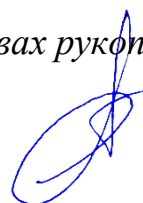


МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«УФИМСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИЙ»

На правах рукописи



ТАМИНДАРОВ Дамир Рамилевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА
ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА ГТД ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ
НА ОСНОВЕ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ИХ ПОВЕРХНОСТИ
ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННЫМ ПОЛИРОВАНИЕМ**

Специальность 2.5.6 Технология машиностроения

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель: доктор
технических наук, профессор
Смыслов А.М.

Уфа – 2026

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ ПЕРА ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА ГТД.....	14
1.1 Актуальность обеспечения низкой шероховатости поверхности.....	14
1.2 Оценка методов финишной обработки поверхности	19
1.3 Анализ физико-химических основ процесса ЭПП	24
1.3.1 Механизм воздействия на обрабатываемую поверхность при ЭПП.....	27
1.3.2 Влияние температуры рабочего электролита и напряжения на кинетику растворения в процессе ЭПП.....	29
1.3.3 Влияние химического состава РЭ на процесс растворения поверхностного слоя в процессе ЭПП.....	32
1.3.4 Зависимость характеристик ЭПП от концентрации компонентов рабочего электролита.....	34
1.4 Анализ применения ЭПП для обработки титановых сплавов.....	35
1.5 Постановка задачи	38
ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	41
2.1 Материалы, принятые для исследования	41
2.2 Методика приготовления растворов	41
2.3 Методика измерения параметров рабочих электролитов.....	42
2.4 Экспериментальная установка.....	42
2.5 Методика предварительной оценки качества поверхности после электролитно-плазменной обработки	43
2.6 Методика определения микротвердости поверхности	44
2.7 Методика определения шероховатости (микрогеометрии) поверхности	44
2.8 Методика оценки морфологии и элементного состава поверхности	46
2.9 Методика исследования фазового состава	46
2.10 Методика усталостных испытаний	47

2.11 Методика определения концентрации водорода	48
2.12 Методика определения химического состава поверхностного слоя	49
2.13 Методика утилизации растворов в лабораторных условиях.....	49
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА РАБОЧЕГО ЭЛЕКТРОЛИТА ДЛЯ ЭПП ДВУХФАЗНЫХ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ	51
3.1 Анализ влияния состава применяемых РЭ на состояние поверхности двухфазных титановых сплавов	51
3.2 Анализ проблемы ЭПП титана и титановых сплавов	53
3.3 Анализ механизма растворения титана во фторид содержащих водных растворах.....	54
3.4 Влияние pH среды РЭ на концентрацию HF	58
3.5 Разработка феноменологической модели процесса ЭПП титановых сплавов с уточнением роли рабочего электролита.....	60
3.6 Проверка феноменологической модели	61
3.6.1 Содержание плавиковой кислоты в известных РЭ для ЭПП титана и сплавов на его основе	61
3.6.2 Влияние концентрации HF на растворение оксидных пленок в процессе ЭПП.....	64
3.7 Обоснование компонентного состава РЭ для ЭПП титана и двухфазных титановых сплавов	66
Выводы по главе 3.....	69
ГЛАВА 4. ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ КОМПОНЕНТОВ РАЗРАБОТАННОГО РАБОЧЕГО ЭЛЕКТРОЛИТА НА КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ	71
4.1 Экспериментальное подтверждение роли HF и определение области концентраций, обеспечивающих полирование поверхности	71
4.2 Анализ изменения внешнего вида образцов и потери массы в связи с изменением концентрации HF	76

4.3 Влияние соотношения компонентов РЭ на морфологию и элементный состав обработанной поверхности	80
4.4 Зависимость химического состава поверхностного слоя титанового сплава ВТ6 от состава РЭ	84
Выводы по главе 4.....	89
ГЛАВА 5. ВЛИЯНИЕ ЭПП НА МИКРОГЕОМЕТРИЮ И ТОЧНОСТЬ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ, СТРУКТУРУ МАТЕРИАЛА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ И УСТАЛОСТНУЮ ПРОЧНОСТЬ.....	
5.1 Скорость растворения материала поверхностного слоя.....	92
5.2 Влияние времени обработки на радиус кромок.....	95
5.3 Влияние времени ЭПП на шероховатость обрабатываемой поверхности...	100
5.4 Влияние глубины погружения на изменение шероховатости в процессе ЭПП	104
5.5 Влияние ЭПП на микроструктуру материала поверхностного слоя	106
5.6 Анализ возможности наводороживания поверхностного слоя.....	108
5.7 Влияние ЭПП на усталостную прочность конструктивно-подобных образцов	110
Выводы по главе 5.....	112
ГЛАВА 6. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА ГТД ИЗ ДВУХФАЗНЫХ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ОПЕРАЦИИ ЭПП	
6.1 Обеспечение равномерности обработки на операции ЭПП	113
6.2 Разработка маршрутного описания технологии финишной обработки с использованием операции ЭПП	116
6.3 Корректировка состава рабочего электролита в ходе эксплуатации.....	119
6.4 Оценка возможности расширения круга обрабатываемых титановых сплавов	123

6.5 Подтверждение положительного влияния ЭПП на усталостную прочность направляющих лопаток вентилятора	124
Выводы по главе 6.....	124
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	126
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	128
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	129
ПРИЛОЖЕНИЕ А	144
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	145

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Титановые лопатки компрессора газотурбинного двигателя (ГТД) и энергетических установок, работающие в условиях высоких динамических нагрузок, температур и агрессивных сред, в значительной степени определяют его ресурс и надежность. Обеспечение усталостной прочности лопаток и, как следствие их ресурса, во многом определяется технологией их окончательной обработки, направленной на повышение качества поверхностного слоя.

Наиболее распространённым методом окончательной обработки поверхности пера лопаток компрессора ГТД является ручное полирование войлочными кругами с абразивом. Основными недостатками данной технологии являются зависимость качества обработки поверхности от квалификации рабочего исполнителя и качества применяемого абразивного инструмента. Кроме того, отмечается, что высокая вероятность отрыва абразивных зерен от полировального круга может привести к образованию на обрабатываемой поверхности глубоких рисков, обнаружение которых, зачастую, затруднительно на общем фоне шероховатости. Наряду с этим, данным методом полирования достаточно сложно обеспечить формирование равномерного радиуса входной и выходной кромок по высоте пера лопатки.

Альтернативой и дополнением к ручному полированию лопаток может стать новый метод электролитно-плазменного полирования (ЭПП), активно применяемый в настоящее время в машиностроении при обработке деталей из нержавеющей и конструкционных сталей. Его основными преимуществами являются высокая стабильность показателей качества поверхности и производительность. Однако, проблема ЭПП титановых сплавов изучена в недостаточной степени для использования в технологии изготовления лопаток компрессора ГТД. Существующие публикации в научных изданиях касаются, в основном, исследования ЭПП чистого титана и не освещают проблему обработки

двухфазных титановых сплавов, применяемых в качестве конструкционных материалов для изготовления лопаток компрессора ГТД.

Таким образом, актуальность темы диссертационной работы обусловлена отсутствием научно-обоснованной методологии по ЭПП двухфазных титановых сплавов, что сдерживает применение данного метода в технологии изготовления лопаток компрессора ГТД и энергетических установок.

Степень разработанности темы исследования

Исследованием электролитно-плазменного полирования, занимается множество научных коллективов по всему миру. Фундаментальные основы и прикладные аспекты процесса рассмотрены в работах Российских ученых: Н.А. Амирхановой, П.Н. Белкина, Ф.М. Гайсина, И.Г. Дьякова, С.А. Кусманова, Е.В. Парфенова, И.В. Суминова, Л.А. Ушомирской, А.В. Эпельфельда и др. Теоретические основы процесса и рекомендации по выбору составов рабочих электролитов для полирования деталей из нержавеющей стали, железоникелевых и медных сплавов приведены в работах авторов из стран СНГ: С.В. Ващенко, А.Я. Каменева, И.С. Куликова и Ю.В. Синькевича. Значительный объем исследований физико-химических и технологических аспектов электролитно-плазменных процессов проведен зарубежными исследователями: Г. Гуптой, А. Ерохиным, А. Лейланом, А. Маттьюзом, Сю Нье и др. Опыт применения ЭПП для обработки титановых изделий медицинского назначения рассмотрен в работах К. Нестлера и Х. Цайдлера. Исследование влияния напряжения обработки, концентрации и температуры электролита на скорость процесса полирования поверхностного слоя деталей из титановых сплавов рассмотрено в работах Ю.Г. Алексева, А.С. Будницкого, Д.А. Добрынина, А.Ю. Королева, В.С. Нисса, А.Э. Паршуто, а также Сунь Хуань и Ян Дунлян. Вместе с тем, недостаточность информации о влиянии ЭПП на качество поверхностного слоя двухфазных титановых сплавов, усталостные свойства и геометрические размеры обрабатываемых деталей, затрудняют внедрение данного метода полирования в технологию обработки лопаток компрессора ГТД.

Цель работы: разработать научные основы технологического обеспечения усталостной прочности и повышения качества поверхностного слоя лопаток компрессора ГТД из двухфазных титановых сплавов за счет финишной операции электролитно-плазменного полирования, направленной на устранение концентраторов напряжений и формирование профиля входной и выходной кромок пера.

Задачи исследования:

1. Исследовать механизм финишной обработки поверхностного слоя титановых сплавов методом электролитно-плазменного полирования и формализовать его в виде феноменологической модели.
2. Разработать состав рабочего электролита для финишной операции ЭПП титановых сплавов и экспериментально определить границы его применимости.
3. На образцах из титановых сплавов исследовать влияние финишной операции ЭПП в разработанном рабочем электролите на равномерность обработки, шероховатость поверхности и усталостную прочность.
4. Разработать усовершенствованную технологию производства лопаток компрессора ГТД из двухфазных титановых сплавов, включающую финишную операцию ЭПП, и показать повышение качества их поверхностного слоя и усталостной прочности.

Научная новизна:

1. Разработана феноменологическая модель электролитно-плазменного полирования титана и титановых сплавов в рабочих электролитах на основе водных растворов фторидов, отличающаяся учетом роли pH среды в формировании плавиковой кислоты (HF), необходимой для растворения оксидов титана, образующихся на обрабатываемой поверхности под действием окисляющей среды парогазовой оболочки и позволяющая установить требования к компонентному составу рабочего электролита.
2. Установлен состав рабочего электролита для финишной операции ЭПП титановых сплавов, включающий натрий фтористый, гидроксиламин

солянокислый и калий хлористый, отличающийся тем, что взаимосвязь между концентрациями его компонентов определена в виде экспериментально полученной математической модели, определяющей границу его применимости по уровню минимальной концентрации HF, равной 0,08 моль/л, что позволяет осуществлять его технологическую корректировку.

3. Установлено влияние длительности финишной операции ЭПП и глубины погружения образцов на качество поверхностного слоя, отличающееся учетом профиля парогазовой оболочки по глубине погружения детали, что позволяет сформулировать технологические рекомендации для устранения концентраторов напряжений и формирования профиля входной и выходной кромок пера. Также показано, что финишная операция ЭПП не приводит к снижению усталостной прочности конструктивно подобных образцов.

4. Разработана усовершенствованная технология производства лопаток компрессора ГТД из двухфазных титановых сплавов, отличающаяся применением финишной операции электролитно-плазменного полирования взамен ручного механического, в предложенном рабочем электролите с возможностью его корректировки, а также горизонтальным расположением лопатки при обработке в две стадии с поворотом на 180° после завершения половины расчётного времени ЭПП, что позволяет сформировать входные и выходные кромки пера, повысить качество поверхностного слоя и усталостную прочность лопаток.

Теоретическая значимость работы:

Теоретическая значимость работы состоит в развитии представлений о механизме ЭПП титана и двухфазных титановых сплавов во фторидсодержащих электролитах: установлена роль pH среды в формировании равновесной концентрации HF, определяющей условия растворения оксидных продуктов. Разработанная феноменологическая модель электролитно-плазменного полирования титана и титановых сплавов и разработанная математическая модель, устанавливающая границы применимости по уровню минимальной концентрации HF, позволяют технологам методически подходить к выбору составов рабочих электролитов на основе водных растворов фторидных солей и

поддержанию их работоспособности для обеспечения стабильно-высокого качества финишной операции ЭПП. Полученные зависимости, связывающие состав РЭ, режимы ЭПП, качество поверхностного слоя могут быть использованы при проектировании маршрутных технологических процессов, включающих финишную операцию ЭПП, для широкого круга деталей из двухфазных титановых сплавов.

Практическая значимость работы:

1. Установленная взаимосвязь рН среды фторидсодержащего РЭ, наличия оксидных пленок и следов избирательного травления межфазных границ на поверхности титана и двухфазных титановых сплавов позволила разработать 3-х компонентный состав РЭ на основе натрия фтористого, гидроксидов солянокислого и калия хлористого с высокими буферными свойствами, обеспечивающий отсутствие концентраторов напряжений после финишной операции ЭПП;

2. Установленная зависимость между концентрациями компонентов РЭ, а также соответствующее ей значение граничной концентрации HF, обеспечивающее электролитно-плазменное полирование титановых сплавов (без избирательного травления структурных составляющих и образования непрозрачных оксидных пленок), позволили разработать способ полирования деталей из титановых сплавов и технологические рекомендации по корректировке РЭ, используемые при серийной обработке лопаток компрессора ГТД в НПП «УАСТ» г. Уфа (патент РФ № 2552203);

3. Установленные закономерности изменения геометрических размеров обрабатываемых деталей в ходе финишной операции ЭПП, позволили разработать технологические рекомендации по расположению обрабатываемых лопаток в ванне ЭПП, обеспечивающие гарантированное формирование профиля входной и выходной кромок пера;

4. Установленные закономерности позволили разработать способ электролитно-плазменного полирования изделий из титановых и железоникелевых сплавов (патент РФ № 2706263), положенный в основу

усовершенствованной технологии производства лопаток компрессора ГТД из двухфазных титановых сплавов BT6 и BT8M-1, обеспечивающей снижение неравномерности съема материала с 5,0 до 1,6 мкм и параметра шероховатости поверхности с Ra 0,30 до Ra 0,10 мкм, а также, повышение предела выносливости с 363 ± 4 до 384 ± 4 МПа (на базе 2×10^7 циклов) по сравнению с серийной технологией ручного полирования.

Методология и методы исследования

Работа выполнена с использованием теоретических и экспериментальных методов исследования. Для решения поставленных задач использовались стандартные методы проведения исследований: оптическая металлография, растровая электронная микроскопия (РЭМ), рентгеноструктурный анализ (РСА), растровая электронная микроскопии (РЭМ), рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС). Усталостные испытания проводили на образцах и натурных лопатках на электродинамическом вибростенде. Измерение шероховатости поверхности проводили профилографическим методом. Обработку экспериментальных данных и теоретические расчеты производили с использованием программного обеспечения Excel и Maple.

Положения, выносимые на защиту:

1. Феноменологическая модель процесса ЭПП титана и титановых сплавов, формализующая механизм финишной обработки поверхностного слоя (соответствует п. 3 паспорта специальности);
2. Состав рабочего электролита для финишной операции ЭПП титановых сплавов (соответствует п. 4 паспорта специальности);
3. Результаты экспериментального исследования влияния финишной операции ЭПП на качество поверхностного слоя и усталостную прочность лопаток ГТД (соответствует п. 7 паспорта специальности);
4. Усовершенствованная технология производства лопаток компрессора ГТД из двухфазных титановых сплавов с применением финишной операции электролитно-плазменного полирования взамен ручного механического (соответствует п. 2 паспорта специальности).

Степень достоверности и апробация результатов

Степень достоверности результатов диссертационной работы обеспечивается согласованностью полученных экспериментальных данных с опубликованными результатами других исследователей; применением поверенного измерительного оборудования и стандартизованных методик измерения; большим количеством экспериментов и натурных испытаний, дающих значимые результаты; апробацией основных результатов работы через публикации в рецензируемых научных изданиях и представление на всероссийских и международных конференциях.

Результаты научных исследований представлены и обсуждены на Международной школе конференции «UUST Nanomaterials Days» (Уфа, 2026); IX Международном технологическом форуме «Инновации. Технологии. Производство» (Рыбинск, 2023); Международной научно-технической конференции «Климовские чтения – 2022: перспективные направления развития авиадвигателестроения» (Санкт-Петербург, 2022); 5th international conference «Recent trends in structural materials», (Pilsen, 2018); V Международной конференции «Электрохимические и электролитно-плазменные методы модификации металлических поверхностей» (Кострома, 2016); Научно-практической конференции, посвященной 80-летию вечернего факультета УГАТУ при УМПО «Интеграция науки, образования и высокотехнологичного производства как основной фактор инновационного развития» (Уфа, 2012).

Личный вклад автора заключается в формулировании цели и задач работы, проведении экспериментальных исследований и анализе полученных данных, выявлении и построении феноменологических и математических зависимостей, а также в обобщении полученных результатов для разработки технологического процесса.

Практическая реализация результатов работы

Результаты работы внедрены в ООО НПП «Уралавиаспецтехнология» и НПА «Технопарк АТ» для серийной обработки лопаток компрессора

направляющего аппарата ГТД из двухфазных титановых сплавов BT6 и BT8M-1 для ПАО «ОДК-УМПО».

Публикации

По теме диссертации опубликовано 14 научных работ, из них 3 статьи в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК РФ, 1 статья в рецензируемых журналах, включенных в базы данных Web of Science и/или Scopus, 2 патента РФ на изобретение, 8 публикаций в иных изданиях.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы из 123 наименования источников и 2 приложений. Работа содержит 145 страниц, включая 75 рисунков и 19 таблиц.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ ПЕРА ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА ГТД

1.1 Актуальность обеспечения низкой шероховатости поверхности

Лопатки компрессора являются одной из самых высоконагруженных деталей ГТД, а их геометрическая точность и состояние поверхностного слоя в значительной степени определяют надежность и ресурс работы двигателя в целом [1].

Анализ причин отказов авиационных двигателей по материалам Межгосударственного авиационного комитета и по данным Национального совета по безопасности транспорта (National Transportation Safety Board) показывает, что 21% от их общего числа приходится на прочностные отказы и повреждения. Основной причиной отказов по прочности указываются усталостные трещины на различных деталях двигателя, приводящие к их разрушению. Согласно тем же источникам, подавляющее большинство таких разрушений приходится на компрессорные и турбинные лопатки [2], что связано с высокими удельными нагрузками в процессе их работы. Согласно [3, 4, 5], усталостный характер разрушений является основным для лопаток ГТД.

Усталостный характер разрушения связан с постепенным накоплением дефектов, приводящих к возникновению и развитию микротрещин на поверхности, дальнейший рост которых может привести к обрыву пера лопатки [6]. Обрывы значительной части лопатки приводят к серьёзным повреждениям двигателя и требуют немедленной его остановки и снятия с эксплуатации [5]. Начало процесса разрушения с поверхности обусловлено более ранним, по сравнению с остальным объемом металла, накоплением в нем критической плотности дислокаций [7]. Наличие на поверхности рисок, забоин и других дефектов, являющихся концентраторами напряжений (вызывающих их локальное увеличение), облегчает и ускоряет процесс зарождения микротрещин, в результате чего отмечается снижение предела выносливости [8]. Авторы [9] установили, что присутствие зародыша трещины обуславливает возможность ее

развития уже при амплитуде напряжений, которая не превышает 10% от предела выносливости, зафиксированного для лопатки, не имеющей повреждений.

Усталостная прочность деталей во многом определяется качеством поверхностного слоя, а именно шероховатостью, физико-механическими характеристиками, включая наклеп и остаточные напряжения, формируемые в ходе всей технологической цепочки производства [6].

Влияние шероховатости на усталостные характеристики детально проанализировано в работах [3, 10, 8]. В работе [8] показано, что величина предела выносливости зависит от высоты неровностей, радиуса закругления впадин и выступов, угла наклона профиля и шага неровностей. Влияние указанных факторов на предел выносливости после механической обработки при изгибной нагрузке оценивается коэффициентом концентрации напряжений α_σ [8]:

$$\alpha_\sigma = 1 + 2\sqrt{\gamma \frac{Rz}{r}}; \quad (1)$$

где γ — коэффициент разгрузки, значение которого определяется отношением шага неровностей S к их высоте (Рисунок 1), Rz — это параметр высоты микронеровностей; а r — радиус кривизны, измеряемый по дну впадины.

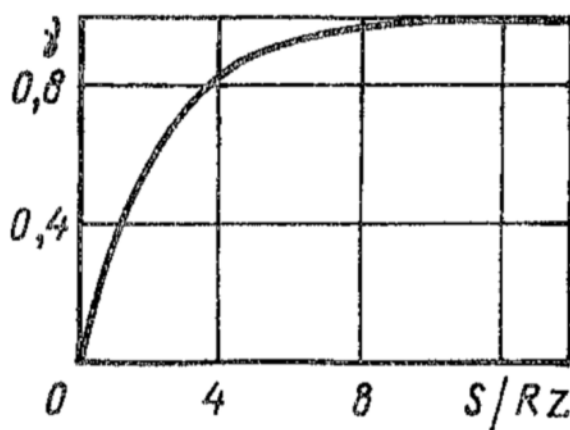


Рисунок 1 – Зависимость коэффициента разгрузки от соотношения S/Rz [8]

Для шлифованной поверхности со значением параметра Ra 0,32; 0,63; 1,25 мкм, численное значение коэффициента концентрации напряжений составляет 1,2; 1,24 и 1,48 соответственно [8]. При увеличении шероховатости с Ra 0,01 мкм

до значений 5,0; 1,2; 0,3 и 0,15 мкм сопротивление усталости, на базе 100 млн. циклов, для теплостойких сталей и жаропрочных сплавов, согласно [8], снижается на 24...20; 18...16,5; 14...12,5; 10...12 % соответственно. Кроме величины шероховатости, влияние на предел выносливости оказывает и направление микронеровностей, что также отражено в работе [8]: перпендикулярное к оси образца направление микронеровностей, в сравнении с продольным их направлением, снижает предел выносливости в 1,5 раза больше.

Увеличение предела выносливости лопаток из титанового сплава ВТ8 с 250 до 400 МПа, при снижении шероховатости поверхности пера с Ra 0,8 до Ra 0,2 мкм (Рисунок 2), показано в работе [10].

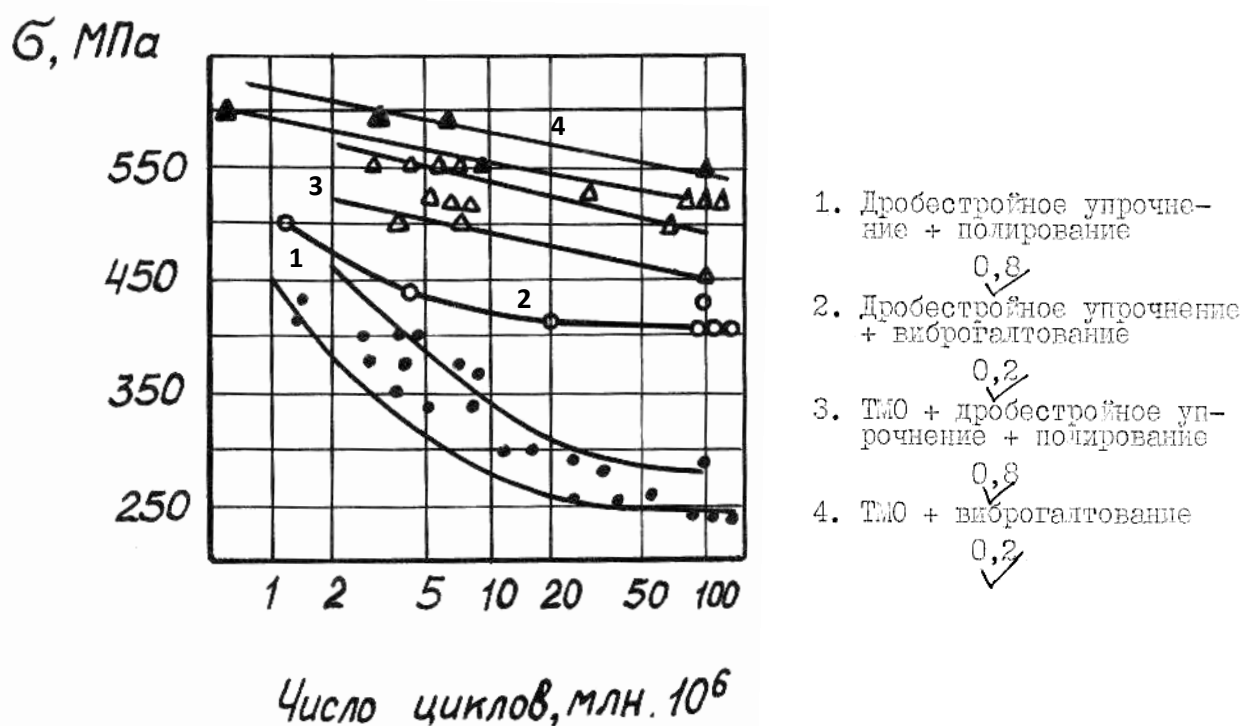


Рисунок 2 – Кривые выносливости сплава ВТ8 в зависимости от условий обработки [10]

Пример влияния последовательности операций механической обработки на предел выносливости показан в Таблице 1 [6].

Преимущественное негативное влияние микродефектов поверхности на усталостную прочность, в сравнении с влиянием газонасыщения поверхностного слоя и растягивающими остаточными напряжениями, формируемыми при

механическом полировании титановых сплавов войлочными кругами с абразивом, отмечено в работе [27].

Таблица 1 - Изменение предела выносливости сплава BT3-1 под влиянием различных методов механической обработки

Метод обработки	Шероховатость Ra, мкм	Предел выносливости σ_{-1} , МПа
Точение	2,5...5,0	310
Точение + шлифование	1,25	360
Точение + полирование	0,63	460
Точение + шлифование + полирование	0,32...0,16	480
Точение + шлифование + гидрогалтовка	0,32	480

Большое значение на усталостную прочность оказывает и месторасположение участков с высокой шероховатостью на пере лопатки. Наиболее опасными, с точки зрения усталостного разрушения, являются дефекты поверхности, расположенные в их прикорневом сечении, особенно с выходом на кромки, где возникают максимальные динамические напряжения при колебаниях лопатки по основному тону [11]. Примеры усталостного разрушения титановых лопаток компрессора, связанные с наличием рисок, выходящих на кромку и расположенных в опасном сечении, приведены в работе [3]. Автором показано, что на общем фоне шероховатости, соответствующим требованиям КД, в прикорневом сечении могут встречаться царапины глубиной до 20 мкм, и локальное повышение шероховатости со значения Ra 0,2 до Ra 0,8 мкм, которые явились причиной разрушения лопатки, представленной на Рисунке 3.

На Рисунке 4 представлена профилограмма участка поверхности лопатки компрессора из титанового сплава BT8M-1 после серийной обработки полировальными абразивными кругами. Показанная на профилограмме царапина, глубиной 4 мкм, не была обнаружена при визуальном контроле на общем фоне шероховатости с параметром Ra равным 0,4 мкм.

Одной из причин образования отмеченных дефектов на стадии изготовления является сложность обработки эластичными полировальными кругами криволинейных поверхностей, особенно в области перехода пера лопатки в полку хвостовика [12].

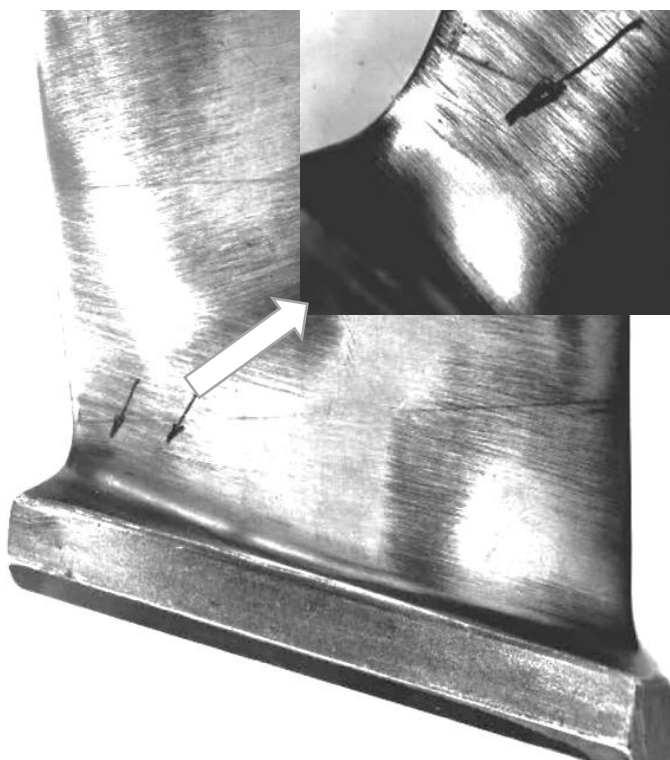


Рисунок 3 – Характер разрушения лопатки КНД из сплава ВТЗ-1 в процессе контрольных усталостных испытаний [3]

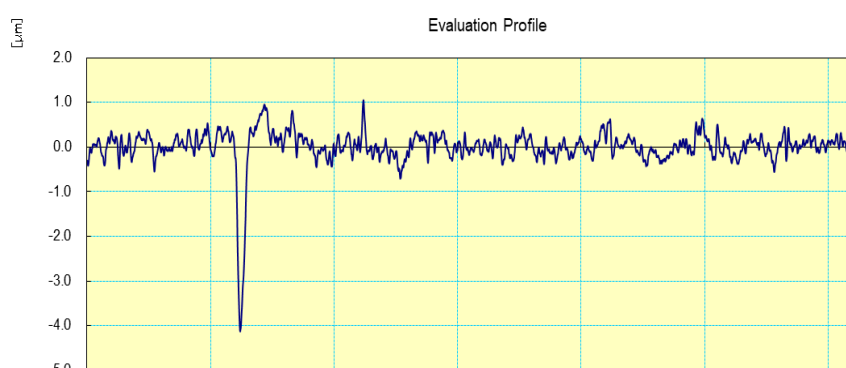


Рисунок 4 – Профилограмма участка поверхности лопатки с царапиной, имеющей глубину 4 мкм, при шероховатости поверхности $Ra\ 0,2\ \mu\text{m}$.

