Zhang, Z. Yao, Z. Jiang, Y. Zhang, X. Liu, Investigation of the plasma electrolytic oxidation of Ti6Al4V under single-pulse power supply, *Corros. Sci.* 53 (2011) 2253–2262.
119. D. Quintero, O. Galvis, J.A. Calderon, M.A. Gomez, J.G. Castano, F. Echeverría, H. Habazaki, Control of the physical properties of anodic coatings obtained by plasma electrolytic oxidation on Ti6Al4V alloy, *Surf. Coat. Technol.* 283 (2015) 210–222
120. A.L. Yerokhin, X. Nie, A. Leyland, A. Matthews, S.J. Dowey, Plasma electrolysis for surface engineering, *Surf. Coat. Technol.* 122 (1999) 73–93.
121. Y. Han, S.-H. Hong, K. Xu, Porous nanocrystalline titania films by plasma electrolytic oxidation, *Surf. Coat. Technol.* 154 (2002) 314–318.
122. V.S. Rudnev, Micro- and nano-formations on the surface of plasma electrolytic oxide coatings on aluminum and titanium, *Surf. Coat. Technol.* 235 (2013) 134–143.
123. M. Shokouhfar, C. Dehghanian, A. Baradaran, Preparation of ceramic coating on Ti substrate by Plasma electrolytic oxidation in different electrolytes and evaluation of its corrosion resistance, *Appl. Surf. Sci.* 257 (2011) 2617–2624.
124. H. Jiang, Z. Shao, B. Jing, Effect of electrolyte composition on photocatalytic activity and corrosion resistance of micro-arc oxidation coating on pure titanium, in, *Procedia Earth Planet. Sci.* (2011) 156–161.
125. Y. Jiang, J. Wang, B. Hu, Z. Yao, Q. Xia, Z. Jiang, Preparation of a novel yellow ceramic coating on Ti alloys by plasma electrolytic oxidation, *Surf. Coat. Technol.* 307 (2016) 1297–1302.
126. M. Echeverry-Rendon, O. Galvis, D. Quintero Giraldo, J. Pavon, J.L. Lopez- Lacomba, E. Jimenez-Pique, M. Anglada, S.M. Robledo, J.G. Castano, F. Echeverría, Osseointegration improvement by plasma electrolytic oxidation of modified titanium alloys surfaces, *J. Mater.*

- Sci. Mater. Med. 26 (2015) 1–18.
127. O.A. Galvis, D. Quintero, J.G. Castano, H. Liu, G.E. Thompson, P. Skeldon, F. Echeverría, Formation of grooved and porous coatings on titanium by plasma electrolytic oxidation in H₂SO₄/H₃PO₄ electrolytes and effects of coating morphology on adhesive bonding, Surf. Coat. Technol. 269 (2015) 238–249.
128. W. Ping, W. Ting, P. Hao, G.X. Yang, Effect of NaAlO₂ concentrations on the properties of micro-arc oxidation coatings on pure titanium, Mater. Lett. 170 (2016) 171–174.
129. J. Baszkiewicz, D. Krupa, J. Mizera, J.W. Sobczak, A. Bilinski, Corrosion resistance of the surface layers formed on titanium by plasma electrolytic oxidation and hydrothermal treatment, Vacuum 78 (2005) 143–147.
130. “Additive Manufacturing Using Material Ti-6AL-4V Titanium Alloy:Review”, NeuroQuantology. Dhiaa H.Hilfi, Suminov Igor, 25- March -2023, DOI:[10.48047/nq.2023.21.5.NQ222145](https://doi.org/10.48047/nq.2023.21.5.NQ222145)
131. M. Aliofkhazraei, D.D. Macdonald, E. Matykina, E.V. Parfenov, V.S. Egorokin, Applied Surface Science Advances, Volume 5, 1 September 2021, 100121.
132. Dhiaa H.Hilfi , Suminov Igor «Additive Manufacturing Using Material Ti-6AL-4V Titanium Alloy: Review», NEUROQUANTOLOGY | March 2023 | Volume 21 | Issue 5| Page 1530-1556| doi: 10.48047/nq.2023.21.5.NQ222145
133. Dhiaa H.Hilfi, Suminov Igor «Microstructural Characteristics and Mechanical Properties of Ti 6Al 4V Alloy in Additive Manufacturing», International Journal of Membrane Science and Technology, 2023, Vol. 10, No. 2, pp 3665-3681
134. Суминов И.В., Хилфи Дияа Х.Ч. «Аддитивные технологии в современной промышленности: применение и перспективы на примере титановых сплавов», обзор, Кузнечно-штамповочное производство, обработка материалов давлением, №3, 2024 год, стр.36-44.
135. Суминов И.В., Хилфи Дияа Х.Ч. «Экспериментальное исследование влияния технологических параметров процесса электрохимическое окислирование на свойства оксидного слоя и его эксплуатационные характеристики», испытания, измерения и контроль, Кузнечно-штамповочное производство, обработка материалов давлением, №4, 2024 год, стр.51-57.

136. Суминов И.В., Хилфи Диаа Х.Ч. «Технологии плазменно-электролитной обработки поверхностей изделий машиностроения из титанового сплава ВТ6, сформированных аддитивными технологиями», испытания, измерения и контроль, Кузнечно-штамповочное производство, обработка материалов давлением, №4, 2024 год, стр.58-62.