При обработке этого участка поверхности требуется использование нескольких полировальных кругов разного размера. Частая смена кругов

приводит к отвлечению внимания и накоплению усталости у полировщика, что повышает риск образования дефектов. В результате, этот участок пера лопатки обладает наибольшей шероховатостью [11]. Кроме того, на поверхности пера образуются участки с разнонаправленной шероховатостью, что затрудняет процесс контроля на отсутствие рисков от абразивных частиц или лезвийного инструмента. Проблему их обнаружения может осложнять пластическая деформация поверхности, в результате чего отдельные царапины могут оказаться под слоем деформированного металла.

Наряду с указанными дефектами, при ручном полировании эластичными абразивными кругами существует вероятность перегрева локальных участков поверхности, формирования огранки на кромках и подрезов, также негативно влияющих на усталостную прочность лопаток. Для уменьшения концентрации напряжений на входной и выходной кромке пера лопаток компрессора производят их закругление [13]. Согласно ОСТ 102571-86, наличие плоской площадки и острых кромок на радиусе входной кромки лопатки компрессора не допускается.

Приведенные зависимости убедительно показывают влияние шероховатости и наличия прочих концентраторов напряжений на поверхности лопаток компрессора ГТД на их усталостную прочность. Поэтому особую значимость приобретает обеспечение высокой чистоты поверхности на финишных операциях изготовления, особенно в условиях последующей ее защиты от эрозионного воздействия путем нанесения износостойких вакуумно-плазменных покрытий системы Ti-N, Ti-V-N [14], способствующих сохранению полученной шероховатости в течение длительного времени эксплуатации.

1.2 Оценка методов финишной обработки поверхности

Самыми трудоемкими и технологически сложными операциями в процессе выпуска лопаток компрессора ГТД считаются ручная доводка размеров профиля пера, с соблюдением точности 0,02...0,05 мм, и последующее полирование, с обеспечением шероховатости на уровне Ra 0,32...0,63 мкм, выполняемые на одном рабочем месте в два перехода. Хотя данный подход требует высоких

трудовых затрат, именно ручной метод полирования профиля остается наиболее востребованным в мировой практике [15]. Ручной метод отличается низкой производительностью и тяжелыми условиями труда, а также требует привлечения значительного числа высококвалифицированных специалистов. Качество обработки в значительной степени зависит от состояния полировальных кругов: используемого клеящего состава и степени подготовки зерна перед операцией накатки. У полировальных кругов режущей способностью обладает только одна треть абразивных зерен. Оставшаяся часть зерен оказывает в основном деформирующее воздействие [15].

Так как полировальные операции занимают значительную долю в общей трудоемкости работ при изготовлении лопаток ГТД [1], то актуальной является задача повышения их производительности и качества обработки.

Поставленная задача может быть достигнута совершенствованием используемых методов механического полирования [16, 17, 18] и применением альтернативных методов обработки поверхности, таких как виброполирование [19, 20], химическое или электрохимическое полирование [21, 22], одним из вариантов реализации которого является метод сухого электрополирования, осуществляемый при воздействии на обрабатываемую поверхность гранул, выполненных из анионитов, и пропитанных раствором электролита [23, 24].

Развитием методов механического полирования является полирование абразивными лентами. При нанесении на полирующую ленту абразивного зерна, сориентированного при помощи электростатического поля, доля режущих зерен повышается до 100 %. Это приводит к выравниванию механических нагрузок на обрабатываемую поверхность и уменьшению вероятности появления локальных царапин. Это, в свою очередь, снижает интенсивность нагрева обрабатываемой детали, что полностью исключает риск появления прижогов и возникновения остаточных напряжений [15]. В сравнении с полированием абразивными кругами, метод обладает большей производительностью и стабильностью параметров обработки, так как позволяет снизить долю ручного труда за счет

автоматизации процесса обработки. Однако, его не всегда удастся применить к деталям со сложной геометрией поверхности.

Для полирования некоторых видов деталей широко применяют виброабразивную обработку в барабанах с абразивным материалом. Обработку проводят сухим способом или с добавкой жидкой среды [25] для облегчения процесса удаления продуктов абразивного износа. Для достижения требуемой шероховатости обработку ведут в несколько переходов со сменой абразива на менее грубый. Данный метод обладает высокой производительностью, благодаря одновременной обработке большого количества деталей. Основным недостатком метода является сложность контроля процесса обработки.

Достаточно перспективным является отмеченный выше метод сухого электрополирования DryLyte, разработанный Испанской фирмой GPA Innova. Как отмечается на сайте производителя, данный метод позволяет обрабатывать практически все группы электропроводных материалов, добиваясь шероховатости порядка R_a 0,02 мкм. Однако, он обладает низкой производительностью, свойственной для электрохимических методов обработки. Время обработки данным методом может составлять от 40 до 60 минут. К недостаткам данного метода следует отнести так же и высокую стоимость полирующих растворов, состав которых авторами не раскрывается. Активные работы по разработке аналогичного метода обработки ведутся научным коллективом ФГБОУ ВО «УГАТУ», возглавляемым Криони Н.К. [26].

Альтернативой указанным методам полирования является метод электролитно-плазменного полирования (ЭПП) [27, 28, 29]. Этот метод лишен недостатков, присущих традиционным методам финишной обработки и широко используется при изготовлении деталей различного назначения [28, 29, 31]. Большой интерес к этому методу обработки, со стороны ведущих предприятий авиационного двигателестроения России, подтверждают соответствующие патенты на изобретения [32, 33, 34] и статьи в научных журналах [29].

Метод ЭПП позволяет производить полирование сложно-профильных деталей из электропроводных материалов без механического воздействия на

обрабатываемую поверхность, при этом, одновременно со снижением шероховатости, происходит скругление кромок, удаление газонасыщенного поверхностного слоя, обогащенного инородными включениями, исчезает направленная анизотропия, приобретенная в процессе механической обработки [35, 36], что должно благоприятно сказаться на величине предела выносливости. Однородная блестящая поверхность после ЭПП значительно облегчает выявление дефектов, образовавшихся на предыдущих операциях изготовления, что позволяет обеспечить стабильность качества поверхности. В сравнении с виброабразивной галтовкой и методом сухого электрополирования, продолжительность которых составляет от 1 до 8 часов [37, 38, 39], продолжительность обработки методом ЭПП составляет от 2 до 10 минут. Шероховатость поверхности в результате ЭПП снижается по экспоненциальному закону, что подтверждено для нержавеющей сталей и сплавов [40]. Величина шероховатости поверхности после ЭПП может достигать значений 0,02...0,05 мкм. Высокая производительность метода обеспечивается, в том числе, возможностью одновременной обработки нескольких деталей, количество которых определяется мощностью используемого технологического оборудования и площадью обрабатываемых деталей, исходя из средней плотности тока, равной 0,25...0,35 А/см².

Известные растворы для ЭПП титана (Таблица 4) не содержат концентрированных кислот и менее агрессивны, в отличие от растворов для химического (Таблица 3) и электрохимического полирования (Таблица 2), приготавливаемых, в основном, из концентрированных кислот [30].

Существенным преимуществом ЭПП перед процессом электрохимической полировки является большая точность, особенно при многоместной обработке [9]. Равномерность обработки деталей методом ЭПП практически не зависит от конфигурации катода и их расположения относительно стенок рабочей ванны. Средняя неравномерность величины съема металла с поверхности деталей при многоместной обработке методом электрохимического полирования более чем в три раза может превышать этот показатель для метода ЭПП.

Таблица 3 – Растворы химического полирования титановых сплавов

№ состава	Материалы	Хим. состав	Режимы обр.
№ 1 [44]	Нет уточнения	H ₂ O ₂ (30% p.p.) – 600 мл/л; HF (40% p.p.) – 80-100 мл/л; остальное вода	Нет информации
№.2 [45]	Нет уточнения	H ₂ SO ₄ -400 мл/л; HF-200 мл/л; HNO ₃ -400 мл/л	нет информации
№ 3 [46]	Титановые сплавы	H ₂ SiF ₆ (31% p-p) – 20 об.%; HF (48% p-p) – 15 об.%; HNO ₃ (70% p-p) - 45 об.%; CH ₃ COOH (99 % p.p.) – 10 об.%; H ₃ PO ₄ – 10 об.%	20...25 °C 15...45 мин
№. 4 [47]	BT6	HF (10 масс.%) +HNO ₃ (10 масс.%)	25 °C 7 мин
№ 5 [48]	BT1-0, BT6, OT4	HNO ₃ (конц.) – 25...30 об.%; HF (конц.) – 25...28 об.%; H ₂ SO ₄ (конц.) – 40...45 об.%; CH ₃ COOH (40% p.p.) – 2...5 об.%. H ₂ O – 10 об.%;	18...20 °C 2...3 сек.

Таблица 4 – Растворы для ЭПП титана

№ состава	Материалы	Хим. состав	Режимы обр.
№ 1 [28]	BT1-0	NH_4F – 4 %	260...300 В 90 °С 5 мин
№ 2 [49]	BT1-0 BT5	NH_4BF_4 Na_2SiF_6	1 этап: 90...190 В; 0,1...5 сек, 2 этап: 200...400 В; 80...85 °С
№ 3 [29]	BT6, BT8M-1	Соли плавиковой кислоты – 5мас.%	400 В
№ 4 [50]	BT6, BT8, BT18У	NH_4F , KF - общей концентрацией не более 7 вес.%	320...340 В 90 °С

1.3 Анализ физико-химических основ процесса ЭПП

Процесс ЭПП, называемый в отдельных источниках электроимпульсной полировкой [30, 31] относится к методам электро-физико-химической обработки и является частным случаем электролитно-плазменной обработки (ЭПО), наряду с процессами высокоскоростного электролитно-плазменного нагрева [51, 52], закалки [53], химико-термического модифицирования поверхностного слоя [54, 55, 56, 57], а также электролитно-плазменного оксидирования [58, 59, 60, 61]. Перечисленное многообразие видов ЭПО связано со значительным изменением физико-химических процессов, происходящих вблизи и непосредственно на обрабатываемой поверхности при варьировании технологических параметров обработки: величины напряжения и полярности потенциала, подаваемого на деталь, температуры и состава электролита.

В общем виде, реализация процессов ЭПО осуществляется погружением обрабатываемой детали в емкость с рабочим электролитом (РЭ) (Рисунок 5), при

этом один из полюсов источника питания подключается к обрабатываемой детали, а другой к электроду, погруженному в ту же емкость. В роли электрода часто выступают стенки емкости. Величина напряжения, подаваемого на деталь, составляет от 100 до 400 В. Способ подключения источника питания к обрабатываемой детали определяет анодный и катодный режимы ЭПО. Важным условием осуществления процесса обработки является неравенство площадей электродов: площадь обрабатываемой детали (активного электрода) должна быть меньше площади стенок ванны более чем в 2 раза.

Процесс ЭПП, согласно многочисленным литературным данным, реализуется в анодном режиме ЭПО: при напряжении 250...350 В, температуре электролита 70...90 °С и наличии в нем компонентов, способных образовывать растворимые комплексные соединения с химическими элементами, входящими в состав обрабатываемого материала. В этих условиях между электролитом и обрабатываемой поверхностью детали (анодом) формируется, так называемая, парогозовая оболочка (ПГО), физико-химические процессы внутри которой приводят к снижению шероховатости обрабатываемой поверхности.

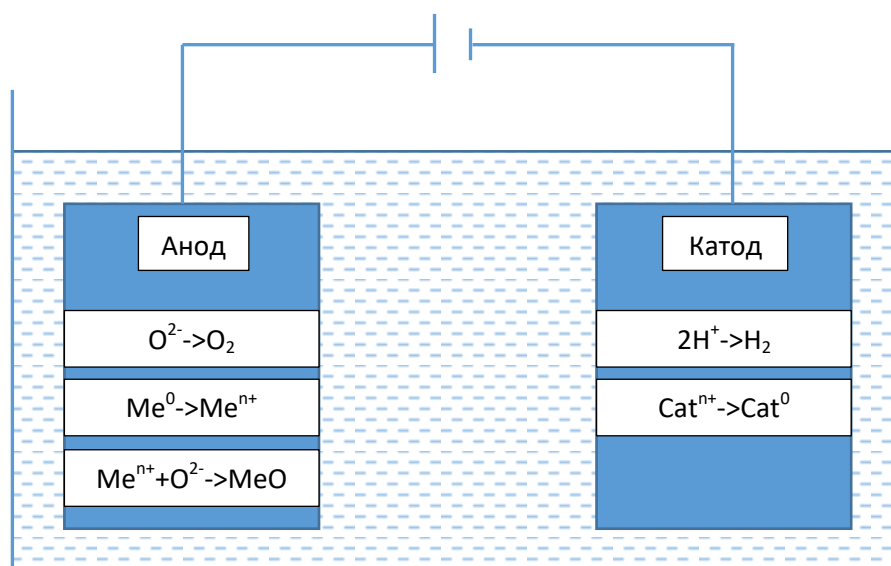


Рисунок 5 – Схема реализации процесса ЭПО в анодном режиме

Образование ПГО, вокруг обрабатываемой детали, обусловлено выделением электролизного газа, приводящим к уменьшению площади контакта РЭ с обрабатываемой поверхностью и вскипанием электролита на оставшихся

участках контакта в результате выделения Джоулева тепла [62]. Поддержанию ПГО способствует повышенный, относительно Фарадеевского, выход электролизного газа, отмеченный в ряде работ [62, 63]. Авторы [63] предполагают, что превышение Фарадеевского выхода при напряжении 250 В происходит из-за бомбардировки границы раздела ПГО-электролит энергичными электронами, в результате чего образуются дополнительные радикалы O_2 и OH . Образовавшаяся таким образом парогазовая оболочка обладает небольшой толщиной, порядка 140 мкм [30], и наибольшим сопротивлением в цепи электрического тока. Проведенные рядом исследователей оценки показывают, что напряженность электрического поля внутри ПГО может составлять $10^4 \dots 10^5$ В/см [30, 64, 65], что достаточно для ионизации паров электролита. Наличие ионизированных частиц в ПГО подтверждается визуально - наблюдаемым спектром свечения, возникающим в тонком слое электролита вокруг обрабатываемой детали. Кроме линий атомарного водорода, кислорода и OH радикалов, в спектрах свечения, наблюдается линии принадлежащие компонентам полирующих растворов [66].

При указанных для процесса ЭПП значениях температуры РЭ и напряжения, ПГО существует в так называемом электрогидродинамическом режиме [30, 31], обеспечивающем периодическое замыкание с высокой частотой поверхности анода и электролита. Температура обрабатываемой детали в указанных условиях близка к температуре электролита. Проходящий через ПГО ток, плотностью $0,25 \dots 0,30$ А/см², характеризуется небольшой пульсацией [67]. При понижении температуры электролита ниже 60°C электрогидродинамический режим существования ПГО нарушается и процесс ЭПП сменяется процессом электролитно-плазменного нагрева обрабатываемой детали вплоть до температуры 500...600 °C [68, 30]. Понижение напряжения ниже 200...250 В (в зависимости от состава и концентрации электролита) приводит к переходу ЭПО в так называемый коммутационный режим, характеризующий нестабильным протеканием тока с большими пульсациями [67]. При напряжении выше 350...400 В, появляется нестабильность вольтамперной характеристики, обработка

начинает протекать в электролитно-разрядном режиме. Переход между различными режимами ЭПО, с привязкой к температуре электролита, наглядно демонстрируется вольт-амперной и вольт-температурной характеристиками (Рисунок 6), представленными авторами работы [69].

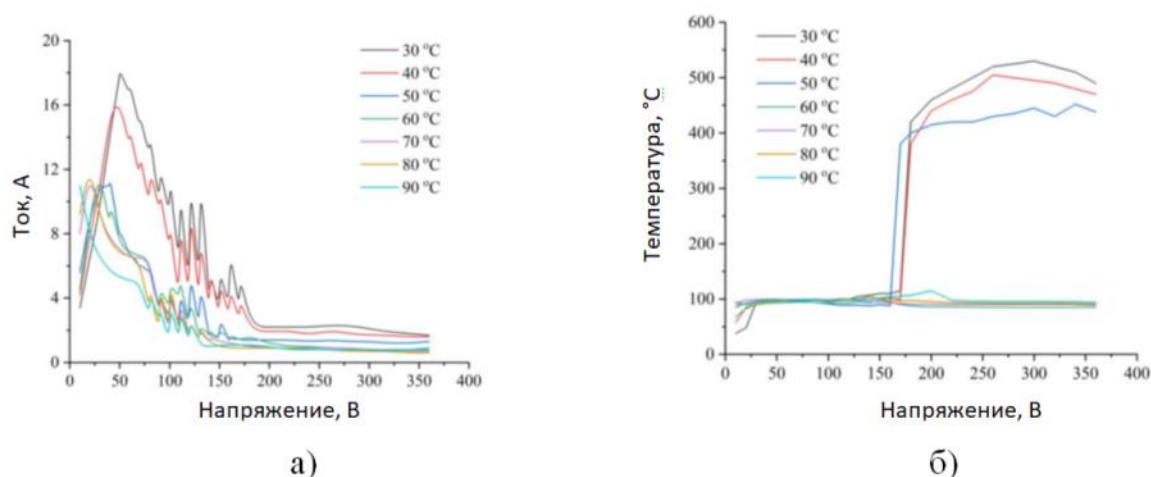


Рисунок 6 – Вольт-амперная (а) и вольт-температурная зависимости (б) процесса ЭПО для различных значений температуры раствора сульфата аммония [69]

1.3.1 Механизм воздействия на обрабатываемую поверхность при ЭПП

Несмотря на многочисленные исследования в области электролитно-плазменного полирования, его механизм до сих пор не имеет однозначного объяснения. Известные модели процесса предполагают эрозию искровыми разрядами выступающих элементов рельефа, являющихся концентраторами напряженности электрического поля, и электрохимическое растворение материала с поверхности и [70, 65]. Однако, как показано в работе [31], описанный выше механизм основан на неверном представлении о профиле поверхности в виде череды острых впадин и вершин. Ошибочность предложенной модели подтверждает отсутствие следов оплавления поверхности при ЭПП [67].

На основании множественных наблюдений за составом спектра излучения вокруг обрабатываемой детали, взаимного влияния напряжения, температуры и концентрации электролита на смещение границы начала процесса полирования, проведенных Парфеновым Е.В., Белкиным П.Н. и Кусмановым С.А. [71], показано, что все они хорошо объясняются известным механизмом

электрохимической полировки [72]. Выводы авторов подтверждаются, в том числе, отсутствием следов разрядных кратеров на обработанной поверхности. В подтверждение электрохимического механизма процесса растворения микронеровностей говорят результаты численного моделирования процесса ЭПП, проведенные авторами [73]. Предложенная модель достаточно хорошо предсказывает наблюдаемый экспериментально экспоненциальный характер снижения шероховатости. Отмеченное в работе [28] пропорциональное увеличение удельного съема материала с ростом плотности тока (Рисунок 7), также подтверждает гипотезу об электрохимическом механизме растворения обрабатываемой поверхности в процессе ЭПП. Важно отметить, что удельный выход по току при этом практически не меняется, что подтверждено исследованиями на конструкционных сталях [31].

О наличии дополнительного механизма растворения поверхности при ЭПП, кроме электрохимического, говорит значительное превышение 100 %-го выхода металла по току, обнаруженное авторами работы [74] для стали 20 в 2 %-ом растворе хлорида аммония. Авторы полагают, что выход по току, величиной 160%, обусловлен суммой электрохимического и химического механизмов растворения металла с поверхности, что возможно лишь при существовании периодических контактов электролита с обрабатываемой поверхностью.

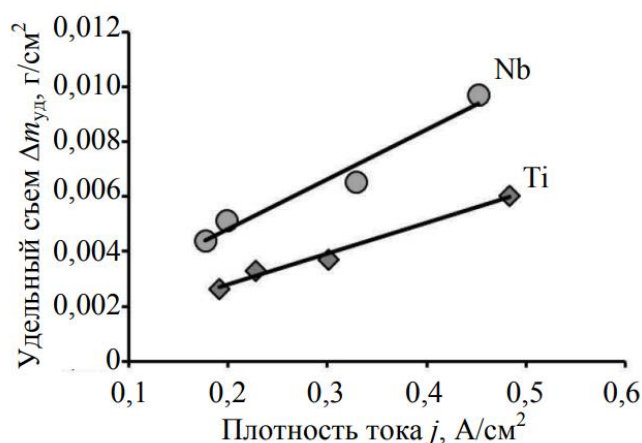


Рисунок 7 – Влияние плотности тока на удельный сьем металла с поверхности при ЭПП [28]

Наиболее вероятная модель процесса удаления материала с обрабатываемой поверхности предложена в работе [31, 75]. Данная модель предполагает, что ПГО существует в электрогидродинамическом режиме, для которого характерно периодическое возникновение электролитных мостиков, кратковременно замыкающих обрабатываемую поверхность и РЭ. Таким образом, обрабатываемая поверхность подвергается периодически сменяющемуся воздействию ПГО и РЭ, приводящими к его окислению и растворению образующихся окислов [76].

Подтверждением существования электролитных мостиков может служить предположение об их охлаждающем действии на обрабатываемую поверхность, выражающееся в резком снижении температуры анода при повышении температуры электролита в режим полирования (см. Рисунок 6, б). Потребление энергии при этом меняется незначительно, что видно из вольтамперной характеристики (см. Рисунок 6, а) [77]. Снижение переменной составляющей электрического тока, протекающего через ПГО, при увеличении напряжения в режиме полирования [75], также подтверждает данное предположение. Описанное явление объясняется авторами как уменьшение вероятности образования электролитных мостиков при наблюдаемом увеличении средней толщины ПГО. Также, авторы отмечают, что при увеличении напряжения от 235 до 300 В наблюдается увеличение амплитуды высокочастотной составляющей тока, что, по всей видимости, является следствием увеличения вклада электролитных мостиков в общую электропроводность ПГО.

Похожий механизм попеременного роста и растворения поверхностных пленок используется для объяснения процесса химического полирования [21, 44, 78], заключающегося в выравнивании скоростей образования и растворения тонкой оксидной пленки на поверхности металла.

1.3.2 Влияние температуры рабочего электролита и напряжения на кинетику растворения в процессе ЭПП

Согласно [66], начало процесса ЭПП соответствует состоянию, когда плотность тока достигает широкого минимума по отношению к напряжению.

Исследования, проведенные авторами [66], показали, что при обработке деталей из стали 20Х13 в растворе $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ с температурой 70...90 °С, электролитно-плазменное полирование осуществляется в диапазоне напряжений $U = 250...300$ В (электропроводность раствора в экспериментах составляла 66,7 мСм/см). Аналогичные результаты по определению области вольтамперной характеристики (ВАХ), соответствующей процессу эффективного электролитно-плазменного полирования, получены авторами [79] при полировании деталей из нержавеющей хромоникелевой аустенитной стали SUS304 (17,5 % хрома (Cr), от 8 % никеля (Ni)) в РЭ на основе сульфата аммония концентрацией 3 %.

Температура РЭ оказывает влияние сразу на несколько параметров процесса ЭПО. Она определяет режим теплообмена между ПГО, в которой происходит выделение тепла [65, 68], и обрабатываемой деталью; влияет на толщину и стабильность ПГО при заданном напряжении, оказывает влияние на величину его электропроводности и pH среды (Рисунок 8 [31]).

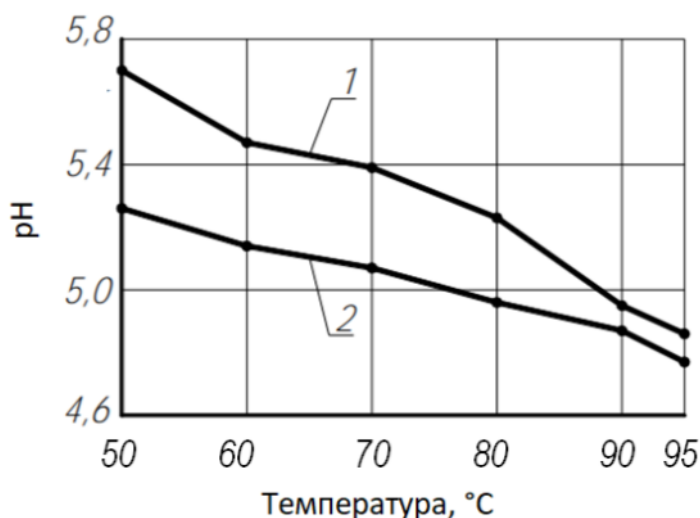


Рисунок 8 – Влияние температуры электролита на pH раствора: 1) – 2 масс.% хлорида аммония; 2) – 5 масс.% сульфата аммония [31]

Влияние величины напряжения и температуры РЭ на кинетику процесса ЭПП, на примере удаления алюминидного покрытия в растворе фосфата аммония 2-х замещенного и полирования аустенитной нержавеющей стали AISI304, представлено в работах [80, 81]. Увеличение любого из указанных параметров приводит к уменьшению плотности тока (Рисунок 9, б) и скорости растворения

поверхностного слоя (Рисунок 9, а) ввиду увеличения толщины ПГО и соответствующего уменьшения вероятности контакта РЭ с обрабатываемой поверхностью. Это является подтверждением моделей процесса ЭПП, в основе которых лежит химическое растворение поверхности. Аналогичная картина наблюдается при ЭПП титанового сплава ВТ1-0 в работе [29] в РЭ на основе фторида аммония.

Наиболее вероятный механизм увеличения толщины ПГО, описанный выше, авторы работы [81] связывают с увеличением количества пара, выделяемого на обрабатываемой поверхности в единицу времени при увеличении напряжения обработки и повышении температуры РЭ, что следует из уравнения теплового баланса приведенного авторами. Увеличение скорости растворения материала поверхностного слоя при этом объясняется как увеличение периодов (единичных актов) воздействия РЭ на обрабатываемую деталь в местах критического утонения ПГО, вероятность которых увеличивается с уменьшением ее толщины. Аналогичное объяснение указанной зависимости приводится авторами [31, 71].

Еще одним следствием увеличения температуры РЭ является снижение величины критического напряжения, при котором происходит смена режимов ЭПО (см. Рисунок 6, б), что связывается с уменьшением локальной мощности, требуемой для вскипания РЭ [68].

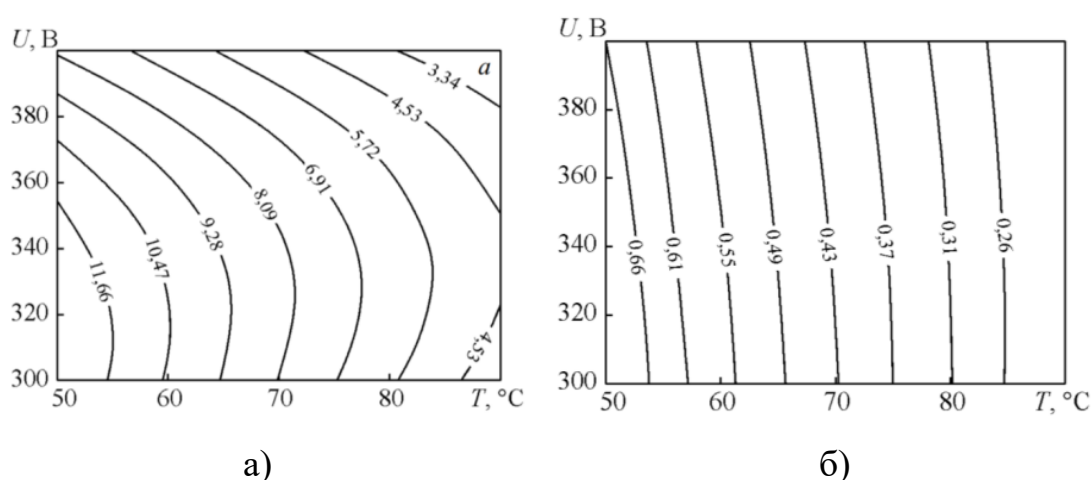


Рисунок 9 – Диаграммы влияния температуры и напряжения при ЭПП: а) на скорость растворения алюминидного покрытия ($\text{г/м}^2\text{мин}$), б) на анодную плотность тока (А/см^2) [80]

1.3.3 Влияние химического состава РЭ на процесс растворения поверхностного слоя в процессе ЭПП

Как показал проведенный выше анализ научных публикаций, процесс ЭПП, для всех обрабатываемых данным методом материалов, осуществляется в интервале напряжений 270...290 В, температуре электролита 80...90 °С и его электропроводности в интервале и 60...80 мСм/см. Конкретное значение приведенных параметров в указанном диапазоне не оказывает значительного влияния на процесс ЭПП поверхности, эффект проявляется лишь в незначительном изменении скорости процесса обработки. Компонентный состав РЭ, напротив, не является универсальным и для различных обрабатываемых материалов может отличаться значительно (Таблица 5). В большинстве случаев он подбирается опытным путем [31, 82], с последующей оптимизацией концентрации компонентов по критерию максимального снижения шероховатости, при минимальной потере массы полируемой детали, и по критерию повышения скорости обработки. С целью расширения области применения известных РЭ и улучшения показателей качества обработки поверхности, в их состав часто вводят вещества, изменяющие кинематическую вязкость и коэффициент поверхностного натяжения [30]. Чаще всего с этой целью используют триэтаноламин, глицерин, сорбитол и другие.

Таблица 5 – Наиболее распространенные растворы для ЭПП

№ раствора	Обрабатываемые материалы	Компоненты
Раствор 1 [83, 30]	Сталь 10, 20	NH_4Cl – 2 %
Раствор 2 [83, 84, 31]	20Х13, 12Х18Н10Т, 40Х13, ЭП866,	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ – 5...6 %
Раствор 3 [30]	Сталь 65Г	NH_4Cl – 3 % NH_4F – 0,1 %
Раствор 4 [30]	Медь, латунь Л62	Трилон Б – 4 % $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ – 0,5 %
Раствор 5 [30]	Алюминий и его сплавы	FeCl_3 – 0,5...3 %

Как видно из Таблицы 5, основу большинства РЭ составляют ион аммония, цитрат или оксалат ионы. Эти вещества образуют с катионами обрабатываемого металла комплексные соединения, легко растворимые в воде [31].

Согласно исследованиям [31,75] растворение материала поверхностного слоя при ЭПП происходит через адсорбирование на ней анионов раствора $A_{\text{водн}}^-$, гидроксил-ионов OH^- или молекул воды с последующим образованием твердой однофазной солевой пленки $Me|MeA_{n+1}^-_{\text{адс}}$. Далее, солевая пленка переходит в раствор в виде адсорбционного комплекса $MeA_{n+1}^-_{\text{адс}}$ и распадается на простые ионы.

Условием полирования при описанном механизме растворения поверхности является равенство скоростей растворения и образования солевой пленки [31]. В некоторых источниках условием полирования поверхности называется выравнивание скоростей пассивации и растворения образующихся окислов [82, 85].

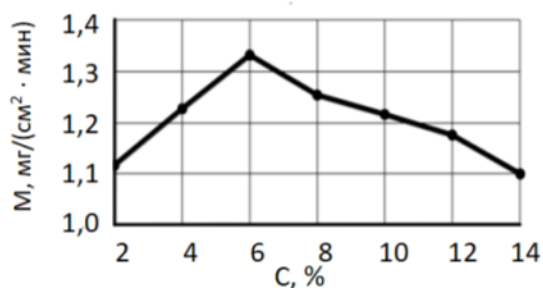
Важным моментом при разработке растворов ЭПП является обеспечение равномерного растворения поверхностного слоя. С этой целью при полировании нержавеющей сталей и сплавов на никелевой основе используют двухкомпонентные растворы. Повышение равномерности обработки методом ЭПП нержавеющей стали 20Х13, благодаря добавке лимонной кислоты в раствор на основе сульфата аммония показано в работе [75, 31]. Лимонная кислота в данном электролите способствует растворению оксидов и гидроксидов железа, хрома и никеля посредством образования водорастворимых комплексов. Авторами показано, что наряду с увеличением однородности обработанной поверхности, происходит увеличение удельного съема металла в 2,5...5,6 раз и обеспечивается повышение скорости снижения ее шероховатости.

Учитывая, что обработка методом ЭПП осуществляется при температурах РЭ 80...90 °С, возникают дополнительные требования к термической устойчивости компонентов, что отмечено в работе [30].

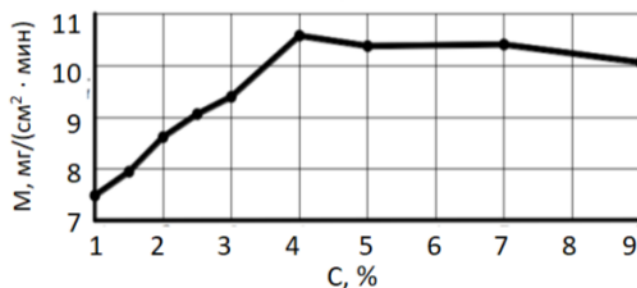
1.3.4 Зависимость характеристик ЭПП от концентрации компонентов рабочего электролита

Концентрация компонентов РЭ влияет как кинетику процесса растворения обрабатываемой поверхности, так и на качественное изменение химических и электрохимических процессов, протекающих на обрабатываемой поверхности. Связь кинетики процесса растворения с концентрацией рабочего электролита детально проработан лишь для ЭПП нержавеющей и конструкционных сталей. Легкость образования нестабильных поверхностных адсорбционных комплексов $Fe(H_2O)_{адс}Cl_{адс}^-$ и $Fe(H_2O)_{адс}SO_4^{2-}_{адс}$ в водных растворах сульфата аммония или хлорида аммония служит основным фактором, обуславливающим увеличение скорости растворения поверхностного слоя при увеличении их концентрации до определенного уровня (Рисунок 10) [31]. Замедление растворения железа при дальнейшем увеличении концентрации компонентов в кислых средах обусловлено блокировкой активных центров анодной поверхности вследствие формирования прочных адсорбционных комплексов $FeCl_{адс}^-$ и $FeSO_4^{2-}_{адс}$, образование которых становится возможным благодаря активному вытеснению хлорид- и сульфат-ионами адсорбированных молекул воды.

Кроме отмеченного выше влияния концентрации компонентов РЭ на кинетику процесса анодного растворения, она определяет электропроводность РЭ. Влияние электропроводности РЭ на процесс ЭПП нержавеющей сталей исследовано достаточно подробно. Известно, что растворы для ЭПП должны обладать высокой электропроводностью, порядка 50...60 мСм/см [30,31], с целью поддержания стабильной ПГО, за счет выделения достаточного количества энергии в прианодной области [54]. При указанных значениях электропроводности величина падения напряжения на РЭ пренебрежимо мала по сравнению с величиной падения напряжения на ПГО [31].



а)



б)

Рисунок 10 – Влияние концентрации РЭ на величину удельного съема металла: а) сталь 20Х13 в сульфате аммония, б) сталь 20 в хлориде аммония [31]

1.4 Анализ применения ЭПП для обработки титановых сплавов

Не смотря на наличие информации по растворам для ЭПП титана, большинство из них предназначено для обработки чистого титана или однофазных титановых сплавов (см. Таблица 4). Пример получения поверхности с зеркальным блеском после ЭПП на образце из сплава ВТ1-0 (Рисунок 11) показан в работе [28]. Авторами отмечено, что после обработки образцов в растворе 4 % фтористого натрия, имеющего температуру 90 °С, шероховатость поверхности значительно снижается, однако, глубокие царапины от режущего инструмента полностью не удаляются, плотность тока при этом на 20 % больше, чем при полировании нержавеющей сталей.

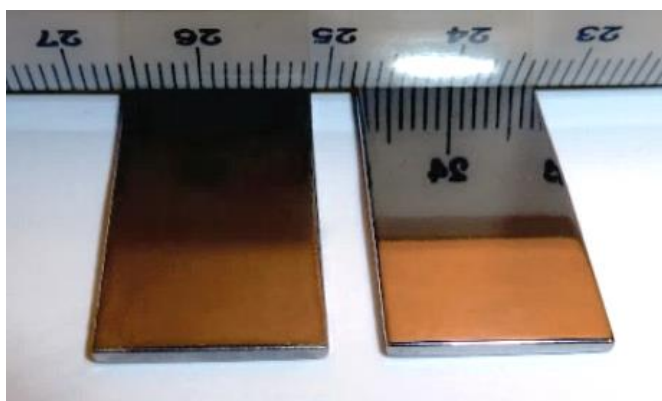


Рисунок 11 – Внешний вид образцов сплава ВТ1-0 (Grade 2) до (слева) и после (справа) электролитно-плазменного полирования [28]

При увеличении напряжения и температуры электролита наблюдается уменьшение плотности тока (Рисунок 12, а) и величины удельного съема металла

с поверхности (Рисунок 12, б). Снижения качества поверхности при увеличении напряжения авторами не отмечено. Характер динамики изменения шероховатости для титанового сплава ВТ1-0 аналогичен такой же зависимости для нержавеющей и конструкционных сталей (Рисунок 13).

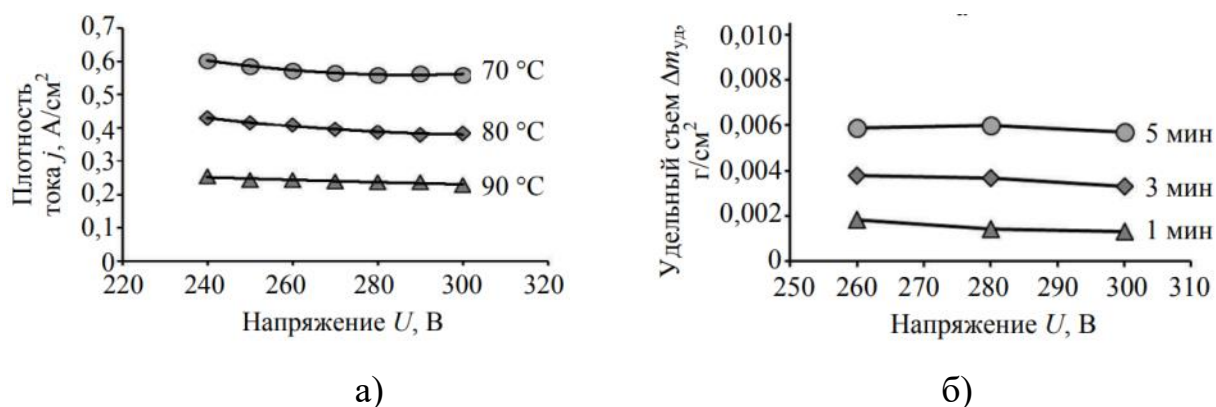


Рисунок 12 – Влияние режимов ЭПП титанового сплава ВТ1-0: а) на плотность тока, б) на величину удельного съема материала с поверхности [28]

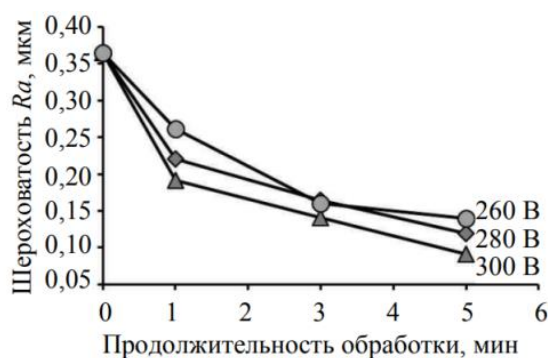


Рисунок 13 – Влияние режимов ЭПП титанового сплава ВТ1-0 на шероховатость [28]

Пример использования ЭПП на двухфазных титановых сплавах ВТ6 и ВТ8М-1 приведен в работе [29], опубликованной ФГУП «ВИАМ». Показано, что в растворе соли плавиковой кислоты, концентрацией не более 5 % (по массе), наблюдается сглаживание микрорельефа поверхности и притупление острых кромок. Внешний вид обработанных образцов представлен на Рисунке 14. На приведенном рисунке видно, что поверхность после ЭПП не имеет зеркального блеска, наблюдаемого на фотографиях образцов из сплава ВТ1-0 (см. Рисунок 11), приведенных в работе [28]. Согласно данным, приведенным в [28] и [29], величина удельного съема металла с поверхности для сплавов ВТ1-0 и ВТ6 имеет

один порядок и составляет, соответственно, 2,0 мг/(см²·мин) и 2,4 мг/(см²·мин). Скорости полирования для сплава ВТ6 и ВТ8М-1, полученные авторами [29] приведены в Таблице 6.

Таблица 6 – Характеристики процесса полирования титановых сплавов

Сплав	Удельный съем металла, мг/(см ² ·мин)	Скорость растворения, мкм/мин
ВТ6	2,4	5,4
ВТ8М-1	1,5	3,4

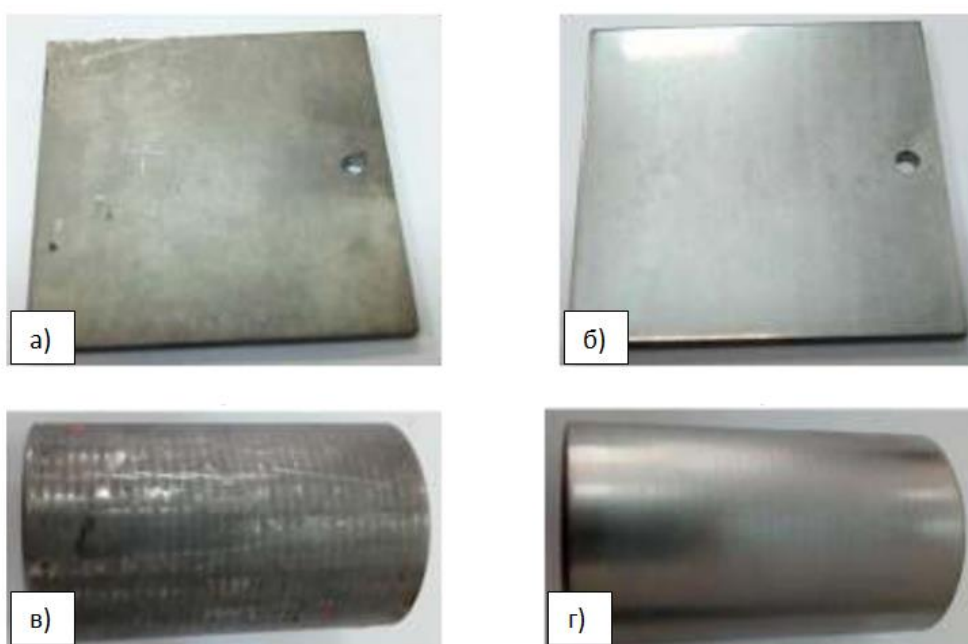


Рисунок 14 - Внешний вид образцов из сплава ВТ6 (а, б) и сплава ВТ8М-1 (в, г) до и после ЭПП соответственно [29]

Авторами [29] определено, что величина параметра шероховатости R_a на образце из сплава ВТ6 снижается со значения 0,83 до 0,39 мкм в течение 7 мин, для сплава ВТ8М-1 с 1,84 до 1,19 мкм за 6 мин, соответственно. Также, в статье приведены качественные зависимости скорости полирования от напряжения обработки, температуры и концентрации электролита. Вместе с тем, влияние ЭПП на микроструктуру и химический состав поверхностного слоя, а также на механические свойства обработанных образцов, авторами не исследовалось.

1.5 Постановка задачи

Анализ литературных данных, в том числе статистической информации Межгосударственного авиационного комитета и Национального совета по безопасности транспорта показал, что усталостные разрушения лопаток компрессора являются одной из наиболее частых и опасных причин отказов ГТД. Значительный вклад в снижение усталостной прочности лопаток ГТД вносят поверхностные концентраторы напряжений, формируемые как при эксплуатации, так и в процессе изготовления деталей двигателя в связи с несовершенством применяемой технологии или ее нарушением. Связь усталостной прочности с микрогеометрией поверхности подтверждена многочисленными исследованиями. Показано, что большинство применяемых методов финишной обработки поверхности не способны обеспечить стабильность качества обработки, особенно в условиях усложнения геометрии пера лопаток и сокращения сроков обработки. В процессе полирования абразивными полировальными кругами на поверхности неизбежно остаются царапины, в том числе и достаточно глубокие, обнаружение которых представляет определенную сложность. В контексте вышеизложенного приобретает значимость вопрос поиска высокопроизводительных методов финишной обработки, способных обеспечить снижение шероховатости без воздействия абразивных частиц и обеспечивающих высокую стабильность качества обработки. На основании анализа достоинств и недостатков различных методов финишной обработки, в том числе – химического, электрохимического и виброабразивного полирования, метода сухого электрополирования и электролитно-плазменного полирования, показана перспективность последнего, что подтверждается большим интересом к этому методу обработки со стороны предприятий отечественного авиадвигателестроения. Анализ режимов ЭПП для широкого круга металлов и сплавов показал, что определяющее значение для получения качественной полированной поверхности на конкретном материале имеет состав РЭ, тогда как его температура и электропроводность, а также напряжение обработки для всех материалов лежат в интервале 80...90 °С, 60...80

мСм/см и 270...300 В, соответственно. Изменение параметров обработки в указанных интервалах влияет лишь на скорость процесса полирования. Анализ научной и патентной литературы показал, что большинство существующих РЭ для ЭПП, содержащих в качестве основного компонента фторид ионы, предназначено для обработки чистого титана или однофазных титановых сплавов. ЭПП двухфазных титановых сплавов ВТ6 и ВТ8М-1 в этих РЭ приводит к снижению шероховатости обрабатываемой поверхности, однако информация по качеству обработанной поверхности в литературе отсутствует.

На основании вышеизложенного были сформулированы следующие цель и задачи исследования:

Цель работы

Разработать научные основы технологического обеспечения усталостной прочности и повышения качества поверхностного слоя лопаток компрессора ГТД из двухфазных титановых сплавов за счет финишной операции электролитно-плазменного полирования, направленной на устранение концентраторов напряжений и формирование профиля входной и выходной кромок пера.

Задачи исследования

1. Исследовать механизм финишной обработки поверхностного слоя титановых сплавов методом электролитно-плазменного полирования и формализовать его в виде феноменологической модели.
2. Разработать состав рабочего электролита для финишной операции ЭПП титановых сплавов и экспериментально определить границы его применимости.
3. На образцах из титановых сплавов исследовать влияние финишной операции ЭПП в разработанном рабочем электролите на равномерность обработки, шероховатость поверхности и усталостную прочность.
4. Разработать усовершенствованную технологию производства лопаток компрессора ГТД из двухфазных титановых сплавов, включающую финишную

операцию ЭПП, и показать повышение качества их поверхностного слоя и усталостной прочности.

ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1 Материалы, принятые для исследования

Исследования проводили на прямоугольных образцах размером 25x15x4 мм из двухфазного титанового сплава ВТ6. Листовой материал для изготовления образцов был подвергнут старению при температуре 550 ± 10 °С в течении 2 часов [86, 76]. Поверхность образцов полировали войлочными кругами с абразивной пастой до шероховатости Ra 0,60...0,80 мкм и промывали в ультразвуковой ванне с использованием моющего средства Алмико-Грин [113].

2.2 Методика приготовления растворов

Приготовление растворов проводили при температуре окружающего воздуха 24 ± 1 °С. Для этого использовали химические реактивы степени чистоты ЧДА и дистиллированную воду температурой 24 ± 1 °С. Дозирование жидких компонентов осуществляли с использованием мерной посуды 1-го и 2-го класса точности. Взвешивание компонентов электролита производили на лабораторных весах с дискретностью измерения 0,001 г.

Для обеспечения высокой точности дозирования компонентов при приготовлении экспериментальных полирующих растворов использовали их концентрированные растворы:

- раствор фторида натрия концентрацией 39 г/л;
- раствор гидроксиламина солянокислого концентрацией 400 г/л.

В колбу объемом 1 л наливали требуемое количество концентратов фторида натрия и гидроксиламина солянокислого, используя бюретки, после чего доливали дистиллированную воду. После этого раствор переливали в пластиковый стакан с широким горлышком. Добавку хлорида калия производили в последнюю очередь в виде сухого порошка до достижения электролитом электропроводности 70 мСм/см. Измерение электропроводности производили при

постоянном перемешивании раствора при помощи магнитной мешалки. После приготовления электролита производили измерение его pH среды.

2.3 Методика измерения параметров рабочих электролитов

Приготовление растворов и измерение их параметров проводили при температуре окружающего воздуха 24 ± 1 °С.

Измерение электропроводности рабочих электролитов производили с использованием иономера-кондуктометра лабораторного АНИОН-4154, оснащенного комбинированным датчиком измерения удельной электропроводности (УЭП) и температуры ДКВ 1, с диапазоном измерения УЭП 0,001...100 мСм/см и погрешностью измерения ± 2 %.

pH среды измеряли pH-метром М400 РА оснащенным промышленным цифровым pH-электродом InPro4262i/SG/120. Данный тип электрода может использоваться в технологических средах со следующими значениями концентрации фтористоводородной кислоты при 20 °С:

pH 2 при HF<300 ppm

pH 3 при HF<1000 ppm

pH 4 при HF<6000 ppm

При pH>5 концентрация F-ионов значения не имеет.

Диапазон измерения pH-электрода 0...14 pH. Диапазон рабочих температур 0 ... 130 °С.

2.4 Экспериментальная установка

Электролитно-плазменную обработку образцов производили на установке ЕРР-50ЕМ (Рисунок 15), обеспечивающей выпрямленное напряжение величиной 290В и максимальную величину рабочего тока 100 А. Обработка образцов производили с использованием экспериментальной ячейки объемом 1000 мл, снабженной катодом из нержавеющей стали.

Напряжение на образец подавали до начала погружения в электролит. Подъем образца производили по срабатыванию встроенного таймера, после чего образец сразу же промывали водой и протирали салфеткой из бязи.

Температуру электролита в экспериментальной ячейке поддерживали жидкостным термостатом Termex BT3.



Рисунок 15 – Внешний вид опытно-экспериментальной установки ЕРР-50ЕМ:
1 - пульт управления, 2 - рабочий модуль, 3 - источник питания, 4 - емкость для хранения и нагрева электролита

2.5 Методика предварительной оценки качества поверхности после электролитно-плазменной обработки

Предварительную оценку качества поверхности после электролитно-плазменной обработки, с целью обнаружения соотношения концентрации компонентов, обеспечивающих эффект полирования, проводили при освещенности рабочего места в соответствии с ГОСТ Р 55710-2013 для операции контроля при металлообработке по 4-х бальной шкале [76]:

- 1 балл – темная пленка на всей поверхности,
- 3 балла – зеркальный блеск на отдельных участках плоских поверхностей,
- 3 балла – зеркальный блеск на всех поверхностях кроме кромок,
- 4 балла – зеркальный блеск по всей поверхности.

2.6 Методика определения микротвердости поверхности

Оценку микротвердости проводили методом восстановленного отпечатка, в соответствии с ГОСТ 9450-85 «Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников». Нанесение отпечатка производили на микротвердомере ПМТ-3 с помощью алмазного наконечника, в виде четырехгранной пирамиды с квадратным основанием и углом при вершине 136° . Нагрузку выбирали в интервале от 10 до 100 г, время выдержки 15 сек. Измерение значения числа микротвердости (HV) производили с использованием микроскопа Nikon A100 и программно-аппаратного комплекса Thixomet PRO.

В качестве величины микротвердости (HV) принимали среднее арифметическое значение по 5 отпечаткам, выполненным непосредственно на исследуемой поверхности, с указанием оценки погрешности среднего арифметического. Расстояние между отпечатками брали равными не менее двух диаметров отпечатка.

Перед проведением измерений, шероховатость исследуемой поверхности, не проходившей обработку методом ЭПП, доводили до значения R_a не менее 0,2 мкм. Для этого использовали наждачную бумагу со значением зернистости P1000.

2.7 Методика определения шероховатости (микрогеометрии) поверхности

Оценку шероховатости проводили по стандартной методике в соответствии ГОСТ 25142-82 «Шероховатость поверхности. Термины и определения», ГОСТ 27964-88 «Измерение параметров шероховатости. Термины и определения» и ГОСТ 2789-73 «Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики».

Для оценки шероховатости после различных методов обработки использовали величину среднеарифметического отклонения профиля (y) от средней линии – R_a , сумму средних абсолютных значений высот десяти наибольших выступов профиля (y_p) и глубин наибольших впадин профиля (y_v) в

пределах базовой длины – Rz и среднего квадратичного наклона профиля Δq на базовой длине l :

$$Ra = \frac{1}{n} \sum_1^n |y|; \quad (2)$$

$$Rz = \frac{\sum_1^{10} |y_p| + \sum_1^{10} |y_v|}{10}; \quad (3)$$

$$\Delta q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 dx}. \quad (4)$$

Необходимость измерения параметра Δq обусловлена тем, что в отличие от высотных параметров Ra и Rz , он дает информацию о структуре шероховатости [31].

Для количественной характеристики снижения шероховатости применяли показатель относительного сглаживания ΔRa , расчет которого производится по формуле:

$$\Delta Ra = \frac{Ra_{исх} - Ra_{кон}}{Ra_{исх}} \cdot 100\%; \quad (5)$$

где $Ra_{исх}$ и $Ra_{кон}$ — показатели шероховатости исходной и обработанной поверхности, измеряемые в микрометрах.

Для измерения использовали профилометр Mitutoyo SJ-210, имеющий встроенное программное обеспечение, позволяющее рассчитывать параметры шероховатости в соответствии с ISO1997. Предел допускаемой основной систематической погрешности прибора 5 %. Радиус измерительного щупа прибора – 2 мкм, угол при вершине – 60 °.

Измерение проводили непосредственно на исследуемой поверхности в направлении, перпендикулярном направлениям неровностей. В качестве результата измерения шероховатости принимали среднее арифметическое по 5-ти последовательным измерениям. Для измеряемого диапазона Ra 0,025...0,4 мкм, в соответствии с ГОСТ 2789-73, базовая длина составляла 0,25 мм. Тип фильтра исходного сигнала - Гауссов.

2.8 Методика оценки морфологии и элементного состава поверхности

Для изучения морфологии и элементного состава поверхности применяли растровый электронный микроскоп JEOL-6490VL с рентгеновским микроанализатором Oxford Instruments. Изображения получали во вторичных электронах, при ускоряющем напряжении от 15 до 21 кВ. При элементном анализе ток зонда составлял от 1,5 до 2,0 мА. Элементный состав поверхности определяли, как по точкам, так и с площади, равной примерно 1 мкм².

Для анализа морфологии поверхности также использовали инвертированный оптический микроскоп Nikon с диапазоном увеличения x50-x1000. Для обработки изображений с микроскопа использовали программно-аппаратный комплекс Thixomet.

2.9 Методика исследования фазового состава

Исследование фазового состава поверхностного слоя, количественную оценку параметра решетки, размеров областей когерентного рассеяния и среднеквадратических микроискажений проводили методом фазового рентгеноструктурного анализа (РСА) с использованием рентгеновского дифрактометра Rigaku Ultima IV. Съемка проводилась в отраженных лучах при использовании Cu K α -излучения (40 кВ, 30 мА). Межплоскостные расстояния вычисляли, принимая $\lambda_{K\alpha 1} = 1,540600 \text{ \AA}$. Шаг сканирования при регистрации рентгенограмм составлял 0,02°, экспозиция в каждой точке — 2 с.

Фазовый анализ проводили по величине межплоскостных расстояний на обзорных дифрактограммах, снятых в диапазоне Брегговских углов 2θ от 30 ° до 90 °. Для расчета межплоскостных расстояний использовали формулу Вульфа-Брегга [90]:

$$n\lambda = 2d \cdot \sin \theta \quad (6)$$

где d - межплоскостное расстояние для данной отражающей плоскости, $\text{\AA}$;

λ - длина волны используемого излучения, $\text{\AA}$;

θ - угол отражения рентгеновских лучей, град;

n - порядок отражения.

Количественную оценку параметра решетки, размеров областей когерентного рассеяния, среднеквадратических микроискажений, проводили с использованием программного пакета PDWin методом Ритфеля (НПП «Буревестник», г. Санкт - Петербург). Плотность дислокаций ρ рассчитывали согласно методике [87].

2.10 Методика усталостных испытаний

Оценку среднего значения предела выносливости для заданной базы испытаний проводили методом «лестницы» (без построения кривой усталости) по ОСТ 1 00870–77 «Лопатки газотурбинных двигателей». Суммарная погрешность нагружения при испытании образцов составляла $\pm 1\%$.

Испытания по данному методу начинают на уровне ожидаемого предела выносливости σ_0 и поднимают или опускают на величину $\Delta\sigma$, если образец не разрушится или разрушится, соответственно.

Для анализа используют события (количество разрушений или не разрушений образцов) с меньшей частотой проявления.

Оценку величины среднего значения предела выносливости выполняют по формуле:

$$\overline{\sigma}_{-1} = \sigma_0 + \Delta\sigma \left(\frac{\sum_{i=0}^k i \cdot n_i}{N} \pm 0,5 \right) \quad (7)$$

где σ_0 — минимальная амплитуда напряжений для анализируемых событий, МПа; $\Delta\sigma$ — ступень напряжения; N — общее число анализируемых событий с наименьшей частотой проявления; знак «плюс» ставят, если с меньшей частотой появлялось «неразрушение», в противном случае ставят знак «минус»; $\sum_{i=0}^k i \cdot n_i$ — сумма произведений номера уровня напряжения i (начиная с $i=0$ для низшего уровня напряжений, на котором проявилось событие с наименьшей частотой) на количества соответствующих событий n_i на данном уровне напряжений.

Оценку влияния ЭПП на предел выносливости лопаток проводили ускоренной методике ступенчатого нагружения «Локати» (ГОСТ 19533-74 «Надежность изделий машиностроения»). В основе метода лежит гипотеза о линейном характере накопления усталостного повреждения материала Пальмгрена-Майнера, в соответствии с которой условие разрушения можно записать в виде:

$$\sum_1^k \frac{n_i}{N_i} = 1, \quad (8)$$

где k - число уровней напряжений, при которых проводятся испытания, n_i – количество циклов нагружения при данном уровне напряжения, N_i – долговечность при этом уровне напряжения в условиях постоянной амплитуды.

За искомый предел выносливости σ_R принимается предел выносливости, соответствующий сумме относительных повреждений, равной единице.

2.11 Методика определения концентрации водорода

Определение концентрации водорода производили оптико-эмиссионным методом в соответствии с ОСТ1 90034–81 «Сплавы титановые. Метод спектрального определения содержания водорода». Содержание водорода в титановых сплавах данным методом может быть установлено в интервале массовых концентраций от 0,001 до 0,5 %. Обязательным условием применимости метода выступает массовое содержание основного элемента в сплаве не менее 80%.

Содержание водорода определяют по интенсивности спектральной линии с длиной волны 656,7 нм, возникающей при возбуждении атомов материала высокочастотным импульсным разрядом. Интенсивность спектральной линии пропорциональна концентрации анализируемого элемента в образце [88].

Оценку концентрации водорода производили в 5 точках непосредственно с поверхности анализируемых образцов и после удаления слоя металла толщиной 1 мм на плоскошлифовальном станке.

2.12 Методика определения химического состава поверхностного слоя

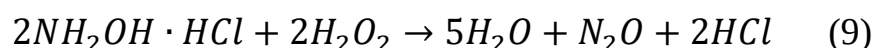
Исследование химического состава поверхности проводили методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС), который основан на измерении кинетических энергий фотоэлектронов, по которым впоследствии определяют энергии связи электронных уровней [89]. Исследование проводили с использованием рентгеновского фотоэлектронного спектрометра JPS9010-MX с источником немонахроматического рентгеновского излучения $Mg-K\alpha$ (300 Вт).

Анализ поверхности проводили в двух состояниях: до и после распыления ионами Ar^+ тонкого поверхностного слоя. Режим ионного распыления: 600 В, 12,3 мА, 15 сек, что соответствует распылению слоя SiO_2 толщиной 10 нм. Компенсация заряда была сделана путем наблюдения за фотопиками $Ar2p$ ($BE=242,5$ эВ) и металлического титана ($BE=453,9$ эВ). Для компенсации зарядного эффекта корректировку измеренных энергий связи проводили путем калибровки спектров по линии Cl_{1s} ($BE = 284,6$ эВ), соответствующей адсорбированному на поверхности образца углеводороду. Анализ спектров осуществляли с использованием программного пакета «SpecSurf» и открытых для публичного использования баз данных «NIST X-ray Photoelectron Spectroscopy Database».

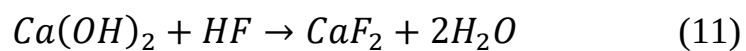
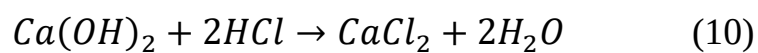
2.13 Методика утилизации растворов в лабораторных условиях

Обезвреживание отработанного раствора полирования до уровня предельно-допустимых концентраций на стадии сброса в промышленный коллектор осуществляли в четыре стадии [90]:

1. фильтрование образовавшегося в процессе полирования осадка в виде фторидов и оксифторидов титана;
2. окисление гидросиламина солянокислого раствором перекиси водорода:



3. нейтрализация 5 % раствором гидроксида кальция с осаждением слабодиссоциирующего соединения фторида кальция:



4. фильтрование фторида кальция.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА РАБОЧЕГО ЭЛЕКТРОЛИТА ДЛЯ ЭПП ДВУХФАЗНЫХ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

В научной литературе имеются отдельные сведения о возможности применения ЭПП применительно к деталям из двухфазных титановых сплавов ВТ6 и ВТ8М-1 [29] и технически чистого титана ВТ1-0 (Grade 2) [28] с использованием водных растворов фторидных солей в широком диапазоне их концентраций. Однако, практическое применение данного метода полирования в технологии изготовления лопаток ГТД требует более детального изучения влияния состава рабочих электролитов на качество обрабатываемой поверхности титановых сплавов.

3.1 Анализ влияния состава применяемых РЭ на состояние поверхности двухфазных титановых сплавов

На фотографиях внешнего вида образцов из сплавов ВТ6 и ВТ8М-1 после ЭПП, приведенных авторами работы [29] (см. Рисунок 14, Глава 1), хорошо видно отсутствие зеркального блеска, не смотря на достигнутое снижение шероховатости, что может свидетельствовать либо о наличии на обработанной поверхности толстых оксидных пленок либо о ее травлении. Для определения возможных причин отсутствия металлического блеска и оценки состояния поверхностного слоя двухфазных титановых сплавов после ЭПП была проведена пробная обработка образцов из сплава ВТ6 в двухкомпонентном РЭ на основе фторидной соли, предложенном в патенте [91], т.к. авторы работы [29] не раскрывают состав полирующего раствора. Обработку проводили при двух вариантах концентрации компонентов указанного раствора, с учетом их максимальной растворимости в воде при температуре 25°C. В растворе №1 концентрация компонентов составляла: NH_4F - 40 г/л, NH_4Cl - 10 г/л. В растворе №2 концентрация компонентов составляла: NH_4F - 80 г/л, NH_4Cl - 40 г/л. Электролитно-плазменное полирование образцов из сплава ВТ6 проводили в течение 1 минуты при температуре электролита 90 °C и напряжении 290 В.

В результате обработки, шероховатость поверхности на обоих образцах снизилась с Ra 0,3 до Ra 0,2 мкм, однако зеркального блеска на обработанной поверхности достигнуто не было (Рисунок 16).

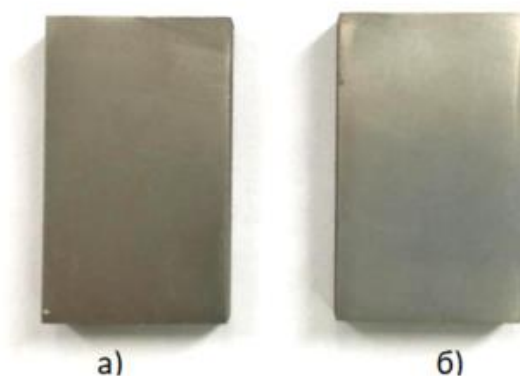


Рисунок 16 – Внешний вид образцов из сплава ВТ6 после 1 мин ЭПП в растворах:
а) NH_4F - 40 г/л, NH_4Cl - 10 г/л; б) NH_4F - 80 г/л, NH_4Cl - 40 г/л

Визуально, внешний вид образцов на Рисунке 16 соответствует внешнему виду образцов из сплавов ВТ6 и ВТ8М-1 после ЭПП, представленных в статье [29] (см. Рисунок 14). При увеличении $\times 1000$ видно, что на поверхности обоих образцов присутствуют темные пятна (Рисунок 17), соответствующие оксидам титана с примесью компонентов полирующего раствора, что следует из результатов элементного анализа поверхности (Таблица 7). Обнаруженные на поверхности оксидные пленки придают внешнему виду образцов матовость и могут негативно сказаться на усталостной прочности.

Таблица 7 – Элементный состав поверхности образца, после ЭПП в растворе, содержащем NH_4F и NH_4Cl , % вес.

Соотношение NH_4F : NH_4Cl , г/л	C	O	F	Na	Al	Cl	Ti	V
40:10	5,63	7,22	0,85	0,92	6,45	0,33	74,08	4,52
80:40	4,25	5,12	0,64	0,61	6,51	0,26	77,83	4,78

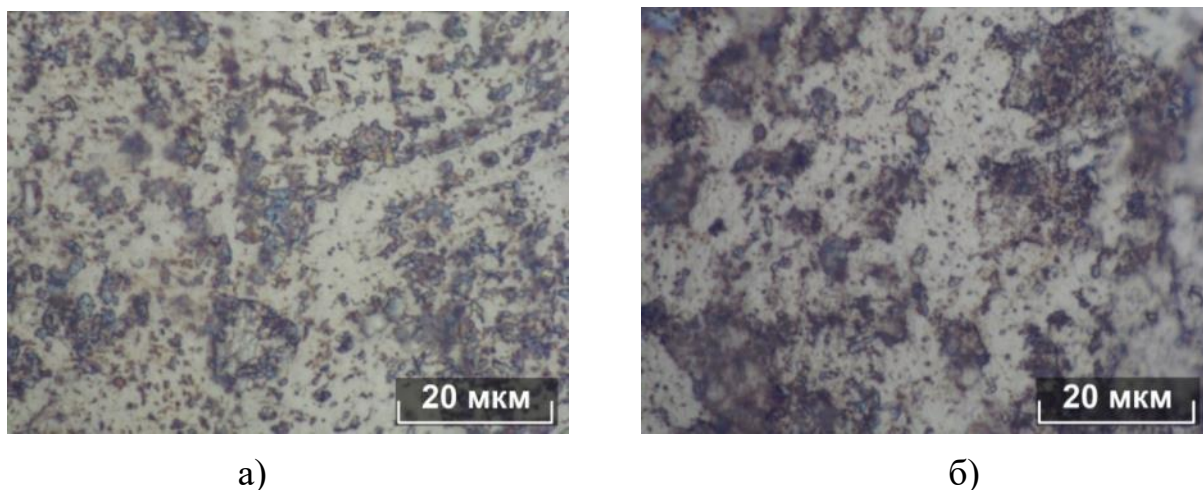


Рисунок 17 – Изображение поверхности образцов из сплава ВТ6, после 1 мин ЭПП в растворах а) NH_4F - 40 г/л, NH_4Cl - 10 г/л; б) NH_4F - 80 г/л, NH_4Cl - 40 г/л

Повышение концентрации аммония фтористого в два раза, как видно из Рисунков 16, 17 и Таблицы 7 не оказало значительного влияния на состояние поверхностного слоя – количество оксидных пленок на поверхности уменьшилось не значительно.

3.2 Анализ проблемы ЭПП титана и титановых сплавов

Сложность полирования титановых сплавов методом ЭПП заключается в высокой химической активности титана, являющегося их основным компонентом. Его концентрация в сплаве ВТ6, применяемом для изготовления широкой номенклатуры лопаток ГТД, составляет до 90 %. Проблему полирования осложняет большая концентрация легирующих элементов, таких как Al, V и др., наличие которых может привести к избирательному растворению структурных составляющих поверхности, что в конечном счете может негативно сказаться на эксплуатационных характеристиках обрабатываемых изделий.

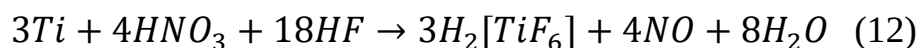
Стандартный электрохимический потенциал титана имеет очень высокое отрицательное значение (-1,63 В) [92]. В связи с этим, его поверхность активно окисляется в реакциях с кислородсодержащими веществами, в том числе с водой [78]. В условиях высокого окислительного потенциала ПГО при ЭПП происходит пассивация обрабатываемой поверхности, мешающая протеканию процесса

полирования. В частности, это может проявляться в наличии визуально наблюдаемых оксидных пленок на поверхности (см. Рисунок 17).

Именно с процессом растворения образующихся оксидных пленок на титане связаны проблемы с его химической и электрохимической обработкой в водных растворах [21].

3.3 Анализ механизма растворения титана во фторид содержащих водных растворах

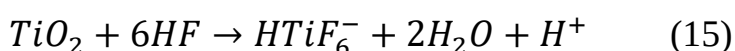
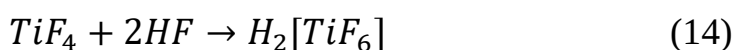
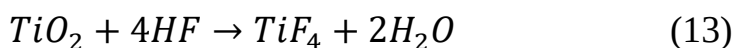
Образование оксидной пленки на поверхности титана и алюминия приводит к необходимости введения в растворы для их химического и электрохимического полирования так называемых активаторов. Для титановых сплавов в этой роли, обычно, выступает плавиковая кислота [44, 93]. Согласно [90], применение плавиковой кислоты в растворах полирования титановых сплавов обусловлено ее способностью разрушать оксидный слой в результате образования устойчивых комплексных ионов типа $[TiF_6]^{3-}$ и $[TiF_6]^{2-}$. Типичный раствор для химического полирования титановых сплавов содержит следующие компоненты [56]: H_2SO_4 - 400 мл/л, HF - 200 мл/л, HNO_3 - 400 мл/л, время обработки 1-2 мин при температуре 80-90 °С. Указанные условия позволяют представить процесс растворения оксидной пленки в виде следующего уравнения [93]:



Авторами [94], для химического полирования титанового сплава BT1-0, предложено вместо плавиковой кислоты использовать ее соли. В этой роли могут выступать натрий или калий фтористый кислый, аммоний фтористый кислый. При их растворении в воде также образуется некоторое количество плавиковой кислоты.

Применение кислых солей, указанное авторами [94] обусловлено тем, что наличие фторидных солей в условиях нейтральной и щелочной среды не приводит к коррозионному разрушению оксидных слоев, даже при высоких концентрациях [95, 96, 97]. Кислый характер среды создает условия для

взаимодействия ионов F^- и H^+ с образованием HF [44], что, согласно данным [95, 97] интенсифицирует коррозионные процессы на титане и его сплавах даже при малых концентрациях фторид ионов. Взаимодействие образовавшейся плавиковой кислоты с оксидами титана приводит к их разрушению и переводу в хорошо растворимую форму: промежуточный фторид TiF_4 [92, 98, 76] и стабильный в водных растворах комплекс $[TiF_6]^{2-}$ [99, 76]:



На Рисунке 18 приведен график смещения поляризационных кривых образцов из чистого титана в растворе искусственной слюны, при отсутствии и наличии в нем ионов F^- с учетом различной величины pH среды [95]. Для варьирования pH раствора в диапазоне 3,0...7,0, авторы использовали добавку ортофосфорной кислоты. Из рисунка видно, что поляризационная кривая для раствора, содержащего 0,1 % NaF , и имеющего величину pH 7,1, практически совпадает с поляризационной кривой для раствора в отсутствии фторида натрия в растворе. Снижение pH раствора до значения 4,0 приводит к значительному росту плотности тока коррозии при той же концентрации NaF . Результаты ОЖЭ анализа поверхности, проведенного авторами [100], показали, что при выдерживании чистого титана в растворах с высокими значениями pH ионы фтора даже не проникают в оксидную пленку, тогда как при низких значениях pH их наличие обнаруживается по всей ее толщине.

Отмеченное влияние pH раствора на концентрацию в нем HF используется авторами [101] для объяснения процесса формирования глубоких полых каналов в оксидных пленках при анодном окислении титана во фторид содержащих растворах. Согласно предложенной модели (Рисунок 19), в устье канала формируется градиент величины pH раствора. Благодаря тому, что pH среды в донной части канала имеет наименьшее значение, в ней образуется максимальная

концентрация HF , которая способствует растворению оксидной пленки и увеличению глубины канала.

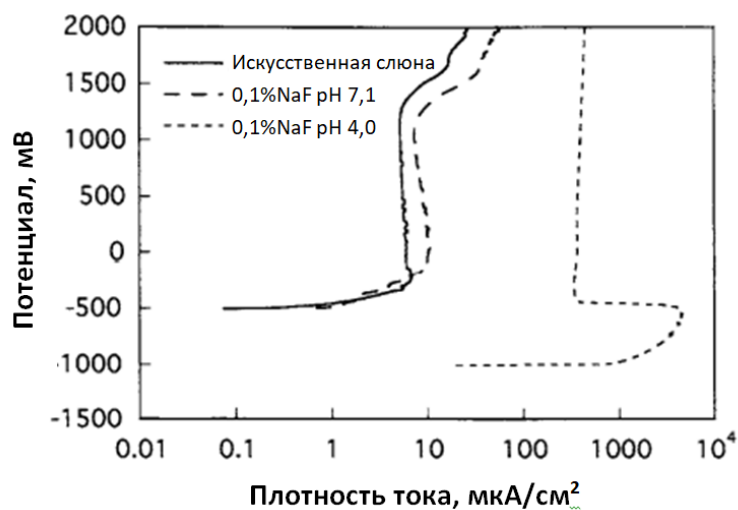


Рисунок 18 – Поляризационные кривые чистого титана в растворах искусственной слюны, содержащих F^- ионы и имеющих разную pH [95]

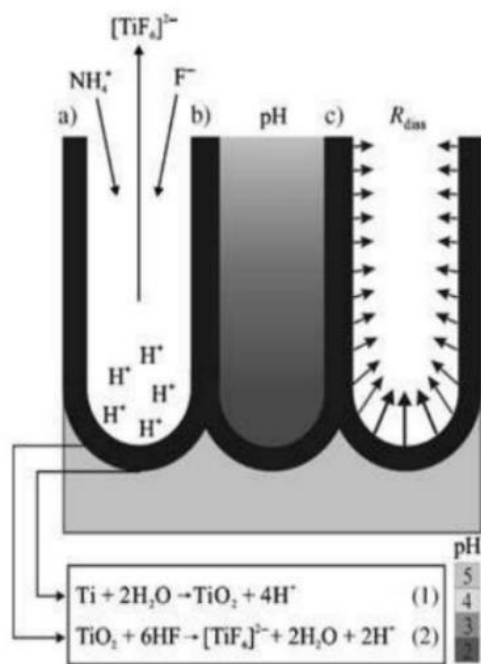


Рисунок 19 – Механизм роста пор при анодном окислении титана [101]

Авторами работы [95] была получена зависимость, описывающая потерю коррозионной стойкости титана для различного сочетания концентрации ионов F^- и pH раствора (Рисунок 20) и проведена аппроксимация полученных данных для случая без анодной (16) и с наличием анодной поляризации (17):

$$pH = 1,49 \cdot \log(F) + 0,422 \quad (16)$$

$$pH = 1,51 \cdot \log(F) + 0,237 \quad (17)$$

Возможность протекания реакций растворения оксидных пленок (13) – (15) обусловлена формированием комплексных (координационных) соединений, $[TiF_6]^{3-}$ и $[TiF_6]^{2-}$, которые образуются по донорно-акцепторному механизму [76]. Алюминий и ванадий, входящие в состав титановых сплавов ВТ6 и ВТ8М-1, также способны образовывать с ионом F^- комплексные соединения типа $[AlF_6]^{3-}$, $[VF_6]^-$ [93].

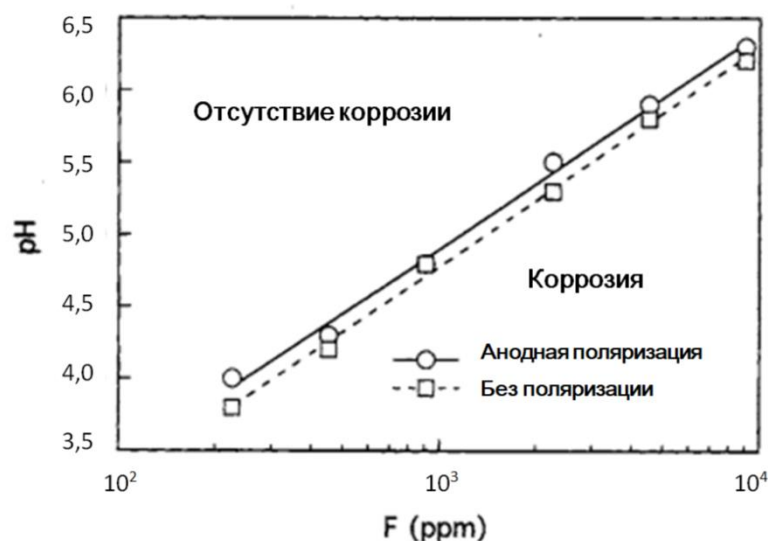


Рисунок 20 – Предельные соотношения концентрации F и pH, при которых происходит потеря коррозионной стойкости титана: без поляризации, при анодной поляризации [95]

Численная оценка концентрации HF , приводящей к химическому растворению оксидной пленки на титане, проведена в работе [95] и представлена в Таблице 9. Концентрация HF , приведённая в Таблице 9, определена путем пересчета измеренных значений количества фторид-ионов и pH раствора. Анализ приведенных данных свидетельствует о том, что потеря коррозионной стойкости на титане наступает при концентрации HF не менее 27 ppm, что соответствует ее концентрации 0,0013 моль/л.

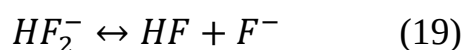
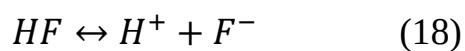
Таблица 9 – Растворимость оксидной пленки на титане в зависимости от концентрации HF

Концентрация NaF, %	pH	F (ppm) (измеренное)	HF (ppm) (рассчитанное)	Растворяется (Р) /не растворяется (Н)
0,05	5,0	228,6	0	Н
	4,5	224,9	3,9	Н
	4,0	208,9	21,0	Н
	3,8	197,3	33,0	Р
	3,6	182,5	49,0	Р
0,1	5,0	455,0	0	Н
	4,5	444,0	12,0	Н
	4,4	442,2	13,0	Н
	4,3	435,0	21,0	Н
	4,2	429,7	27,0	Р

3.4 Влияние pH среды РЭ на концентрацию HF

Зависимость концентрации HF в водном растворе от величины его pH среды открывает возможности для управления процессом растворения оксидных пленок в процессе ЭПП.

Для раствора, содержащего фторид-ионы, как показано в работе [99], концентрация HF и HF₂⁻ могут быть рассчитаны с учетом значения его pH на основании констант равновесия реакций:



Константы равновесия K_1 для реакции (18) и K_2 для реакции (19) могут быть определены по формулам:

$$K_1 = \frac{[H^+][F^-]}{[HF]} = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ моль/л} \quad (20)$$

$$K_2 = \frac{[HF][F^-]}{[HF_2^-]} = 0,104 \text{ моль/л} \quad (21)$$

Концентрацию HF и HF_2^- можно рассчитать по уравнениям 20 и 21, принимая во внимание, что общая концентрация фторида является фиксированной [102]:

$$[F] = [F^-] + [HF] + 2[HF_2^-] \quad (22)$$

$$[F^-] = \left(-\left(1 + \frac{[H^+]}{K_1}\right) \frac{K_1 K_2}{4[H^+]} + \left[\left(1 + \frac{[H^+]}{K_1}\right)^2 + 8C_F \frac{[H^+]}{K_1 K_2} \right]^{1/2} \frac{K_1 K_2}{4[H^+]} \right) \quad (23)$$

$$[HF] = [H^+] \frac{[F^-]}{K_1} \quad (24)$$

$$[HF_2^-] = [H^+] \frac{[F^-]^2}{K_1 K_2} \quad (25)$$

Увеличение равновесной концентрации HF с уменьшением величины pH представлено на диаграмме равновесных концентраций фторидных компонентов (Рисунок 21), построенной по формулам 22–25 для водного раствора, содержащего NaF в количестве 6 г/л [76].

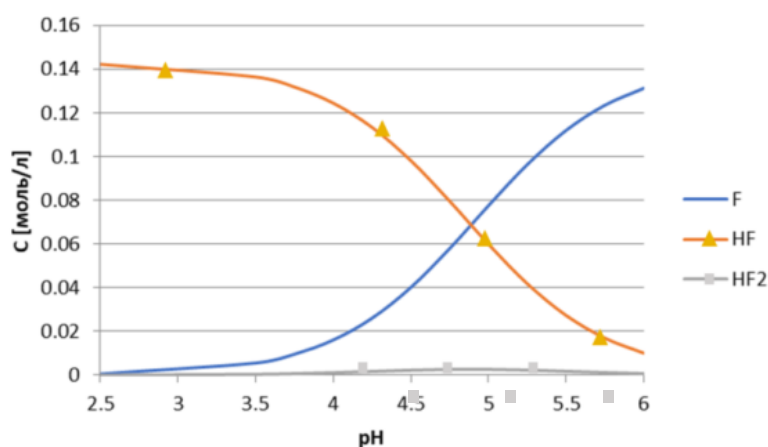


Рисунок 21 – Расчетные равновесные концентрации фторидсодержащих частиц в водном растворе с исходной концентрацией NaF 6 г/л

3.5 Разработка феноменологической модели процесса ЭПП титановых сплавов с уточнением роли рабочего электролита

Наиболее вероятная модель процесса ЭПП предполагает наличие парогазовой оболочки на границе обрабатываемой поверхности и объема электролита, а также наличие электролитных мостиков, периодически замыкающих электролит с обрабатываемой поверхностью. Анализ механизма растворения титана и титановых сплавов в водных растворах с содержанием фторид ионов позволяет уточнить данную модель. Уточненная модель ЭПП может быть представлена как чередующиеся на обрабатываемой поверхности процессы **окисления** химически-активными компонентами парогазовой оболочки, с образованием оксидов и гидроксидов с катионами металлов, и **химического растворения** образующихся продуктов окисления плавиковой кислотой, образующейся в кислых растворах, содержащих фторид ионы, в моменты образования электролитных мостиков (Рисунок 22).

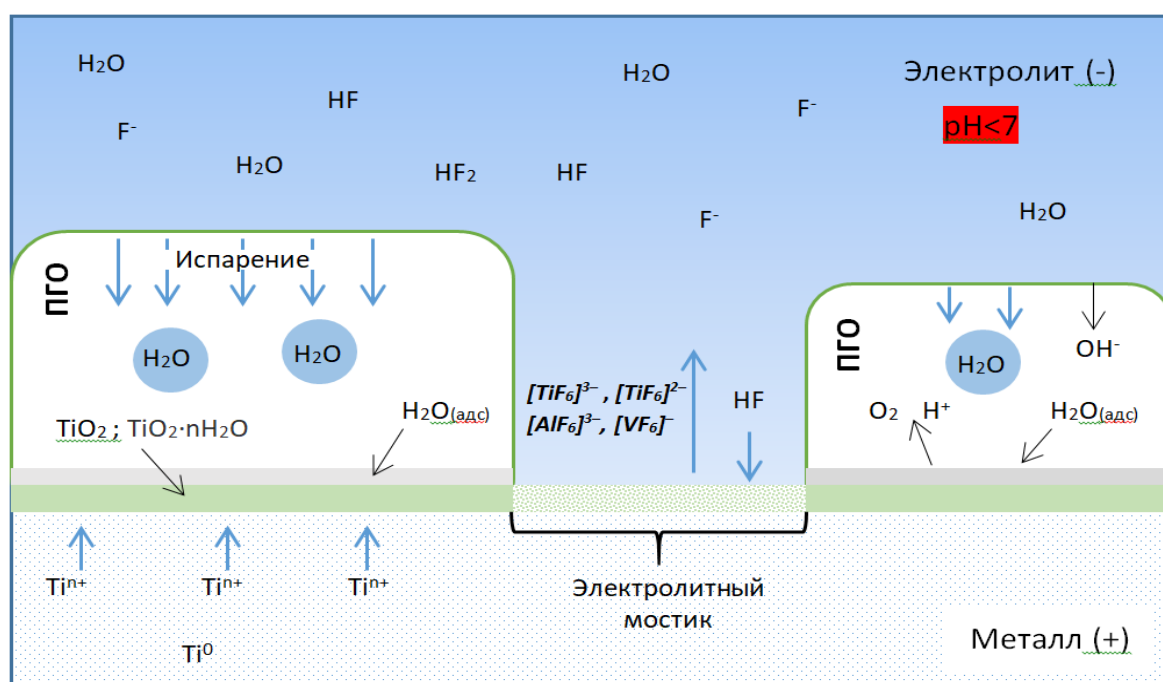


Рисунок 22 – Феноменологическая модель процесса ЭПП применительно к титану и титановым сплавам

В соответствии с представленной моделью окисление поверхности происходит в результате адсорбирования молекул воды, попадающих в ПГО в

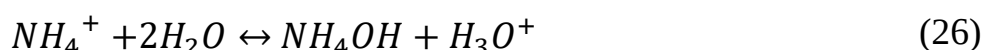
результате испарения и разбрызгивания, с последующей депротонизацией и образованием двумерной оксидно-гидроксидной решетки из-за необратимого обмена местами с частицами металла [103]. Растворение оксидов, образовавшихся в результате данной стадии процесса, происходит в моменты касания поверхности электролитными мостиками [75], причем растворение оксидов титана, алюминия и ванадия в уточненной модели происходит в условиях кислой реакции среды, способствующей образованию плавиковой кислоты во фторид содержащих растворах.

3.6 Проверка феноменологической модели

3.6.1 Содержание плавиковой кислоты в известных РЭ для ЭПП титана и сплавов на его основе

Далее представлен расчет концентрации плавиковой кислоты для трех составов рабочих электролитов: на основе фторида аммония, на основе фторида натрия, а также на основе фторида аммония с добавлением хлорида аммония.

Раствор фторида аммония, представляющий собой соль слабой кислоты и слабого основания, подвергается гидролизу по реакции:



Концентрация HF для данного раствора может быть рассчитана совместным решением уравнений:

$$K_a = \frac{[NH_4OH][H^+]}{c - [NH_4OH]} \quad (29)$$

$$K_b = \frac{[HF][OH^-]}{c - [HF]} \quad (30)$$

$$[H^+] = [NH_4^+] - [HF] \quad (31)$$

где: K_a – константа кислотности гидроксида аммония, равная $0,55 \cdot 10^{-9}$ моль/л;

K_b – константа основности плавиковой кислоты, равная $0,14 \cdot 10^{-10}$ моль/л;
 $[NH_4OH]$ – равновесная концентрация гидроксида аммония (моль/л);
 $[HF]$ – равновесная концентрация плавиковой кислоты (моль/л);
 $[NH_4^+]$ – равновесная концентрация ионов аммония (моль/л);
 $[OH^-]$ и $[H^+]$ – равновесные концентрации гидроксил иона и протонов (моль/л).

На Рисунке 23 представлены результаты численного решения системы уравнений (29–31), выполненного с использованием программного обеспечения «Maple. Как следует из представленных данных, для раствора, содержащего 50 г/л фтористого аммония, максимальная концентрация HF составляет $1,2 \cdot 10^{-3}$ моль/л [76]. Введение в раствор хлористого аммония (соли слабого основания) вызывает снижение pH среды. Вместе с тем, величина растворимости данного соединения при 25 °C ограничена 40 г/л, что накладывает верхний предел на содержание HF в растворе — не более $2,2 \cdot 10^{-3}$ моль/л [76] (Рисунок 24). Еще меньше HF образуется в растворе на основе фторида натрия, гидролиз которого протекает по реакции (32) и сопровождается увеличением значения pH раствора. Концентрация HF в таком растворе может быть определена из уравнения материального баланса (33) и составляет не более $4,5 \cdot 10^{-6}$ моль/л (Рисунок 25), что гораздо меньше, чем в растворе на основе аммония фтористого рассмотренного выше.



$$\frac{K_w}{K_a} = \frac{[OH^-][HF]}{[F^-]} = \frac{[HF]^2}{c - [HF]} \quad (33)$$

где: K_a – константа диссоциации плавиковой кислоты, равная $4,1 \cdot 10^{-6}$ моль/л;

K_w – ионное произведение воды, равное 10^{-14} (моль/л)²;

$[F^-]$ – равновесная концентрация фторид ионов (моль/л);

$[HF]$ – равновесная концентрация плавиковой кислоты (моль/л);

$[OH^-]$ – равновесная концентрация гидроксил ионов (моль/л);

c – исходная концентрация NaF (моль/л).

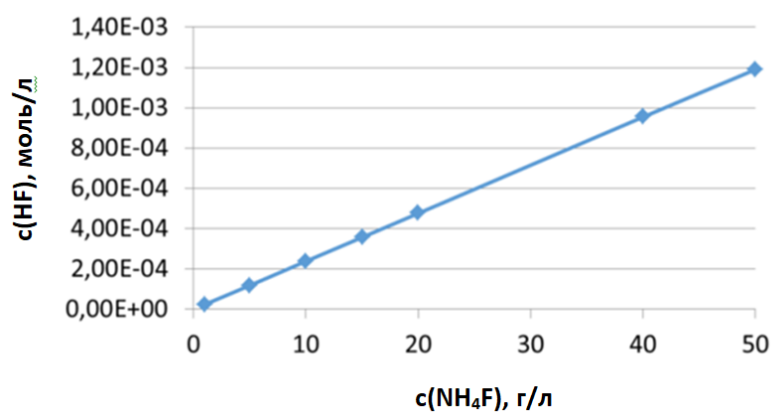


Рисунок 23 – Равновесная концентрация HF как функция исходного содержания NH_4F в растворе [76]

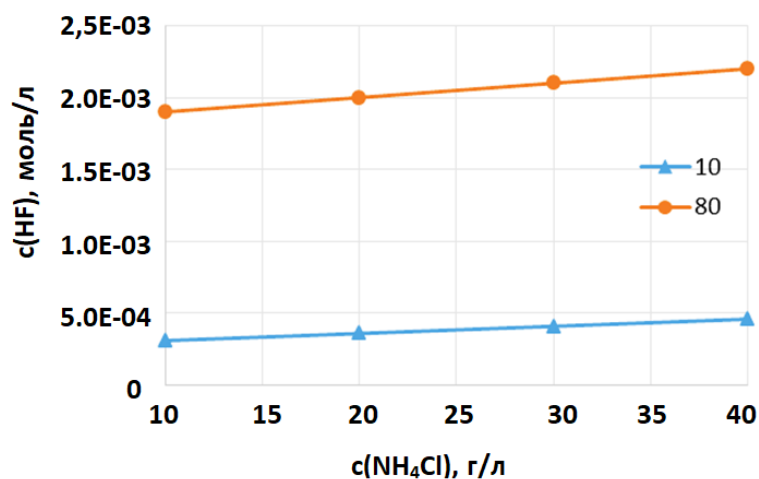


Рисунок 24 – Характер изменения равновесной концентрации HF от исходного содержания NH_4Cl в растворе при фиксированных концентрациях NH_4F , равных 10 и 80 г/л [76]

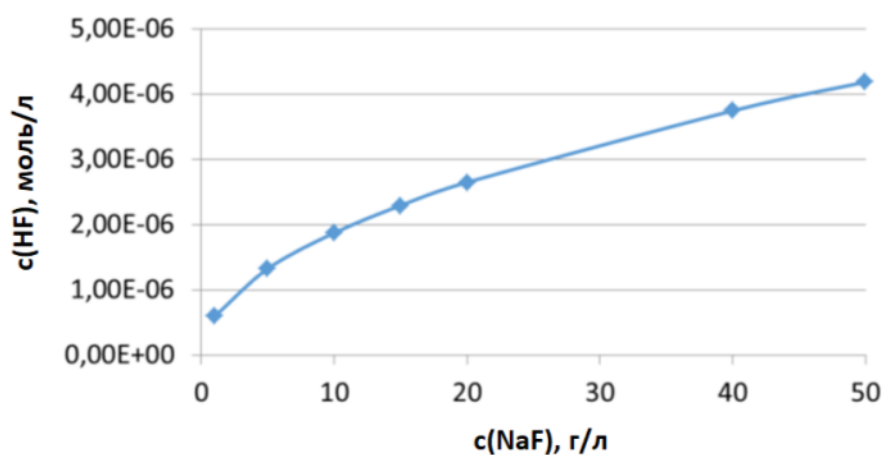


Рисунок 25 – Характер изменения равновесного содержания HF в зависимости от концентрации NaF в растворе [76]

Сопоставление полученных данных показывает, что максимальная концентрация HF в растворах с использованием заявленных компонентов составляет $2,2 \cdot 10^{-3}$ моль/л и не поддается повышению за счет изменения их содержания. Между тем, как видно из Рисунка 21 снижением pH среды можно достичь концентраций HF 0,02...0,14 моль/л при концентрации NaF 6 г/л.

3.6.2 Влияние концентрации HF на растворение оксидных пленок в процессе ЭПП

Как было показано выше, значительное повышение концентрации HF в растворах полирования на основе нейтральных солей фторидов возможно лишь путем снижения величины pH среды. С этой целью можно использовать введение в раствор полирования дополнительного количества сильной кислоты, либо использовать кислую соль фторида аммония [76]. Недостатком последнего варианта является сложность регулирования концентрации плавиковой кислоты, т.к. изменение концентрации соли приводит к одновременному изменению pH среды, концентрации фторид-ионов в растворе и его электропроводности.

Для проверки предложенной модели ЭПП титана и титановых сплавов была поведена обработка образцов из сплава ВТ6 в известном РЭ на основе фторидной соли с постепенным уменьшением величины pH среды для увеличения концентрации HF. В качестве известного рабочего электролита был взят раствор NH_4F , с концентрацией 7,4 г/л. Количество ионов фтора в растворе составляло 0,2 моль/л. Значение pH исходного приготовленного раствора составляло 6,2. Снижение величины pH среды производили введением небольших доз соляной кислоты, объемом 0,1 мл. Для создания требуемого уровня электропроводности полирующего раствора, равного 70 мСм/см, использовали KCl в количестве 30 г/л. Объем приготавливаемых растворов составлял 1000 мл.

Визуальный осмотр обработанных образцов показал, что в отсутствии соляной кислоты в растворе полирования, на поверхности наблюдается тусклый зеркальный блеск, при этом верхняя часть образца покрывается темно-синей пленкой (Рисунок 26, а). Введение в раствор 1 мл соляной кислоты, снижающей

pH раствора до значения 5,1, привело к формированию зеркального блеска на всей обработанной поверхности образца (Рисунок 26, б). Дальнейшее снижение величины pH полирующего раствора до значения 4,2 привело к исчезновению зеркального блеска со всей поверхности кроме кромок (Рисунок 26, в).

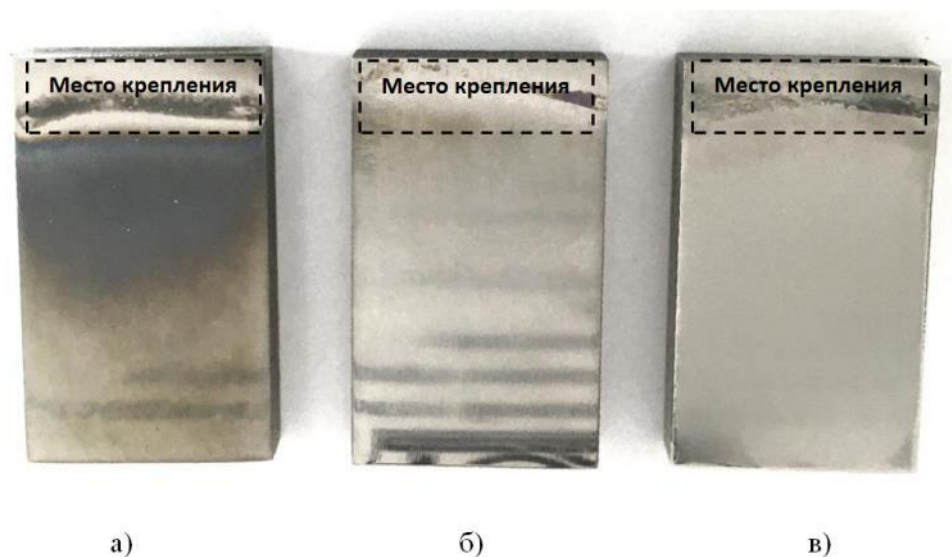


Рисунок 26 – Внешний вид образцов после 1 мин ЭПП в растворе NH_4F - 7,4 г/л, KCl - 30 г/л с добавкой HCl : а) 0 мл; б) 1 мл; в) 2 мл

Согласно результатам, представленным в Таблице 10, ЭПП в РЭ без добавления соляной кислоты приводит к формированию на поверхности локальных участков с повышенным содержанием кислорода (до 12 мас.%) и компонентов электролита (Рисунок 27, а). По мере подкисления рабочей среды концентрация этих элементов падает ниже порога чувствительности аналитического оборудования (Рисунок 27, б). Дальнейшее снижение pH не влияет на элементный состав, но сопровождается травлением поверхности (Рисунок 27, в).

Не смотря на полученный положительный эффект от введения в раствор соляной кислоты, такой способ снижения pH среды обладает недостатком в виде непродолжительного срока службы, т.к. в процессе полирования происходит расходование плавиковой кислоты. Полирование образцов продолжительностью 3 минуты и более в этом растворе, объемом 1000 мл, приводит к повторному появлению большого количества оксидных пленок на поверхности, концентрация

кислорода увеличивается до 10 % вес. Через 5 минут полирования обработанная поверхность покрывается сплошной оксидной пленкой темно-синего цвета.



а)

б)

в)

Рисунок 27 – Состояние поверхности после 1 мин ЭПП в растворе NH_4F - 7,4 г/л, KCl - 30 г/л с добавкой HCl : а) 0 мл; б) 1 мл; в) 2 мл

Таблица 10 – Элементный состав поверхности образцов, после ЭПП в растворе, содержащем NH_4F -7,4 г/л и KCl -30 г/л с добавкой HCl , % вес.

Длительность ЭПП, мин	Объем HCl , мл	C	O	F	Al	Si	Ti	V
1	0	2,96	12,75	1,76	6,43	0,37	71,25	4,48
	1	0	0	0	6,56	0	88,69	4,75
	2	0	0	0	6,52	0	88,76	4,72
5	1	0	10,72	0	6,45	0,59	77,78	4,46

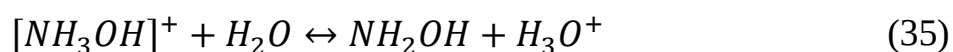
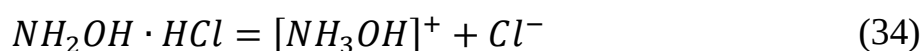
3.7 Обоснование компонентного состава РЭ для ЭПП титана и двухфазных титановых сплавов

Получение требуемого количества HF в растворе солей плавиковой кислоты, как было показано выше, возможно путем уменьшения pH среды. С этой целью, для приготовления РЭ можно применять кислые соли плавиковой кислоты или добавлять в раствор компоненты, которые будут обеспечивать снижение pH среды. Первый вариант имеет большой недостаток, связанный с тем, что изменение концентрации фторид-ионов в виде кислой соли приводит к одновременному изменению pH РЭ. Наиболее удобным, с этой точки зрения, является вариант, позволяющий регулировать pH среды независимо от

концентрации фторид-ионов. Для этой цели в него можно добавлять гидроксилламин солянокислый, применение которого описано в работе [78] для химического полирования чистого титана.

Дополнительным положительным моментом в использовании $\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$ является обеспечение буферного действия, заключающееся в сохранении постоянства концентрации ионов водорода при добавлении небольших количеств сильной кислоты или щелочи, а также при разбавлении и концентрировании раствора. Это свойство очень важно, т.к. известно, что в результате электролитно-плазменной обработки отмечается снижение величины pH раствора [104], а это может привести к изменению в нем концентрации HF, и, следовательно, к смене процесса полирования на процесс травления.

Буферное действие гидроксилламина солянокислого обеспечиваются двумя процессами: образованием при его диссоциации заряженной кислоты $[\text{NH}_3\text{OH}]^+$ и сопряженного основания NH_2OH , в соответствии с обратимой реакцией депротонизации с молекулами воды, которые, при совместном присутствии, согласно протолитической теории Бренстеда-Лоури, обладают кислотно-основным буферным действием [105]:



В качестве источника фторид ионов предложено использовать соль фторида натрия. Для создания требуемой электропроводности РЭ, величина которой, по анализу известных данных, должна составлять 60...80 мСм/см, можно использовать нейтральные соли, например хлорид натрия или калия, а также хлорид аммония.

Влияние концентрации компонентов разработанного рабочего электролита на pH среды и равновесную концентрацию HF исследовали на серии растворов с варьируемым содержанием $\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$ и NaF в пределах их индивидуальной растворимости в воде при 25 °C и атмосферном давлении: NaF — 4...20 г/л,

$\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ — 0...40 г/л. Электропроводность полученных растворов доводили до 70 мСм/см добавлением калия хлористого [76].

Измеренные значения pH среды исследуемых растворов отображены графически на Рисунке 28 [76]. Полученные данные демонстрируют, что при постоянной концентрации натрия фтористого увеличение концентрации гидроксиламина солянокислого приводит к снижению pH среды, что соответствует теоретическим представлениям об исследуемом компонентном составе рабочего электролита.

Определение содержания HF в каждом анализируемом растворе выполнялось с использованием зависимостей 20-22, при этом значение концентрации $[\text{H}^+]$ для каждого анализируемого раствора определяли экспериментально (Рисунок 28). Анализ результатов вычислений, представленных на графике (Рисунок 29), показывает, что варьированием соотношения исходных компонентов РЭ можно регулировать содержание в нем HF в широком диапазоне значений концентрации (от 0,04 до 0,11 моль/л) [76].

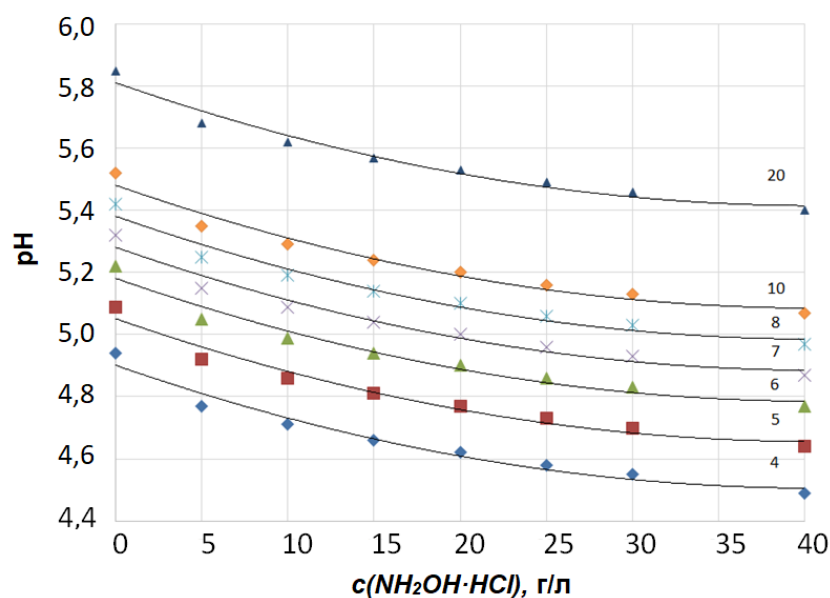


Рисунок 28 – Зависимость pH от концентрации $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ для РЭ с различным содержанием NaF (4, 5, 6, 7, 8, 10, 20 г/л) [76]

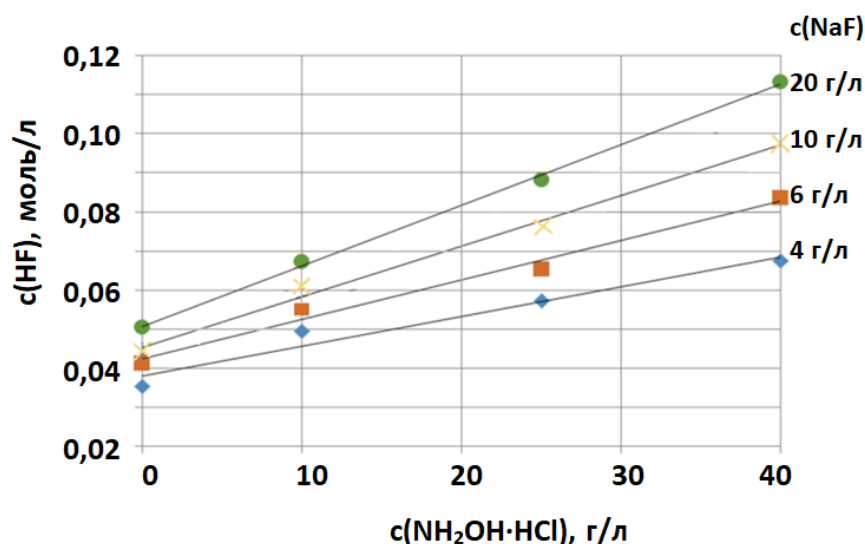


Рисунок 29 – Расчетная зависимость концентрации HF от соотношения NaF и $\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$ в РЭ

Из графиков также видно, что с увеличением концентрации NaF, та же концентрация HF может быть достигнута при меньшем содержании $\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$. На основании этого можно предположить, что эффект полирования в РЭ с большим содержанием натрия фтористого будет наблюдаться при меньшем содержании гидроксиламина солянокислого.

Выводы по главе 3

1. ЭПП образцов из титанового сплава ВТ6, с использованием известных РЭ, показало, что не смотря на достигаемое снижение шероховатости, на обработанной поверхности присутствуют локальные участки с повышенным содержанием кислорода до 12 % вес.;
2. Необходимым условием для химического растворения оксидов на поверхности титана и титановых сплавов в водных фторид-содержащих растворах является кислая реакция среды;
3. Разработана феноменологическая модель электролитно-плазменного полирования титана и титановых сплавов в рабочих электролитах на основе водных растворов фторидов, отличающаяся учетом роли pH среды в

формировании плавиковой кислоты (HF), необходимой для растворения оксидов титана, образующихся на обрабатываемой поверхности под действием окисляющей среды парогазовой оболочки и позволяющая установить требования к компонентному составу рабочего электролита;

4. ЭПП образцов из титанового сплава ВТ6 в известном РЭ на основе фторидной соли показало, что при снижении величины pH среды, введением соляной кислоты, видимые оксидные пленки на поверхности не образуются, обработанная поверхность приобретает зеркальный блеск, а при значительном ее повышении на поверхности наблюдается вытравливание структурных составляющих сплава;

5. На основе анализа литературных данных предложен компонентный состав РЭ, включающий фторид натрия, гидроксилламин солянокислый и хлорид калия. Предложенный компонентный состав позволяет регулировать концентрацию плавиковой кислоты в диапазоне в интервале 0,04...0,11 моль/л и обладает буферным действием в отношении pH среды полученного раствора, тогда как ее концентрация в известных РЭ для титановых сплавов не может превышать $2,2 \cdot 10^{-3}$ моль/л, что недостаточно для полного удаления оксидных пленок.

ГЛАВА 4. ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ КОМПОНЕНТОВ РАЗРАБОТАННОГО РАБОЧЕГО ЭЛЕКТРОЛИТА НА КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ

Анализ литературных источников показал, что в зависимости от состава рабочего электролита, электролитно-плазменная обработка может приводить либо к окислению, либо к полированию обрабатываемой поверхности. При этом образование зеркальной поверхности, с большой долей вероятности, свидетельствует о переходе электролитно-плазменной обработки в режим полирования.

4.1 Экспериментальное подтверждение роли HF и определение области концентраций, обеспечивающих полирование поверхности

Для определения соотношения компонентов РЭ, обеспечивающего протекание процесса полирования, была приготовлена серия растворов с варьированием их концентрации. Содержание натрия фтористого изменяли от 4 до 10 г/л с шагом 1 г/л, гидроксиламина солянокислого от 0 до 25 г/л с шагом 2,5 г/л [76]. Время электролитно-плазменной обработки образцов в приготовленных растворах составляло 1 минуту, после чего их промывали дистиллированной водой и протирали бязью.

Результаты измерения шероховатости образцов до и после обработки показали, что в каждом из приготовленных растворов достигается увеличение относительного сглаживания микронеровностей от 5 до 20 % в зависимости от соотношения концентраций фторида натрия и гидроксиламина солянокислого в растворе (Рисунок 30).

Характерный внешний вид отдельных образцов, обработанных при различном соотношении компонентов электролита, представлен на Рисунке 31. В направлении слева-направо представлен результат увеличения концентрации $\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$, сверху-вниз – результат увеличения концентрации NaF .

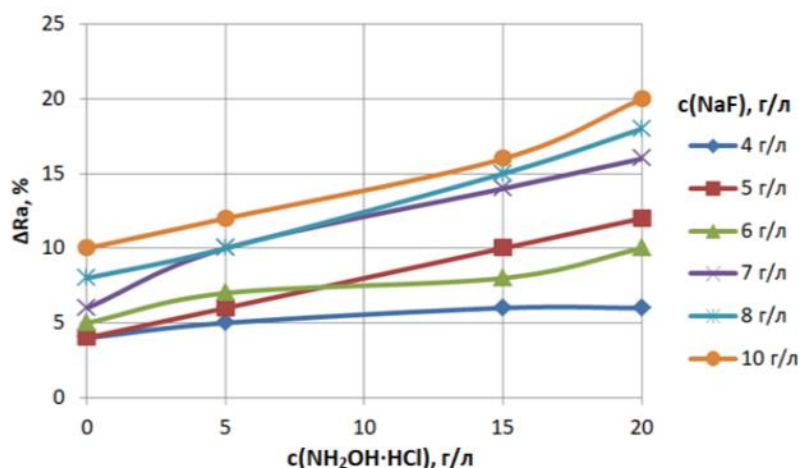


Рисунок 30 – График зависимости величины относительного сглаживания шероховатости поверхности от концентрации $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ после 1 мин ЭПП в растворах с концентрацией NaF в диапазоне 4...10 г/л

Результаты оценки внешнего вида поверхности образцов (Рисунок 31) показали следующее:

- 1) при концентрации NaF 4 г/л зеркальный блеск поверхности не наблюдается во всем исследованном диапазоне концентраций $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$, при этом поверхность образцов покрывается темно-фиолетовой полупрозрачной пленкой, предположительно, оксидной природы (Рисунок 34, а), наличие которой может объяснить небольшое снижение шероховатости на соответствующих образцах (см. Рисунок 30);
- 2) в растворах с концентрацией NaF более 4 г/л увеличение содержания $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ сопровождается сокращением площади темно-фиолетовой пленки на поверхности образцов и появлением зеркального блеска (Рисунок 34, а, в) [76], при этом отмечается значительный рост величины относительного сглаживания шероховатости от 5 до 10 % (см. Рисунок 30);
- 3) повышение концентрации NaF способствует смещению области проявления эффектов, описанных в п. 2, в сторону меньших значений $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$, а показатель относительного сглаживания выходит на уровень 20% (Рисунок 30).



Рисунок 31 – Внешний вид образцов, обработанных при различном соотношении компонентов в электролите (в скобках через дефис указана концентрация NaF и $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ в г/л соответственно)

Результаты графического отображения качественных изменений внешнего вида образцов, описанных выше, приведены на Рисунке 32 [76]. Оценка выполнена по четырехбальной шкале предварительной оценки качества, принятой в Главе 2. В соответствии с данным графиком, граница перехода качества полирования от 3-х к 4-х баллам, может быть аппроксимирована следующим уравнением:

$$c(\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}) = 504,37 \cdot c(\text{NaF})^{-1,52} \quad (36)$$

где: $c(\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl})$ – концентрация гидроксиламина солянокислого, г/л;

$c(\text{NaF})$ - концентрация фторида натрия, г/л.

С целью проверки предположения о наличии связи между внешним видом образцов и равновесной концентрацией HF в рабочем электролите были построены диаграммы распределения частиц F^- , HF и HF_2^- (Рисунок 33) [76]. Расчеты выполнены для всех концентраций NaF в исследуемой серии растворов. После этого на каждой диаграмме были отмечены граничные значения pH растворов, в которых произошел рост предварительной оценки качества поверхности.

Согласно полученным результатам (Рисунок 33), для всех исследованных концентраций NaF, за исключением растворов с концентрацией NaF 5 и 6 г/л, повышение оценки качества обрабатываемой поверхности с двух до трёх баллов наблюдается при содержании HF 0,060...0,062 моль/л, а с трёх до четырёх баллов при 0,070...0,073 моль/л. Причина отсутствия на диаграмме точек перехода оценки качества поверхности от трех к четырем баллам для растворов с концентрацией NaF 6 и 5 г/л заключается в том, что для данной концентрации NaF в изученном диапазоне концентраций $\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$ (от 0 до 25 г/л) не удаётся достичь величины pH, достаточной для формирования требуемого количества HF [76].

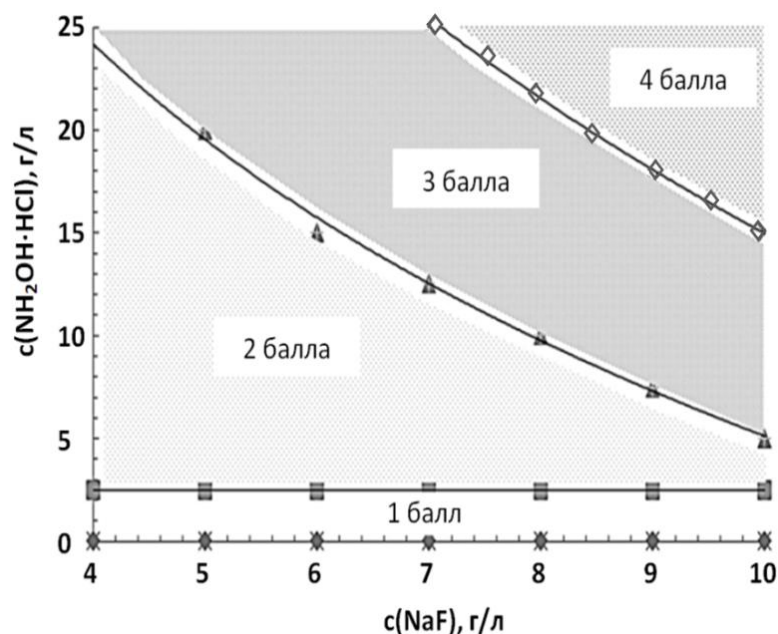


Рисунок 32 – Влияние соотношения NaF и $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ на величину предварительной оценки качества обработки поверхности [76]

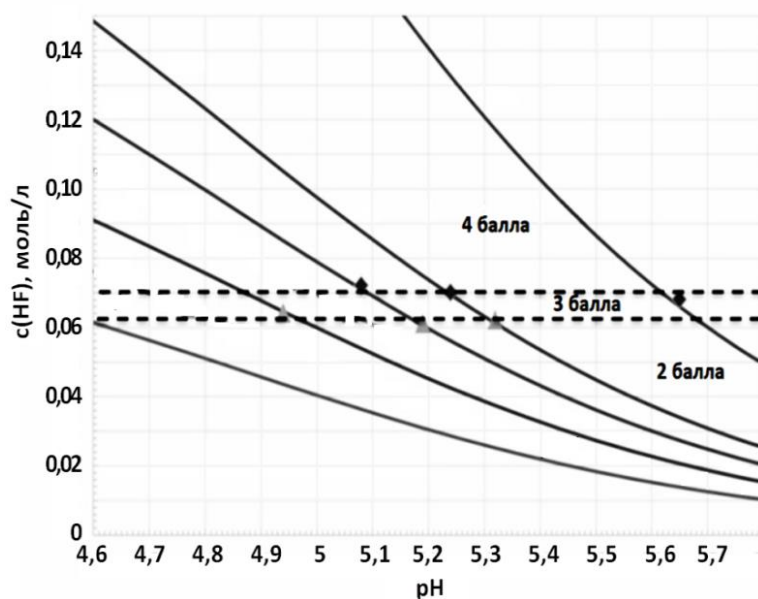


Рисунок 33 – Расчетная диаграмма зависимости равновесной HF от pH для исследованных концентраций NaF (4, 5, 6, 7, 8, 10, 20 г/л) с указанием измеренных значений pH на которых произошло изменение качества поверхности [76]

Полученные, таким образом, результаты исследования однозначно показывают связь концентрации HF с получением полированной поверхности титановых сплавов при ЭПП.

4.2 Анализ изменения внешнего вида образцов и потери массы в связи с изменением концентрации HF

Более детальное изучение изменений во внешнем виде образцов по мере увеличения концентрации гидроксиламина солянокислого, в растворе с постоянной концентрацией натрия фтористого, позволило выявить следующую закономерность:

- в отсутствие $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ вся поверхность детали покрывается однородной тёмно-фиолетовой плёнкой (Рисунок 34, а);
- при определенной концентрации $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ тёмно-фиолетовая плёнка на верхнем участке образца (наименее погружённом в электролит) не наблюдается (Рисунок 34, б);
- по мере возрастания концентрации $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$, зеркальный блеск появляется на всей поверхности образца кроме кромок (Рисунок 34, в);
- дальнейшее увеличение концентрации $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ приводит к увеличению отражательной способности обработанной поверхности и постепенному возникновению зеркального блеска на кромках.

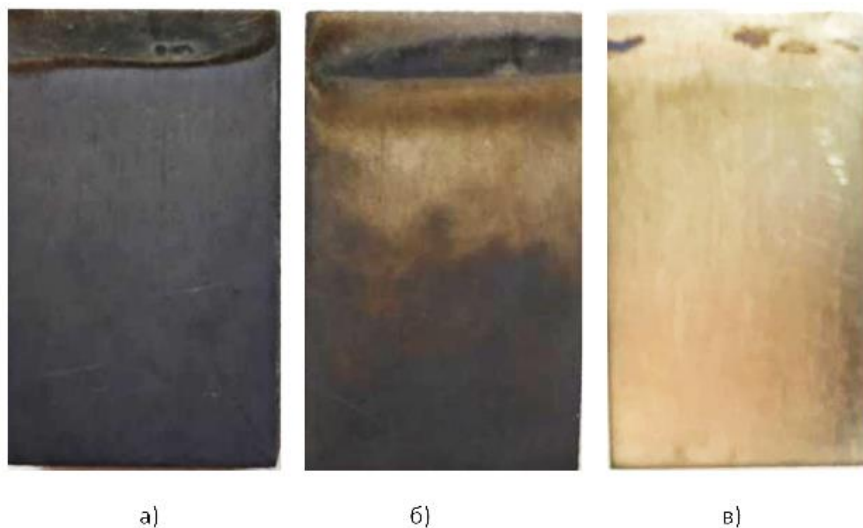


Рисунок 34 – Состояние поверхности образцов из сплава ВТ6 после ЭПО в электролитах с концентрацией NaF 7 г/л при различных концентрациях $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$: а) 0 г/л; б) 2,5 г/л; в) 7,5 г/л [76]

Если содержание NaF в рабочем электролите оказывается ниже исследованного диапазона, наблюдается другая закономерность. В случае обработки в растворе, содержащем 2,0 г/л NaF и 20,0 г/л $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$, цвет поверхности образца изменяется от тёмно-фиолетового вблизи кромок до светло-серого непосредственно на кромках. Наиболее отчетливо это проявляется вблизи нижней кромки (Рисунок 35).

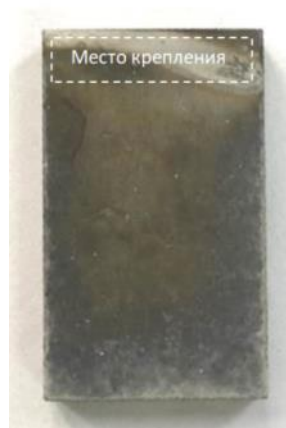


Рисунок 35 – Внешний вид образца из сплава ВТ6 после ЭПО в растворе состава: NaF - 2,0 г/л, $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ - 20,0 г/л, KCl - 20 г/л.

Обнаруженный характер изменения внешнего вида образцов после ЭПО хорошо согласуется с известной закономерностью изменения толщины ПГО и напряженности электрического поля вдоль обрабатываемой поверхности в вертикальном и горизонтальном направлении [31, 106]. Согласно [106], в результате действия гидростатического давления минимальная толщина ПГО соответствует наиболее глубоко погруженным участкам поверхности, на участках поверхности, расположенных ближе к зеркалу электролита, толщина ПГО достигает максимального значения. Дополнительному утонению ПГО вблизи кромок способствует действие Лапласова давления [31,107], величина которого обратно пропорциональна ее радиусу кривизны, и прямо пропорциональна поверхностному натяжению. Оба эти фактора приводят к тому, что поверхность по вертикали может быть условно поделена на 3 зоны (Рисунок 36), что показано авторами [106]: I – переходная зона от поверхности электролита до зоны устойчивой ПГО; II – зона устойчивой ПГО; III – зона интенсивного съема.

Наименьшая скорость удаления материала с поверхности зафиксирована в зоне I. Это обусловлено существенным возрастанием толщины ПГО вследствие накопления всплывающих парогазовых пузырей, а также резким падением гидростатического давления в момент выхода этих пузырей на границу раздела фаз. В зоне II наблюдается рост скорости растворения, прямо пропорциональный глубине погружения, что связано с соответствующим уменьшением толщины ПГО. В зоне III наблюдается резкое увеличение скорости растворения, связанное с максимальной величиной гидростатического давления и дополнительным воздействием Лапласова давления вблизи нижней кромки заготовки.

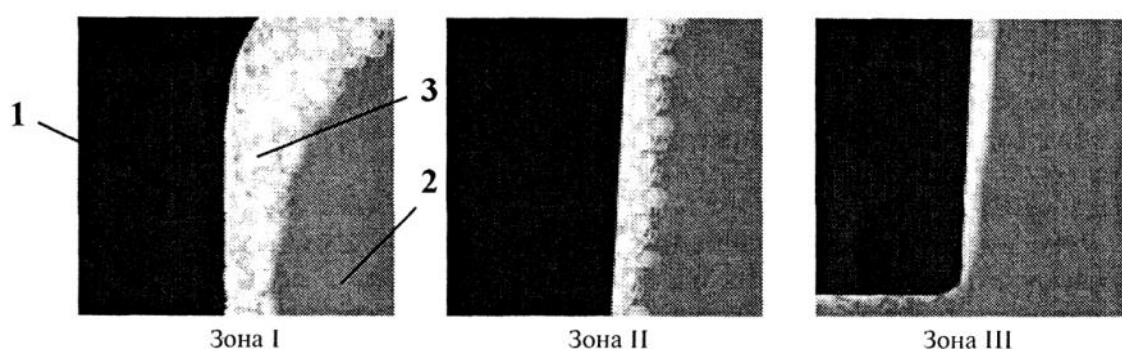


Рисунок 36 – Типичные участки образования ПГО в процессе обработки вертикально установленной цилиндрической детали [106]: 1 — заготовка (анод); 2 — электролит (катод); 3 — ПГО

Сопутствующее уменьшению толщины ПГО увеличение скорости растворения поверхности авторы [106] объясняют повышением напряженности электрического поля, приводящим к увеличению интенсивности физико-химических процессов на соответствующих выпуклых участках поверхности с минимальным радиусом сопряжения.

В рамках принятой модели ЭПП, предполагающей попеременное воздействие на участки обрабатываемой поверхности процессов окисления и растворения образующихся окислов, увеличение напряженности электрического поля должно приводить к увеличению скорости роста толщины оксидных пленок за счет повышения интенсивности перемещения катионов металла к внешней границе оксидного слоя [108], а увеличение концентрации плавиковой кислоты в растворе должно увеличивать скорость растворения образующегося оксида

титана. Таким образом, при недостаточной концентрации HF в растворе, на поверхности после ЭПО должны присутствовать оксидные пленки, имеющие наибольшую толщину на кромках и на наиболее заглубленных в электролит участках поверхности. При постепенном увеличении концентрации HF должно наблюдаться утонение видимых оксидных пленок и полное их исчезновение начиная с верхней части и заканчивая кромками, что мы и наблюдаем на Рисунке 34 и 35.

На образцах из сплава ВТ6, обработанных при низком содержании HF в растворе, описанное различие в толщине оксидной пленки проявляется в образовании на кромках и нижней части образца рыхлой оксидной пленки белого цвета, что характерно для титана в степени окисления IV (см. Рисунок 35). Повышение концентрации HF в растворе приводит к увеличению скорости растворения оксидов, что проявляется в постепенном уменьшении площади фиолетовых участков и появлении зеркального блеска по всей площади (Рисунок 34).

Анализ графиков убыли массы образцов, представленных на Рисунке 37, также показывает ее корреляцию с концентрацией плавиковой кислоты в растворе:

- в растворах содержащих более 6 г/л NaF повышение концентрации $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$, сопровождаемое соответствующим повышением HF (см. Рисунок 29), приводит к постепенному увеличению убыли массы образцов с 0,008 г/мин до 0,09...0,012 г/мин в зависимости от концентрации NaF [76],

- повышение концентрации NaF в растворе, приводящее к образованию большего количества HF при одном и том же значении количества $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ (см. Рисунок 29), приводит к росту убыли массы при меньших значениях последнего [76].

Наблюдаемая убыль массы образцов величиной 0,008 г/мин в растворах при концентрации $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ менее 7 г/л (Рисунок 37) может быть вызвана двумя процессами:

- химическим растворением образующейся оксидной плёнки ввиду присутствия небольшого количества HF;
- механическим разрушением образующейся на поверхности оксидной пленки в результате искрового пробоя или гидродинамического воздействия ПГО.

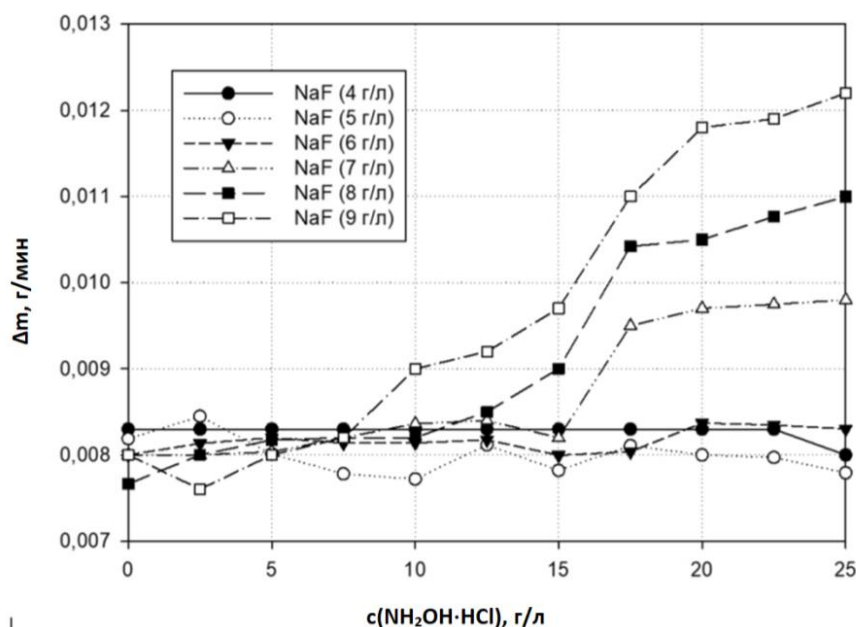


Рисунок 37 – Зависимость убыли массы образцов от концентрации $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ при различном содержании NaF в РЭ [76]

4.3 Влияние соотношения компонентов РЭ на морфологию и элементный состав обработанной поверхности

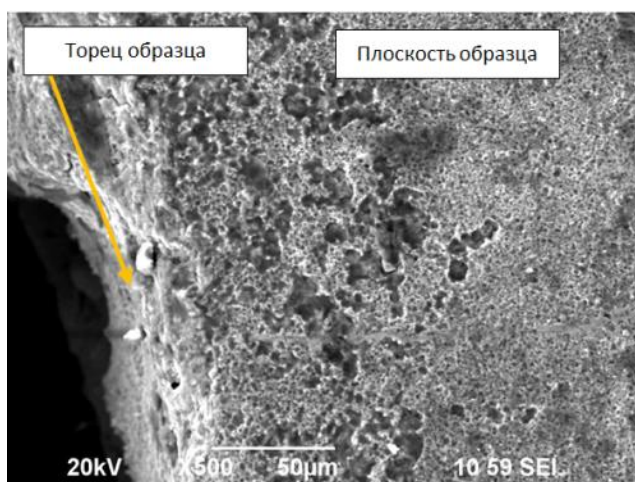
Выборочное исследование поверхности экспериментальных образцов, представленных на Рисунке 31, с применением растровой электронной микроскопии (РЭМ) и микрозондового анализа показало:

- в отсутствии $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ и концентрации NaF 5 г/л на поверхности исследуемых образцов присутствует пористая пленка (Рисунок 38, а, б), в состав которой входят компоненты титанового сплава ВТ6, компоненты электролита и кислород (Таблица 11), что подтверждает предположение об оксидной природе наблюдаемых темно-фиолетовых пленок на поверхности. Большое количество пор на кромках, в сравнении с плоской поверхностью, может свидетельствовать о более интенсивном процессе окисления, сопровождаемого пробоем образующейся оксидной пленки;

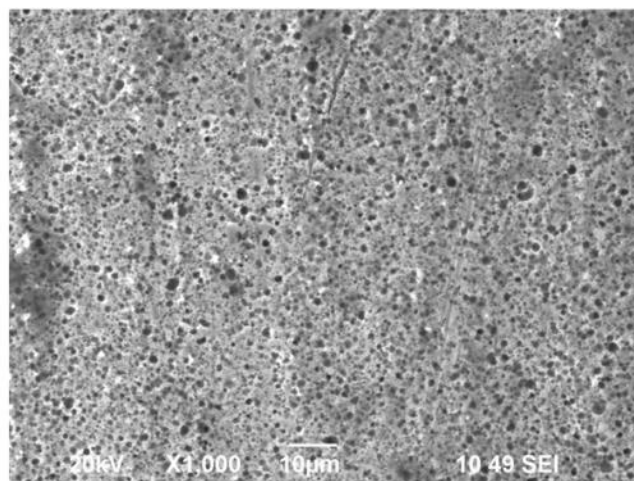
Таблица 11 – Изменение элементного состава поверхности образцов из сплава ВТ6 после ЭПП в зависимости от соотношения $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ и NaF в РЭ [76]

Состав раствора, г/л	Содержание элемента, % масс									
	Ti	Al	V	Zr	O	F	Na	Cl	Ca	K
NaF – 5; $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ – 0	47,99	5,22	2,61	0	24,37	14,61	1,51	0,96	0,4	2,33
NaF – 8; $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ – 20	88,69	6,55	4,76	0	0	0	0	0	0	0

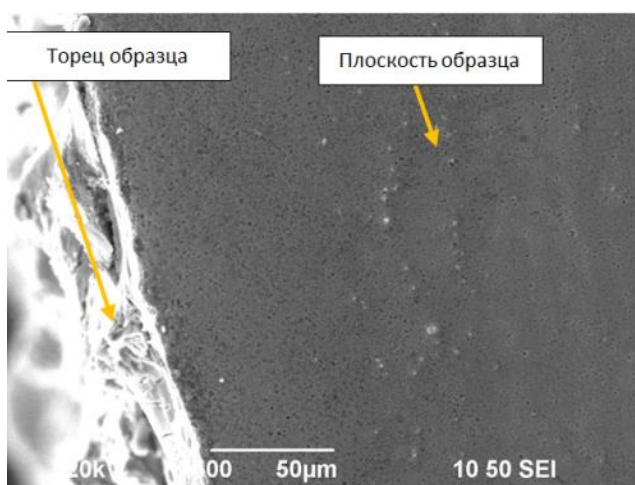
- увеличение концентрации натрия фтористого до 8 г/л при нулевом содержании $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ приводит к возникновению на всей обработанной поверхности сплошной пористой плёнки (Рисунок 39, а, б) [76]. При этом можно отметить, что пленка становится менее плотной и приобретает губчатую структуру из сферических пор, соединенных между собой. Отсутствие больших пор на кромках, в отличие от предыдущего случая (см. Рисунок 38, а, б), может свидетельствовать об уменьшении толщины оксидной пленки на этих участках;
- увеличение концентрации $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ до 20 и 15 г/л, в растворах содержащих 5 и 8 г/л NaF соответственно (Рисунок 38, в, г; Рисунок 39, в, г), приводит к частичному уменьшению площади, покрытой пористой оксидной пленкой. В первую очередь, наблюдается исчезновение оксидной пленки с плоской поверхности - она приобретает вид, характерный для полированного металла, без выявления микроструктуры материала образца.
- при увеличении концентрации $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ до 30 г/л и 20 г/л, в растворах содержащих 5 и 8 г/л NaF соответственно, оксидная пленка на плоских поверхностях и кромках образцов не наблюдается и вся поверхность имеет вид, характерный для полированного металла (Рисунок 38, д, е; Рисунок 39, д, е), (Таблица 11);



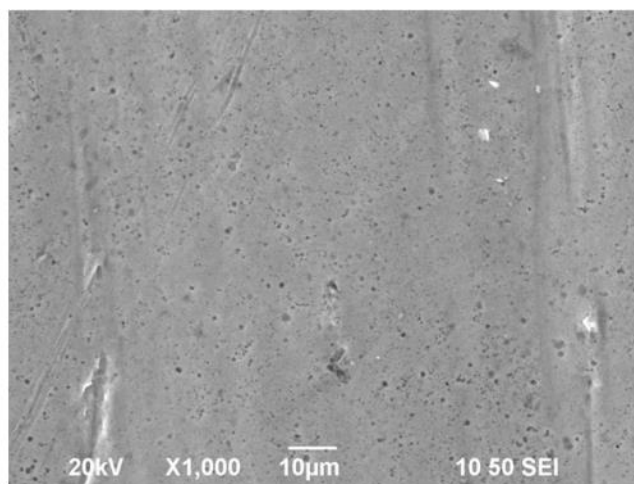
а)



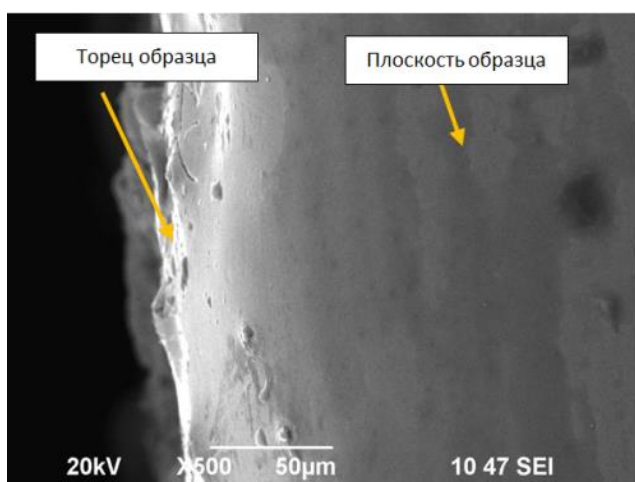
б)



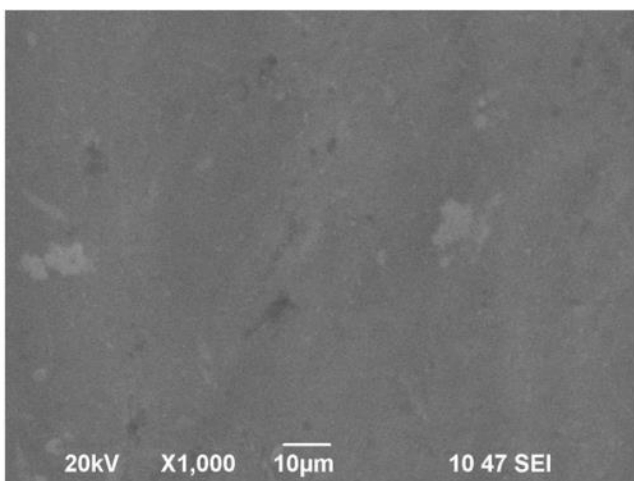
в)



г)

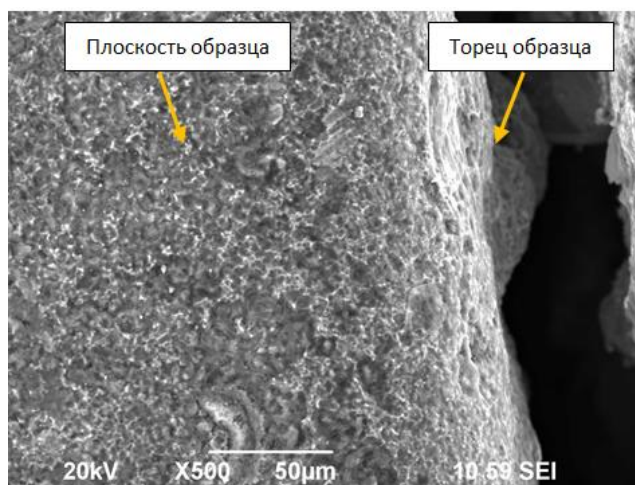


д)

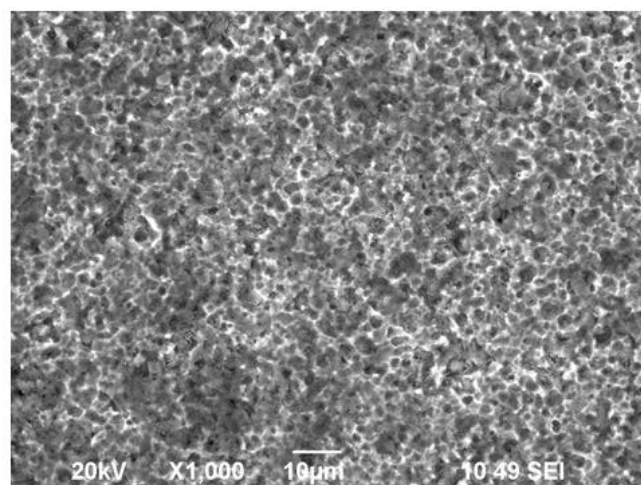


е)

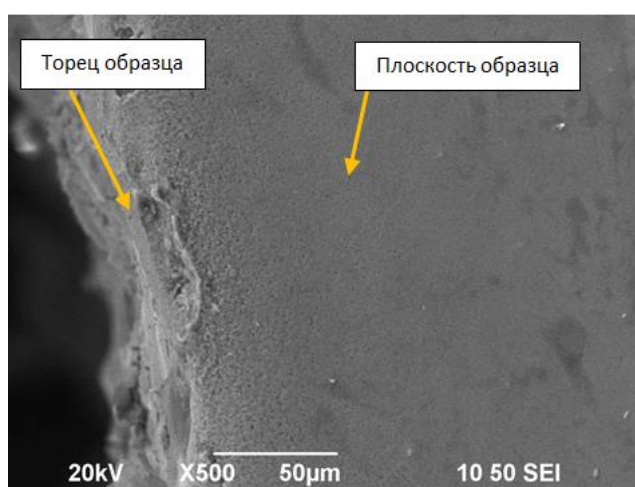
Рисунок 38 – Изображение поверхности образцов после ЭПП для различного соотношения $\text{NaF} : \text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$ при увеличении $\times 500$ и $\times 1000$: а, б) 5:0; в, г) 5:20; д, е) 5:30 г/л



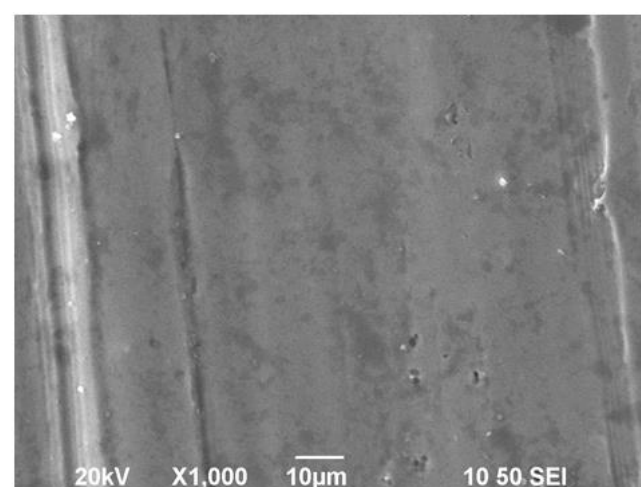
а)



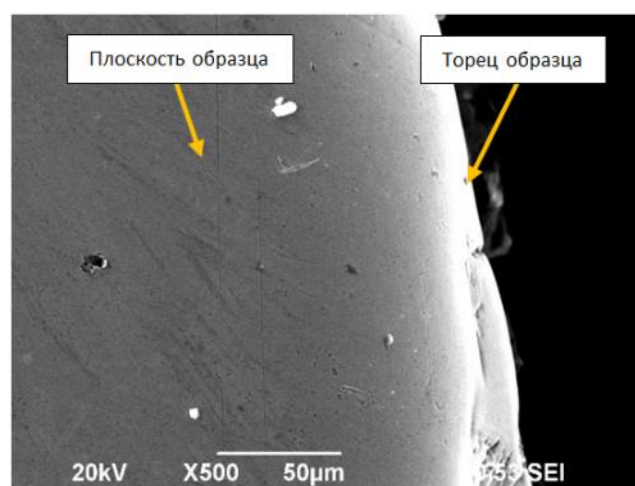
б)



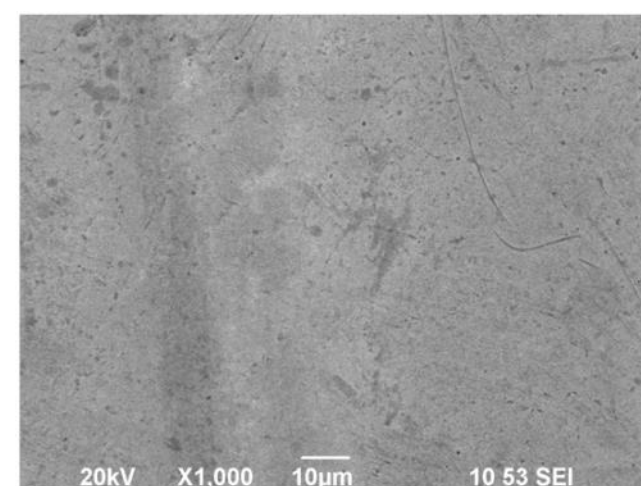
в)



г)



д)



е)

Рисунок 39 – Изображение поверхности образцов после ЭПП для различного соотношения $\text{NaF} : \text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$ при увеличении $\times 200$ и $\times 1000$: а, б) 8:0; в, г) 8:15; д, е) 8:20 г/л

- когда содержание $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ превышает порог 40 г/л, на краевых участках образцов фиксируется формирование дефектных структур. Они представляют собой возвышающиеся над основной плоскостью сферические выступы диаметром 10...15 мкм, имеющие в центре кратерообразное углубление, что зафиксировано на Рисунке 40.

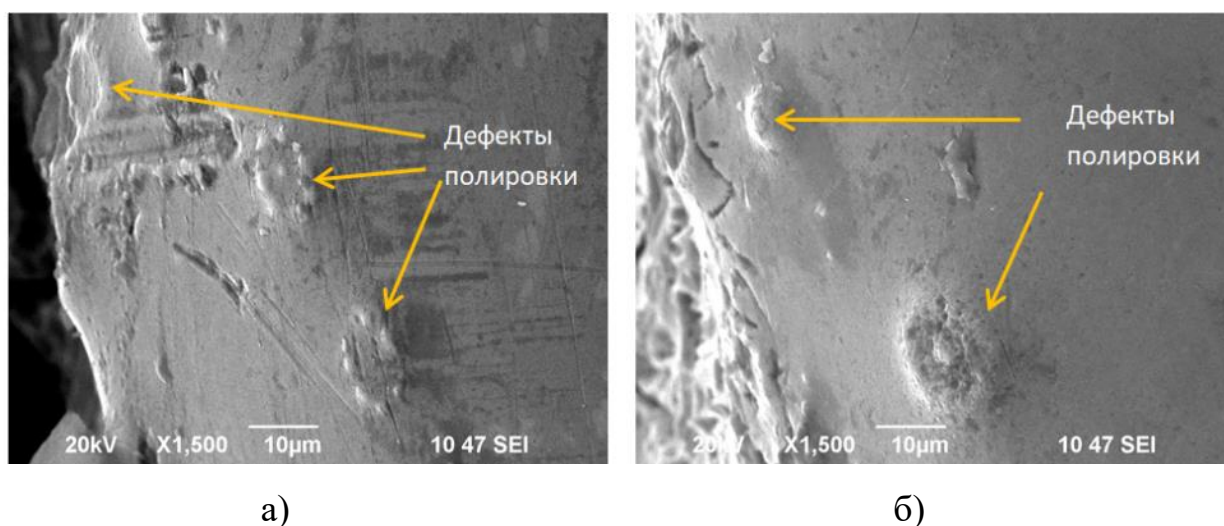


Рисунок 40 – Внешний вид дефектов, вызываемых избыточной концентрацией гидроксиламина солянокислого: а) NaF – 6 г/л, $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ – 40 г/л; б) NaF – 6 г/л, $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ – 70 г/л

4.4 Зависимость химического состава поверхностного слоя титанового сплава ВТ6 от состава РЭ

По данным обзорных РФЭ спектров (Рисунок 41, а), на всех обработанных образцах (см. Рисунок 31) идентифицирован ряд элементов. В их числе — базовые компоненты сплава ВТ6 (Ti, V, Al), а также сопутствующие примеси (N, O, C). Кроме того, в поверхностном слое зафиксировано присутствие составляющих РЭ (Ca, Na, F) и следов кремния.

На поверхности образцов № 1, 5 и 6 была обнаружена повышенная концентрация компонентов электролита, что можно объяснить наличием на них пористой оксидной пленки (см. Рисунок 38, а). Наличие на поверхности образцов кремния может быть связано с шаржированием поверхности абразивными частицами (Si-C) при их полировании абразивным материалом до операции ЭПО.

Анализ обзорного РФЭ спектра с поверхности образцов после ионной очистки аргоном (Рисунок 41, б), в результате которой происходит распыление поверхностного слоя толщиной порядка 10 нм, показал, что пики, соответствующие, кремнию пропадают, а интенсивность пиков, соответствующих компонентам электролита, становится меньше.

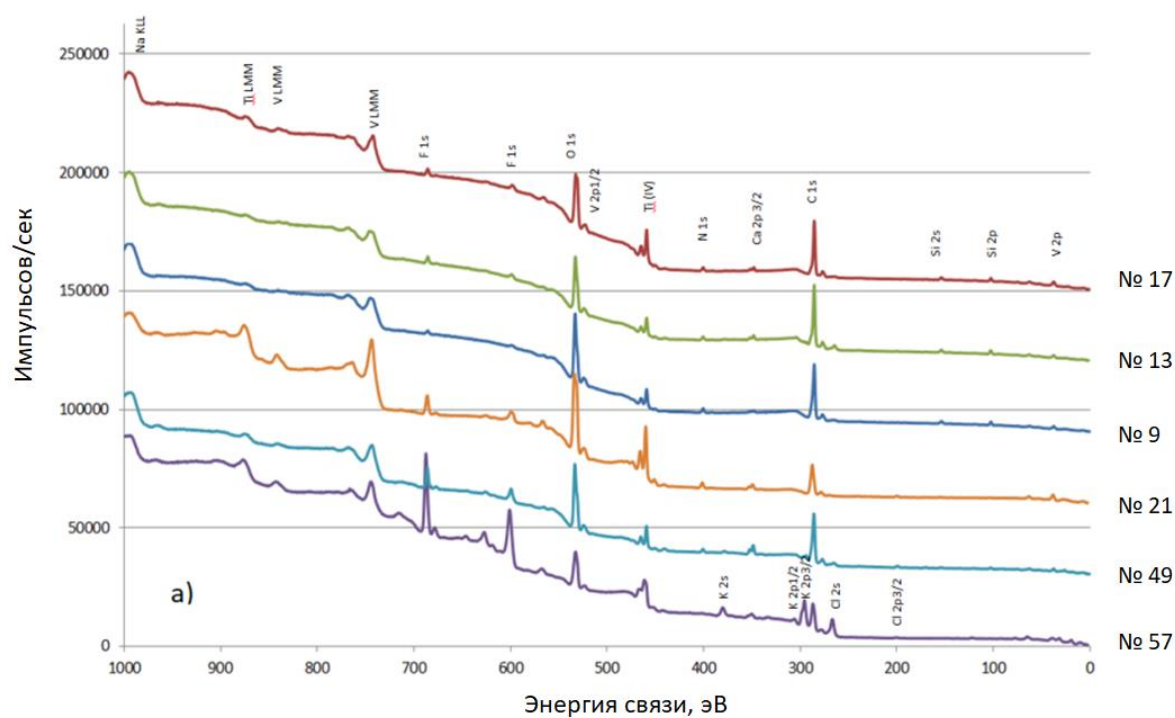
Совместный анализ РФЭ спектров титана (Рисунок 42, а) и кислорода (Рисунок 43, а) показал, что до ионной очистки на поверхности всех образцов, прошедших ЭПО присутствует оксид титана IV (пик Ti 2p с энергией связи 458,5 эВ и пик O 1s с энергией связи 531,0 эВ). Кроме того, наличие пика O 1s с энергией связи 532,5 эВ (Рисунок 43, а) свидетельствует о наличии на ней органических загрязнений (C-O), нитратов [109, 110]. Наличие плеча с энергией связи 460,0 эВ на образце №5 (Рисунок 42, а) может свидетельствовать о наличии на его поверхности небольшого количества фторида титана TiF_4 [110]. Ионная очистка поверхности образцов, сопряженная с удалением поверхностного слоя толщиной 10 нм, приводит к изменению формы спектров Ti 2p и O 1s (рисунок 42, б и рисунок 43, б). В спектре кислорода O 1s на всех образцах остается только один пик с энергией связи 531,0 эВ, соответствующий оксидам металлов. В спектре титана Ti 2p с поверхности образцов №14, 15 и 16, обработанных в присутствии $NH_2OH \cdot HCl$ в растворе, появляется пик с энергией связи 455,5 эВ, соответствующий оксиду титана II. В спектре титана Ti 2p образцов №1, 5 и 6 пик оксида титана IV после ионной очистки остается. Учитывая, что при окислении поверхности вышележащие слои имеют большую степень окисления, чем нижележащие [111], можно предположить, что данное наблюдение связано с формированием оксидной пленки большей толщиной в отсутствии или незначительном количестве $NH_2OH \cdot HCl$ в электролите.

Анализ спектра углерода C 1s (рисунок 44, а) показал наличие органики на поверхности образцов. При этом, ее концентрация на образцах №5 и №6 значительно ниже, чем на остальных образцах. В предположении, что пик O 1s (532,5 эВ) соответствует органическим загрязнениям следовало ожидать соответствующего уменьшения интенсивности этого пика для обоих указанных

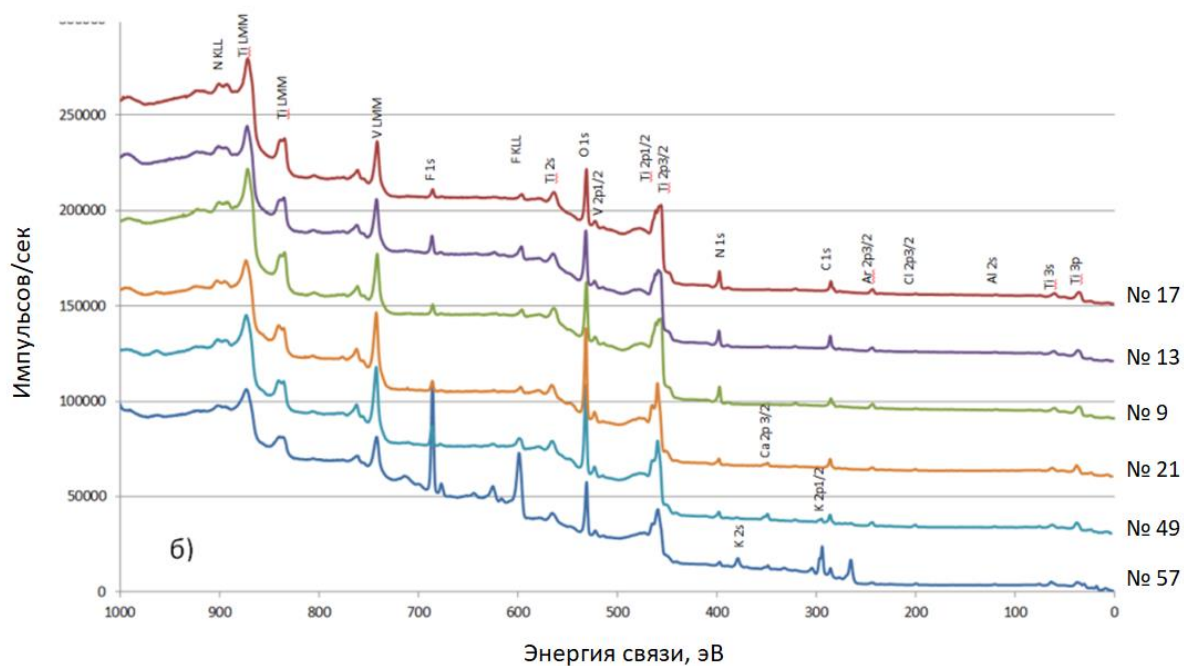
образцов (Рисунок 43, а). Однако, несмотря на большое количество углерода, пик с энергией связи 532,5 эВ на образце №5 отсутствует, что указывает в пользу соответствия этого пика нитратам, образование которых возможно в результате окисления гидроксилamina солянокислого. После ионной очистки (Рисунок 44, б) интенсивность пика C 1s значительно снижается в результате удаления органических загрязнений. Наличие плеча с энергией связи 282,2 эВ после ионной очистки (Рисунок 44, б), свидетельствует о наличии карбидов металлов на исследуемой поверхности [110], в том числе карбидов титана [3].

Наличие пика N 1s с энергией 400,0 эВ на образцах до ионной очистки (Рисунок 45, а) говорит о наличии на их поверхности адсорбированного азота и органики [110]. В результате ионной очистки данный пик смещается в область энергий 397,0 эВ, что в совокупности с наличием пика титана Ti 2p с энергией 455,5 эВ может свидетельствовать о наличии на поверхности образцов нитрида титана [112]. Атомы алюминия на поверхности всех образцов присутствует в виде оксидов (Рисунок 42), на что указывает положение пиков Al 2p с энергией связи 75,0 эВ. Ванадий на поверхности образцов после ЭПП находится в металлическом состоянии (пик V 2p_{3/2} с энергией связи 513,5 эВ на Рисунке 46).

Проведенные исследования поверхности образцов, обработанных при различном соотношении компонентов электролита, показали, что все они покрыты оксидной пленкой. При низкой концентрации $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ и NaF на поверхности формируются толстые пористые оксидные пленки с разной степенью окисления: темно фиолетовые пленки Ti_2O_3 и серо-бежевые пленки TiO_2 с примесью оксидов других металлов, входящих в состав сплава ВТ6. Повышение концентрации NaF в отсутствии $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ приводит к утонению оксидной пленки на поверхности, однако, достижения зеркального блеска не достигается. Увеличение концентрации $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$, при постоянной концентрации NaF, приводит к значительному утонению оксидных пленок, о чем говорит появление пиков Ti с меньшей степенью окисления на соответствующих РФЭ спектрах после ионной очистки.

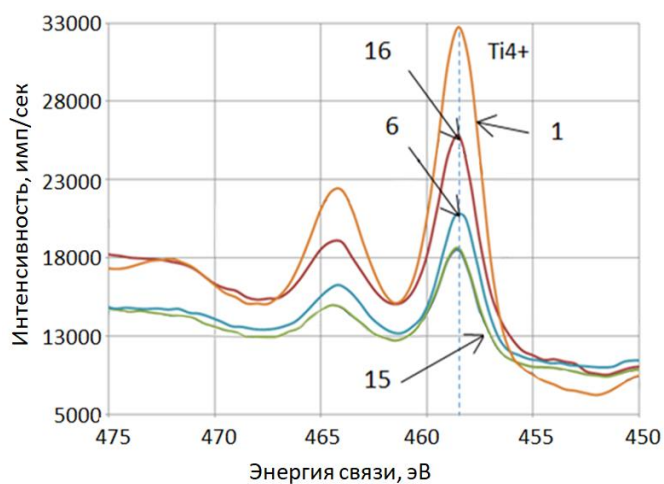


а)

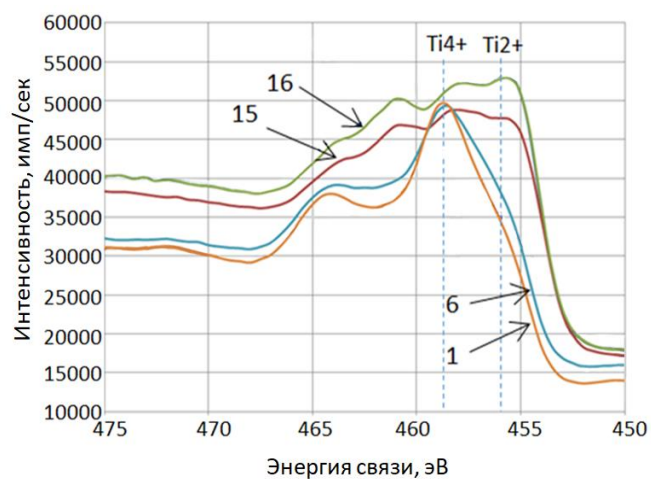


б)

Рисунок 41 – Обзорные РФЭ спектры с поверхности образцов из сплава ВТ6, обработанных при различном соотношении $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ и NaF в электролите (№57 – 0 и 15, №49 – 2,5 и 15, №21 – 25 и 4, №9 – 12,5 и 8, №13 – 35 и 8, №17 – 50 и 8 г/л): а) до ионной очистки, б) после ионной очистки

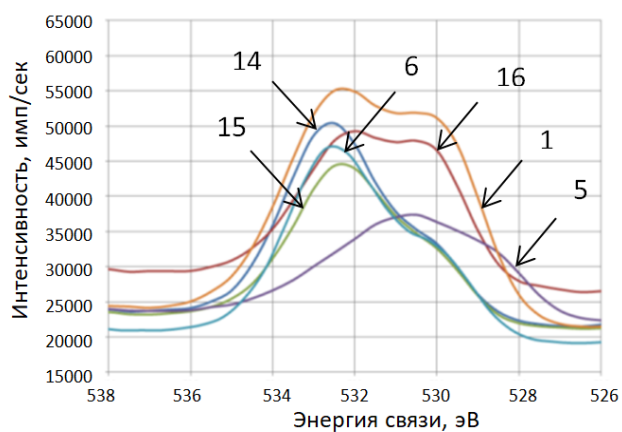


а)

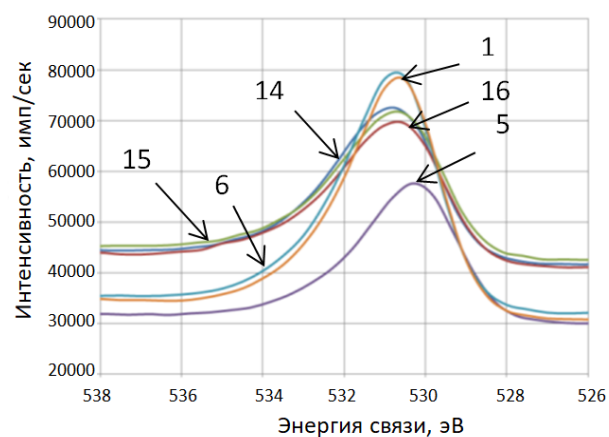


б)

Рисунок 42 – РФЭ спектры дублета титана Ti 2p для образцов: а) до ионной очистки, б) после ионной очистки

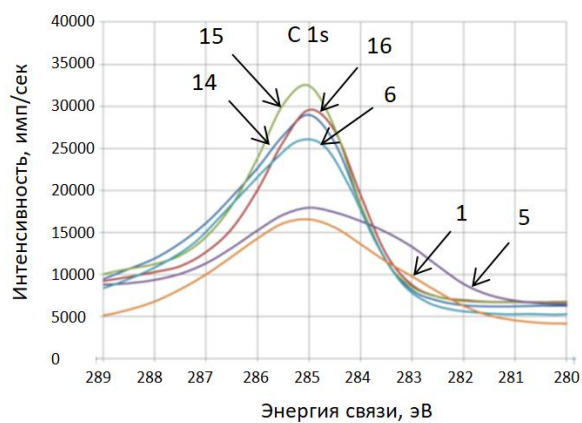


а)

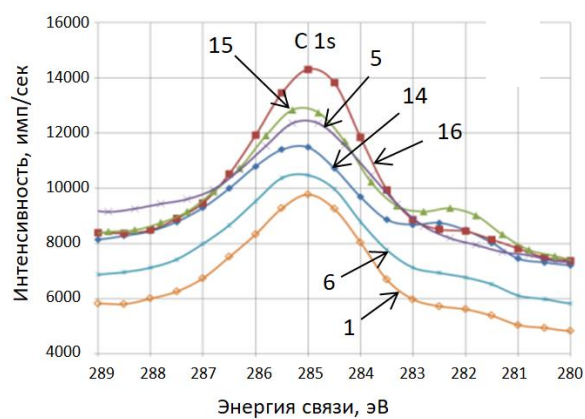


б)

Рисунок 43 – РФЭ спектры кислорода O 1s для образцов: а) до ионной очистки, б) после ионной очистки



а)



б)

Рисунок 44 – РФЭ спектр углерода C 1s: а) до ионной очистки, б) после ионной очистки

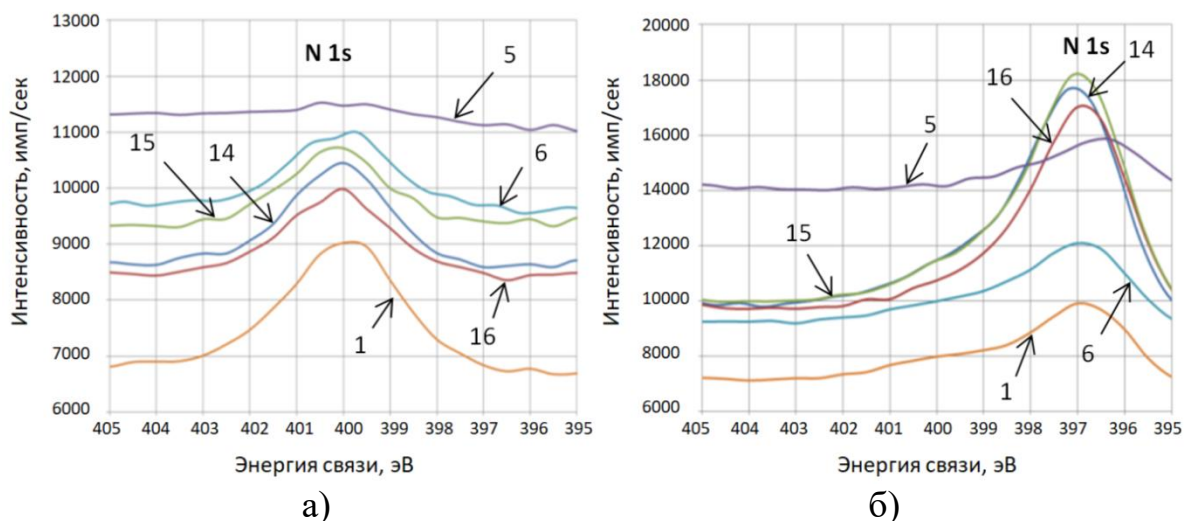


Рисунок 45 – РФЭ спектры азота N 1s для образцов: а) до ионной очистки, б) после ионной очистки

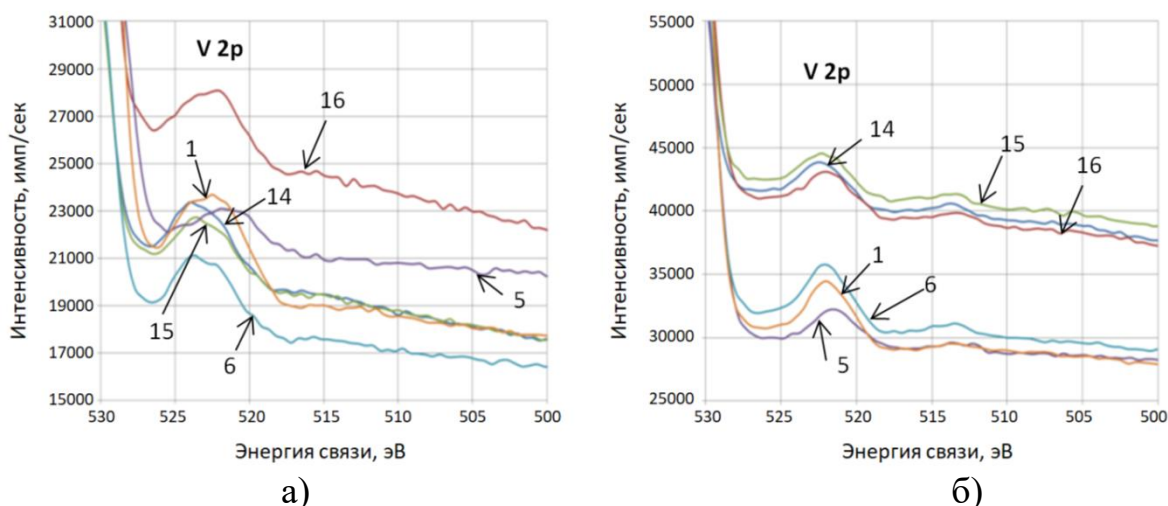


Рисунок 46 – РФЭ спектры ванадия V 2p для образцов: а) до ионной очистки, б) после ионной очистки

Выводы по главе 4

Проведено экспериментальное исследование влияния компонентного состава рабочего электролита на состояние поверхностного слоя, в рамках которого установлено:

1. снижение шероховатости и получение зеркального блеска по всей обрабатываемой поверхности пластин из сплава ВТ6 достигается при следующем соотношении $\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$ и NaF :

$$c(\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}) > 504,37 \cdot c(\text{NaF})^{-1,52}. \quad (37)$$

2. снижение шероховатости обрабатываемой поверхности в процессе ЭПП, без формирования на ней участков с толстой оксидной пленкой, обеспечивается в широком интервале соотношений концентрации фторида натрия и гидроксиламина солянокислого, обеспечивающих содержание HF в РЭ не менее 0,073 моль/л.
3. Анализ изменения внешнего вида образцов в ходе эксперимента по определению области концентраций компонентов РЭ позволил определить, что их кромки и нижний торец подвергаются более интенсивному окислению по сравнению с остальной поверхностью. Это проявляется в достижении зеркального блеска на них в последнюю очередь, по мере роста концентрации HF, что обусловлено двумя факторами: во-первых, локальное утонение парогазовой оболочки вызывает рост напряжённости электрического поля на этих участках; во-вторых, под действием высокой напряженности поля ускоряется миграция катионов металла через оксидный слой к его внешней границе, что приводит к увеличению толщины оксида именно на кромках [124].
4. Установлено, что потеря массы образцов и снижение шероховатости в процессе ЭПО не являются достаточными критериями протекания процесса полирования, т.к. первый фактор может быть обусловлен механическим разрушением толстых оксидных пленок, образующихся в процессе обработки, под воздействием гидродинамических воздействий, а снижение шероховатости может быть обусловлено ростом оксидных пленок во впадинах шероховатости.

ГЛАВА 5. ВЛИЯНИЕ ЭПП НА МИКРОГЕОМЕТРИЮ И ТОЧНОСТЬ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ, СТРУКТУРУ МАТЕРИАЛА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ И УСТАЛОСТНУЮ ПРОЧНОСТЬ

Результаты проведенных исследований (глава 4) наглядно показали, что в процессе обработки методом ЭПП наблюдается некоторая неравномерность физико-химических процессов вдоль площади обрабатываемой поверхности. В частности, результаты экспериментов с варьированием концентрации HF в рабочем электролите визуально показали, что интенсивность процесса окисления на кромках экспериментальных образцов выше, чем на остальных поверхностях. В результате этого, скорость растворения металла на них также выше, чем в центральной части плоской полируемой поверхности. Также обнаружено, что при ЭПП интенсивность процесса окисления и растворения образующихся окисных пленок на поверхности меняется по высоте образца [113]: участки поверхности, расположенные при обработке ближе к зеркалу электролита, окисляются с меньшей интенсивностью.

Эти закономерности процесса ЭПП известны и исследованы применительно к деталям из нержавеющей сталей [31,71], но для деталей из титановых сплавов не изучались, тогда как, их установление является очень важным для дальнейшей разработки технологического процесса обработки лопаток компрессора ГТД с использованием разработанного электролита.

В данной главе решается задача экспериментального апробирования метода ЭПП, с использованием **разработанного компонентного состава** рабочего электролита, на примере двухфазного титанового сплава ВТ6. Для проведения исследований было использовано следующее соотношение компонентов, удовлетворяющих выражению (37): NaF – 8 г/л, $\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$ – 20 г/л, KCl – 30 г/л.

5.1 Скорость растворения материала поверхностного слоя

Согласно литературным данным [71], процесс ЭПП сопровождается удалением слоя металла с обрабатываемой поверхности, толщина которого для стали 20Х13 составляет порядка 2,5...1,64 мкм/мин в интервале напряжений 250...350 В соответственно. На участках поверхности расположенных ближе к нижнему торцу полируемого образца, отмечается увеличение толщины удаляемого слоя металла с 2,5 до 3 мкм/мин (при напряжении 250 В). Соответствующая информация для ЭПП титановых сплавов в литературных источниках отсутствует.

Для определения толщины удаляемого металла при ЭПП титановых сплавов была проведена обработка 3-х прямоугольных пластин из сплава ВТ6 размером 50х140х4 мм, прошедших подготовку в соответствии с методикой, описанной в Главе 2. Пластины крепились за верхний торец и, после подачи потенциала, опускались в электролит на глубину 20 мм от верхнего торца до поверхности электролита. Продолжительность обработки методом ЭПП составляла 5 минут. Обработку первой пластины проводили при напряжении 280, второй при 290 и третьей при 310 В [113].

Анализ результатов измерения показал (Рисунок 47), что в процессе ЭПП скорость удаления металла вдоль обрабатываемой поверхности различна и в исследованном диапазоне может быть аппроксимирована степенной зависимостью:

$$\Delta H(Z) = 3,9 \cdot Z^{-0,129} \pm 0,5; \quad (38)$$

где: $\Delta H(Z)$ - скорость растворения металла на поверхности в мкм/мин;

Z – расстояние от нижнего торца в мм (Рисунок 49).

Максимальная скорость растворения наблюдается вблизи нижнего торца и составляет 3,9...4,2 мкм/мин. С увеличением расстояния Z от нижнего торца скорость растворения падает. На расстоянии более 20 мм от нижнего торца скорость растворения падает до 2,8...2,2 мкм/мин. Характер установленной зависимости такой же, как и для стали 20Х13 (Рисунок 48 [71]), однако скорость

растворения для титана выше [113]. Рассчитанная разница в скорости растворения металла вблизи нижнего торца и на значительном отдалении от нее для титанового сплава также выше и составляет 35...40 % против 20...25 % для стали 20Х13. Различие в скорости растворения при изменении напряжения в исследованном интервале 280...310 В не значительно и находится в пределах погрешности измерения.

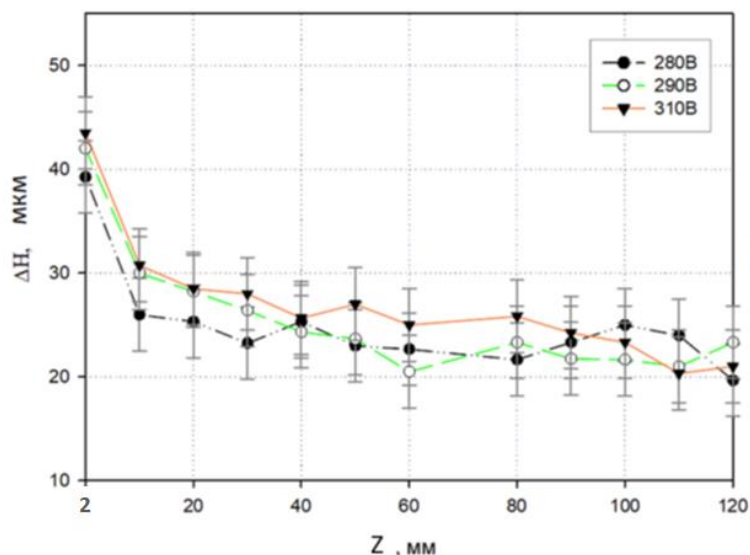


Рисунок 47 – График изменения толщины образцов из титанового сплава ВТ6 в нескольких сечениях на удалении Z от нижнего торца после 5 минут ЭПП для интервала напряжений обработки 280...310 В [113]

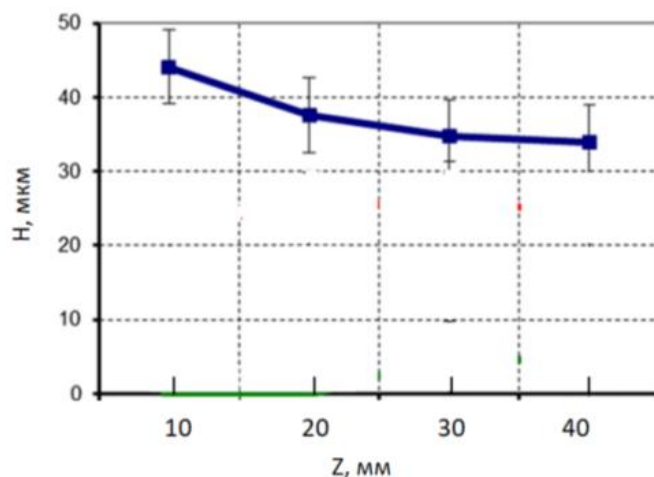


Рисунок 48 – Зависимость толщины снятого слоя (H) от расстояния Z от нижнего края образца. Данные получены методом 3D-профилометрии после электролитно-плазменной обработки стали 20Х13 по режиму: $U = 250$ В, $\tau = 15$ мин. [71]

Увеличение скорости растворения вблизи нижнего торца объясняется значительным утонением толщины ПГО, описанным в Главе 4, что приводит к росту напряженности электрического поля в зазоре между поверхностью металла и поверхностью электролита. В результате этого вблизи кромки процесс окисления идет интенсивнее.

Для проверки влияния величины гидростатического давления на толщину ПГО и на скорость растворения была проведена обработка 3-х прямоугольных пластин из сплава ВТ6 размером 20x140x4 мм, прошедших подготовку в соответствии с методикой, описанной в Главе 2. Крепление пластин осуществлялось за верхний торец. После подачи потенциала их последовательно опускали в электролит на разную глубину (расстояние от нижнего торца до зеркала электролита): первая — на 70 мм, вторая — на 130 мм, третья — на 200 мм (Рисунок 49) [113].

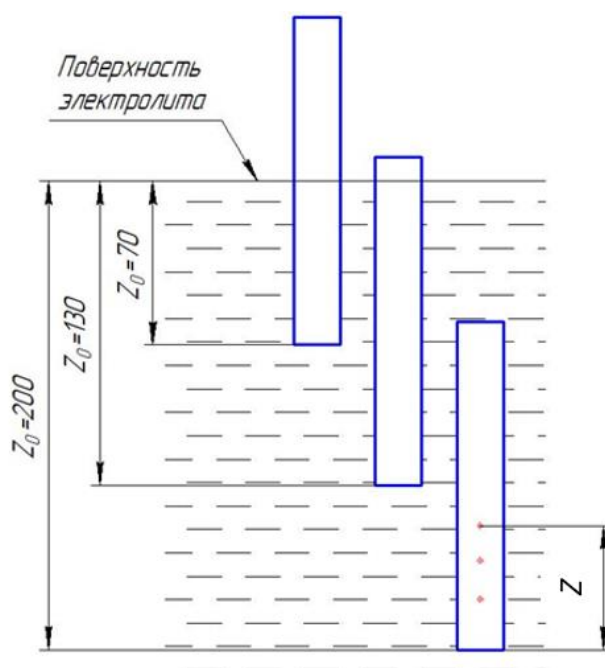


Рисунок 49 – Схема погружения образцов в электролит и позиции измерения их толщины [113]

Анализ экспериментальных данных (Рисунок 50) показывает, что на плоских поверхностях, отстоящих от нижнего торца более чем на 40 мм, скорость растворения слабо зависит от глубины погружения в электролит. Вблизи нижнего

торца с ростом глубины скорость увеличивается примерно на 15%. Важно, что при глубине свыше 130 мм гидростатическое давление перестаёт оказывать заметное влияние на ход кривой [113].

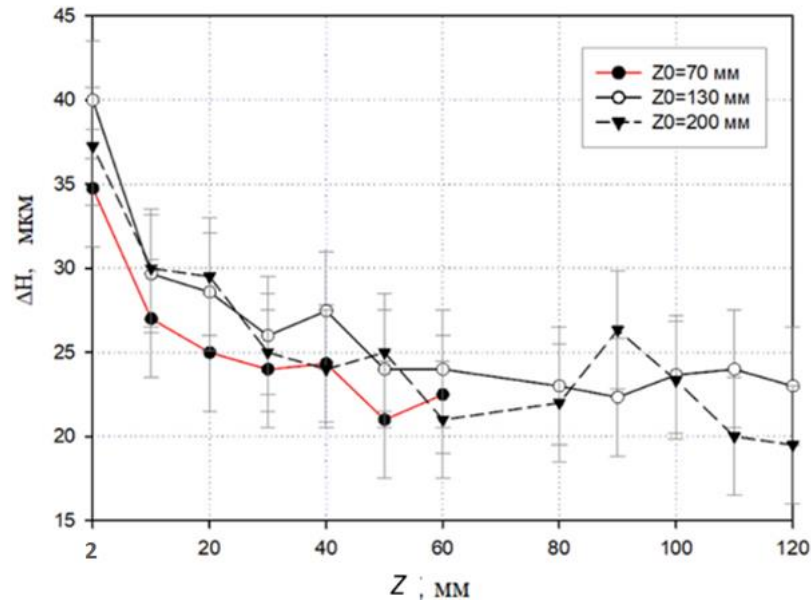


Рисунок 50 – Зависимость толщины удаляемого слоя от расстояния H до нижнего торца в зависимости от глубины погружения Z_0 для 5 минут ЭПП сплава ВТ6 [113]

5.2 Влияние времени обработки на радиус кромок

Выше было показано, что в процессе электролитно-плазменной обработки интенсивность процесса окисления на кромках выше, чем на остальных поверхностях (см. Главу 4). Это явление может иметь как негативные последствия, в виде повышенной скорости растворения кромок на тонкостенных деталях, так и положительные, в виде формирования радиусного закругления кромок и удаления заусенцев. Для учета и использования указанного явления было проведено исследование динамики изменения радиуса кромок в разработанном электролите.

Исследование проводили на образцах толщиной h , равной 1,0, 0,8 и 0,6 мм из сплава ВТ6, прошедших термообработку в соответствии с методикой, описанной в Главе 2. Форма образцов, имитирующих противоположно расположенные кромки пера лопаток, и схема их погружения в электролит

представлены на Рисунке 51. Выбранная ориентация образцов в электролите обусловлена целью получения постоянной величины радиуса вдоль кромок, что может быть достигнуто только при обеспечении одинаковых условий обработки вдоль всей их длины. Глубина погружения образцов в электролит составляла 50 мм от верхней кромки.

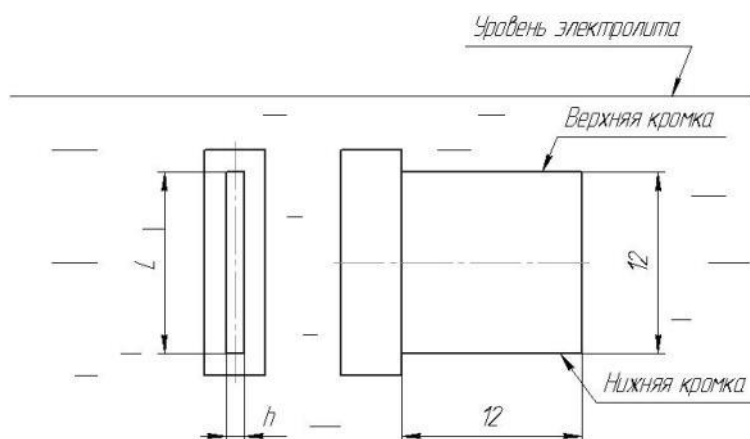


Рисунок 51 – Схема расположения образца в электролите

Общая продолжительность обработки составила 10 минут. Измерение радиуса кромок проводили через каждые 2 минуты ЭПП на торцевых шлифах, с использованием программно-аппаратного комплекса Thixomet (Рисунок 52). Результаты измерения радиусов кромок представлены на Рисунках 53, 54.

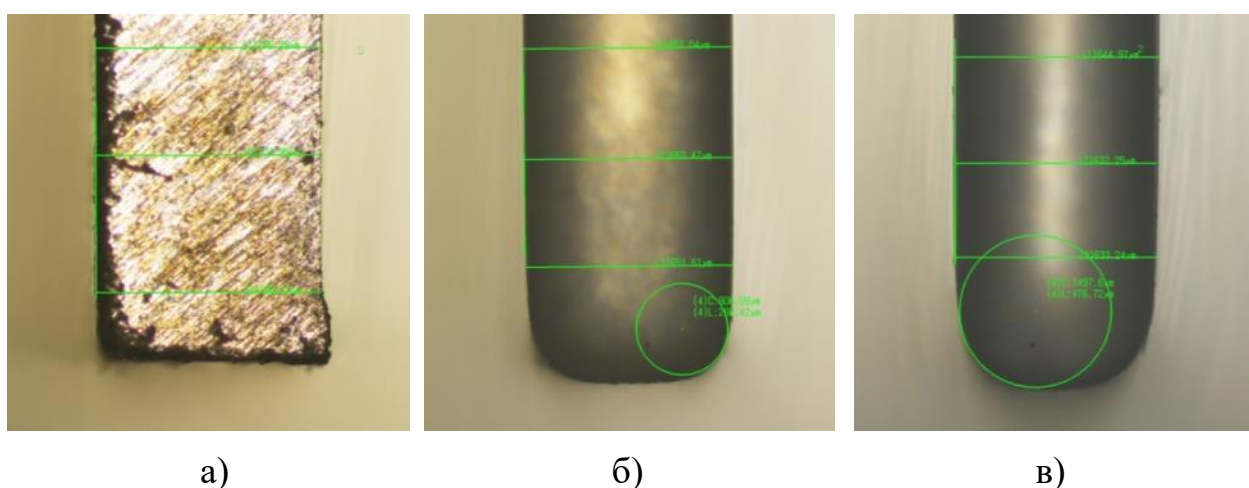


Рисунок 52 – Торцевое сечение имитатора кромок толщиной 0,6 мм: а) исх. состояние, б) через 4 минуты ЭПП, в) через 8 минут ЭПП

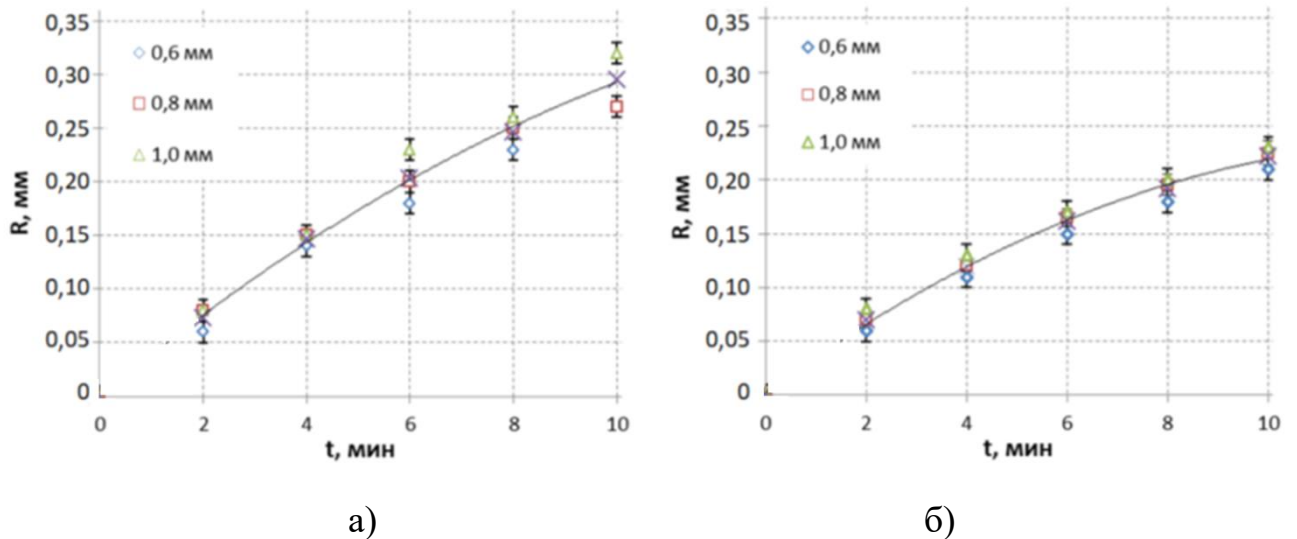


Рисунок 53 – Зависимость радиуса кромки от времени ЭПП для пластин из сплава ВТ6 толщиной 0,6; 0,8 и 1,0 мм: а) нижняя кромка, б) верхняя кромка

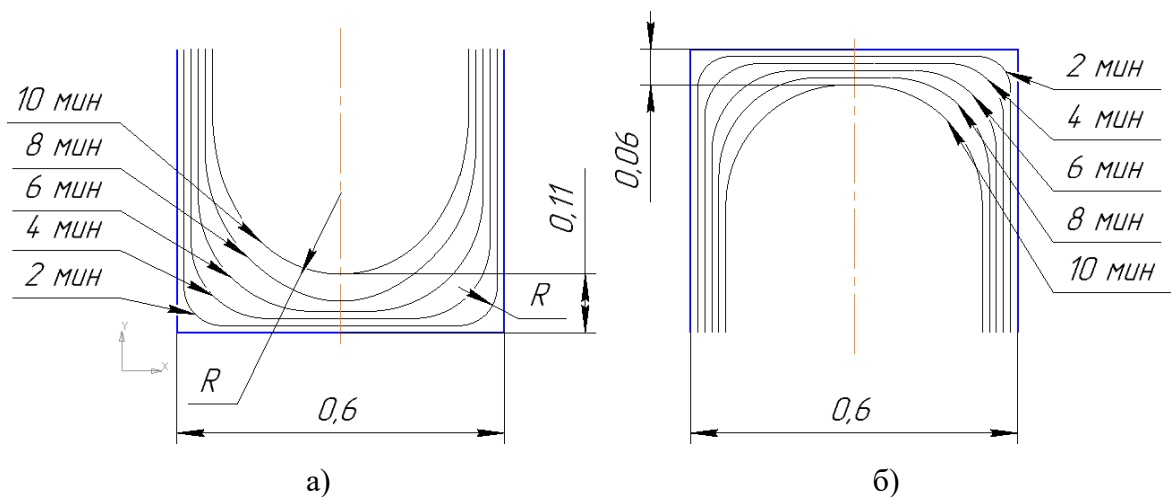


Рисунок 54 – Визуализация процесса формирования радиуса на кромке пластины толщиной 0,6 мм: а) на нижней кромке, б) на верхней кромке

Из построенных графиков зависимости величины радиуса от времени полирования и толщины образцов (см. Рисунок 53) видно, что скорость роста радиуса нижней кромки выше, чем верхней. Это хорошо объясняется известным явлением более интенсивного съема металла в единицу времени вблизи нижнего торца образца при ЭПП. Наблюдаемое замедление роста радиуса верхней и нижней кромок при увеличении длительности ЭПП (см. Рисунок 53, а) обусловлено уменьшением напряженности электрического поля на данных участках [31]. Также видно, что толщина экспериментальных образцов не

оказывает значительного влияния на скорость роста радиуса кромок: для каждого значения времени ЭПП среднеквадратическое отклонение данной величины для образцов толщиной 1,0; 0,8 и 0,6 мм не превышает величину чертежного допуска на радиус, равную $\pm 0,1$ мм.

Полученные экспериментальные данные по росту величины радиуса нижней и верхней кромки (см. Рисунок 53) в интервале 2...10 минут ЭПП могут быть представлены в виде регрессионных моделей (39 и 40) с целью их дальнейшего практического использования при разработке технологических процессов. Отсутствие влияния толщины образцов на скорость роста радиусов кромок позволило использовать однофакторную модель, а значения радиусов для разных толщин образцов использовать в качестве параллельных измерений.

$$R_{\text{низ}} = -0,0011t^2 + 0,0402t - 0,0003 \quad (39)$$

$$R_{\text{верх}} = -0,0012t^2 + 0,0341t + 0,0026 \quad (40)$$

где $R_{\text{верх}}$ – радиус верхней кромки, мм;

$R_{\text{низ}}$ – радиус нижней кромки, мм;

t – продолжительность ЭПП, мин.

Проверка адекватности полученных регрессионных моделей (39) и (40) экспериментальным данным проведена по F-критерию Фишера [122, 123]. F-статистика вычислялась по формуле:

$$F_{\text{расч}} = \frac{S_{\text{НЕАД}}^2}{S_{\text{ВОСПР}}^2} \quad (41)$$

где $S_{\text{НЕАД}}^2$ – дисперсия неадекватности (42);

$S_{\text{ВОСПР}}^2$ – дисперсия воспроизводимости (ошибка эксперимента) (43).

Дисперсию неадекватности и воспроизводимости вычисляли по формулам:

$$S_{\text{НЕАД}}^2 = \frac{n \sum_{j=1}^N (\bar{Y}_j - \hat{Y}_j)^2}{N - p} \quad (42)$$

$$S_{\text{ВОСПР}}^2 = \frac{\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^n (Y_{ij} - \bar{Y}_j)^2}{N(n-1)} \quad (43)$$

где: $\bar{Y}_j$ – среднее значение отклика по трём измерениям;

$\hat{Y}_j$ – значение отклика, предсказанное регрессионной моделью;

Y_{ij} – измеренное значение отклика;

N – количество опытов (равно 5);

n – количество повторных измерений (равно 3);

p – количество коэффициентов регрессии (равно 3).

Полученное расчетное значение $F_{\text{РАСЧ}}$ сравнивали с критическим значением $F_{\text{КРИТ}}$ распределения Фишера. Значение $F_{\text{КРИТ}}$ определяли при уровне значимости $\alpha=0,05$ и числах степеней свободы: для числителя (41) $f_1 = N - p = 2$, для знаменателя (41) $f_2 = N(n - 1) = 10$. По данным таблицы [122] $F_{\text{КРИТ}}$ составило 4,1.

Расчетное значение F-критерия Фишера для уравнения регрессии радиуса нижней кромки составило 3,45 (Таблица 12), для верхней кромки 3,63 (Таблица 13), что меньше критического значения $F_{\text{КРИТ}}=4,10$ при $\alpha=0,05$, $f_1 = 2$ и $f_2 = 10$. Следовательно, модели можно считать адекватными экспериментальным данным на 5%-м уровне значимости.

Таблица 12 – Параметры расчета F-критерия Фишера для уравнения регрессии радиуса нижней кромки

X_j	Y_{1j}	Y_{2j}	Y_{3j}	$\bar{Y}_j$	$\hat{Y}_j$	$S_{\text{ВОСПР}}^2$	$S_{\text{НЕАД}}^2$	$F_{\text{РАСЧ}}$
2	0,06	0,08	0,08	0,07	0,08	0,0005	0,0018	3,45
4	0,14	0,15	0,15	0,15	0,14			
6	0,18	0,2	0,23	0,20	0,20			
8	0,23	0,25	0,26	0,25	0,25			
10	0,24	0,27	0,32	0,28	0,29			

Таблица 13 – Параметры расчета F-критерия Фишера для уравнения регрессии радиуса верхней кромки

X_j	Y_{1j}	Y_{2j}	Y_{3j}	$\bar{Y}_j$	$\hat{Y}_j$	$S^2_{\text{ВОСПР}}$	$S^2_{\text{НЕАД}}$	$F_{\text{РАСЧ}}$
2	0,060	0,070	0,080	0,07	0,07	0,0001	0,0004	3,63
4	0,110	0,120	0,130	0,12	0,12			
6	0,150	0,165	0,170	0,16	0,16			
8	0,180	0,195	0,200	0,19	0,20			
10	0,210	0,225	0,230	0,22	0,22			

5.3 Влияние времени ЭПП на шероховатость обрабатываемой поверхности

Известно, что шероховатость изделий из нержавеющей и железоникелевых сплавов в процессе ЭПП изменяется по экспоненциальному закону, а ее минимальная достигаемая величина определяется исходным значением [40]. Указанная информация имеет важное значение для разработки технологического процесса обработки, т.к. позволяет правильно назначить требования к предыдущим операциям и определить продолжительность самой операции ЭПП. Однако для титановых сплавов указанные зависимости ранее не устанавливались.

Динамику изменения шероховатости в результате обработки методом ЭПП титанового сплава ВТ6 исследовали на 2-х группах образцов, с шероховатостью R_a 0,4 и 0,25 мкм, измеренной при отсечке шага 0,25 мм. Глубина погружения образцов в электролит составляла 20 мм от его поверхности. Измерение параметров шероховатости проводили с интервалом в 1 минуту. Общее время полирования составило 6 минут. Измерение шероховатости производили в центральной части образца, в направлении, перпендикулярном направлению рисок шероховатости.

Как видно из построенных графиков (Рисунок 55), динамика изменения шероховатости для титанового сплава ВТ6 имеет экспоненциальный характер, аналогичный динамике изменения шероховатости для железоникелевых сплавов в

процессе ЭПП (см. Главу 1): наибольшая интенсивность снижения шероховатости R_a соответствует первым 2-м минутам обработки, после чего она снижается и стремится к некоторому значению, величина которого пропорциональна начальной шероховатости.

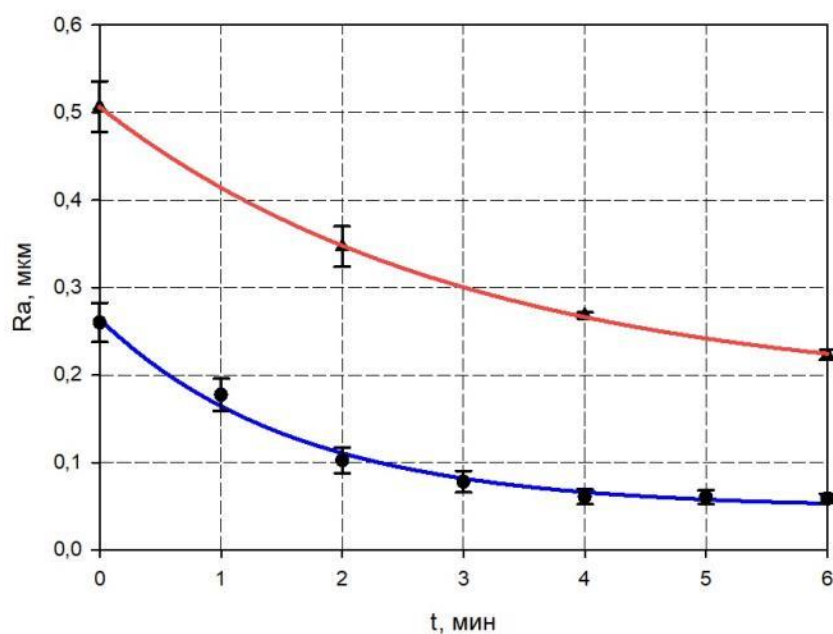


Рисунок 55 – Динамика изменения параметра шероховатости R_a в процессе ЭПП для образцов из сплава ВТ6 с исходной шероховатостью R_a 0,27 и 0,50 мкм.

Дополнительно проведенные измерения при минимальной отсечке шага прибора, равной 0,08 мм (Рисунок 56), на образце с исходной шероховатостью R_a 0,4 мкм, показали, что после 4 минут полирования параметр R_a достигает значения 0,02...0,025 мкм и более не уменьшается. В течение того же времени полирования наблюдается значительное снижение параметра R_a , измеряемого при отсечке шага 0,25 мм (см. Рисунок 55), после чего динамика этого процесса значительно снижается, но предельное значение не достигается. Причиной наблюдаемой закономерности может быть наличие на поверхности основного профиля шероховатости местных выступов, вклад от которых в величину параметра R_a можно оценить только на короткой базовой длине. Ввиду значительно меньших размеров, скорость растворения местных выступов гораздо выше и за 4 минуты обработки происходит их максимальное растворение (Рисунок 57). Значение R_a , зафиксированное при отсечке шага 0,08 мм,

характеризует нижнюю границу шероховатости поверхности, достижимую при электролитно-плазменном полировании материала исследуемого образца.

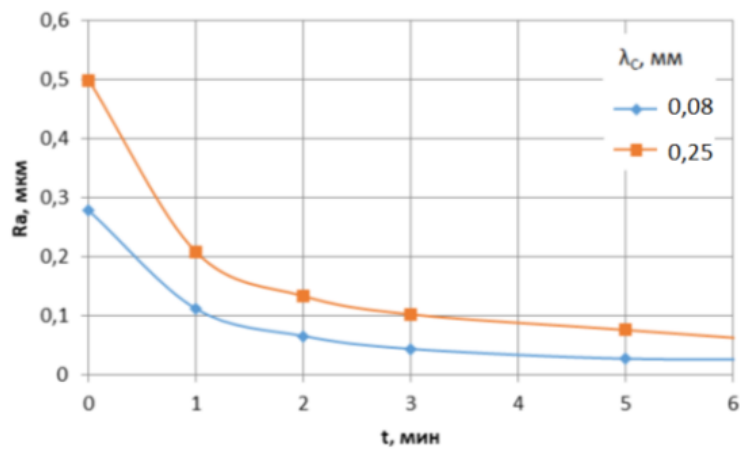


Рисунок 56 – Сопоставительная оценка изменения параметра Ra на образце ВТ6 в зависимости от заданной отсечки шага (0,08 мм против 0,25 мм) при ЭПП

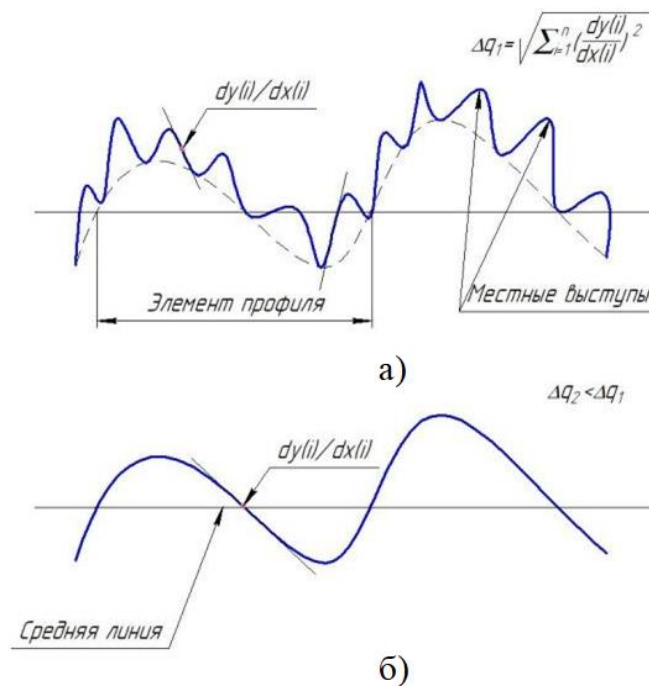


Рисунок 57 – Условное изображение элемента основного профиля с локальными пиками: а) до ЭПП, б) после ЭПП

Высокая скорость снижения шероховатости в первые минуты обработки за счет удаления местных выступов проявляется также, в резком падении среднего квадратического наклона профиля Δq . Согласно методике расчета указанного

параметра, наличие большого количества местных выступов значительно увеличивает его значение (см. Рисунок 57). Измерение среднего квадратического наклона профиля на образцах с исходной шероховатостью R_a 0,4 мкм показало, что при всех использованных значениях отсечки шага его максимальное снижение наблюдается за 2 минуты обработки (Рисунок 58), что является прямым следствием быстрого растворения местных выступов и ранее было показано в работе [31] для нержавеющей сталей. После 4-х минут ЭПП снижение величины Δq прекращается, что совпадает по времени с достижением минимального значения параметра R_a при отсечке шага 0,08 мм (см. Рисунок 56).

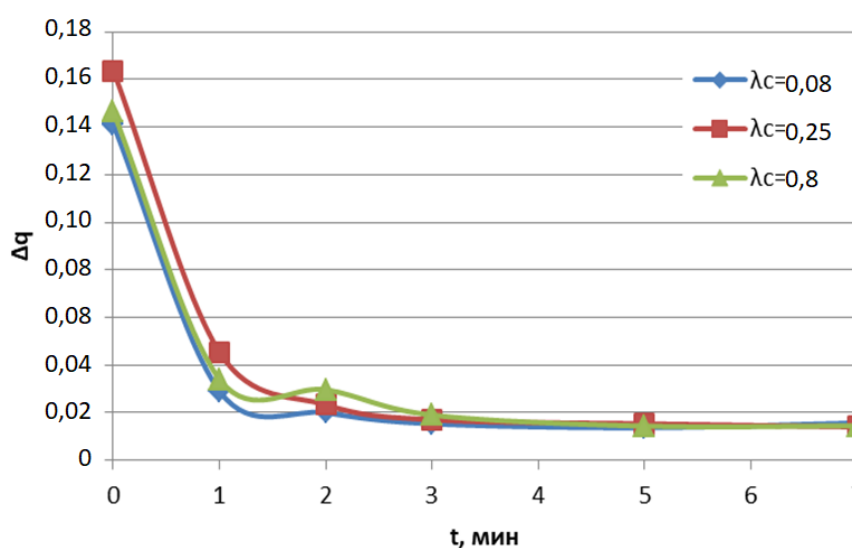


Рисунок 58 – График изменения среднего квадратического наклона профиля Δq для образца из сплава ВТ6 с исходной шероховатостью R_a 0,4 мкм

Ввиду большей скорости растворения титанового сплава ВТ6 (порядка 2,5 мкм/мин), по сравнению со скоростью растворения сплава 20Х13 (1,2 мкм/мин [71]), минимальное значение среднеквадратичной шероховатости R_q для него достигается за более короткое время полировки. Это наглядно подтверждается сопоставлением динамических кривых на Рисунке 58 и Рисунке 59 (по данным [31]), особенно в зоне, расположенной выше 35 мм от нижнего торца.

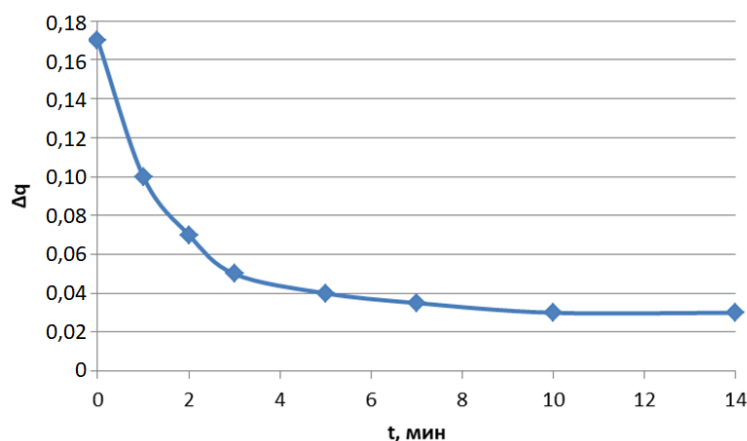


Рисунок 59 – Влияние продолжительности ЭПП на средний квадратический наклон профиля поверхности образца из стали 20Х13 (Ra 0,53 мкм) [31]

5.4 Влияние глубины погружения на изменение шероховатости в процессе ЭПП

Учитывая описанную выше зависимость толщины удаляемого слоя от расстояния до нижнего торца полируемой детали, возникает вопрос равномерности процесса полирования по высоте обрабатываемой детали. В связи с этим была исследована динамика снижения шероховатости в нескольких сечениях, расположенных на расстоянии 10, 20, 30, 40 и 50 мм от нижнего торца полируемого образца, имеющего исходную шероховатость Ra 0,4 мкм. Образец погружался в электролит так, чтобы направление рисок шероховатости было вертикальным, а расстояние от верхнего торца образца до поверхности электролита составляло 20 мм (Рисунок 60). Сравнение эффективности полирования в различных сечениях проводили по величине относительного сглаживания поверхности ΔRa и ΔRz после 2 минут обработки, т.к. в этом временном диапазоне она максимальна, но предельное (минимальное) значение шероховатости при этом еще не достигается (см. Рисунок 56).

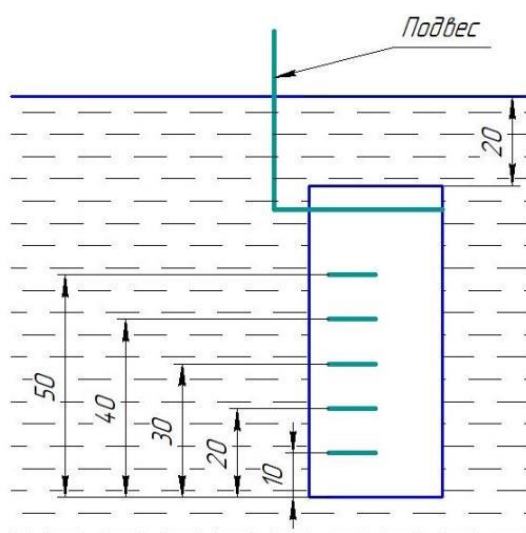


Рисунок 60 – Схема расположения мест замера шероховатости

Измерения показали, что наибольшее значение относительного сглаживания достигается в непосредственной близости от нижнего торца, а по мере удаления от него этот показатель снижается. На расстоянии, превышающем 20 мм от нижнего торца, величина относительного сглаживания становится постоянной.

Как видно из Рисунков 61 и 62, разброс значений относительного сглаживания достигает 15 % для параметра R_a и 20 % для R_z . Это напрямую связано с тем, что вблизи нижнего торца обрабатываемого образца скорость растворения выше, что, в свою очередь, объясняется меньшей толщиной парогазовой оболочки на данном участке.

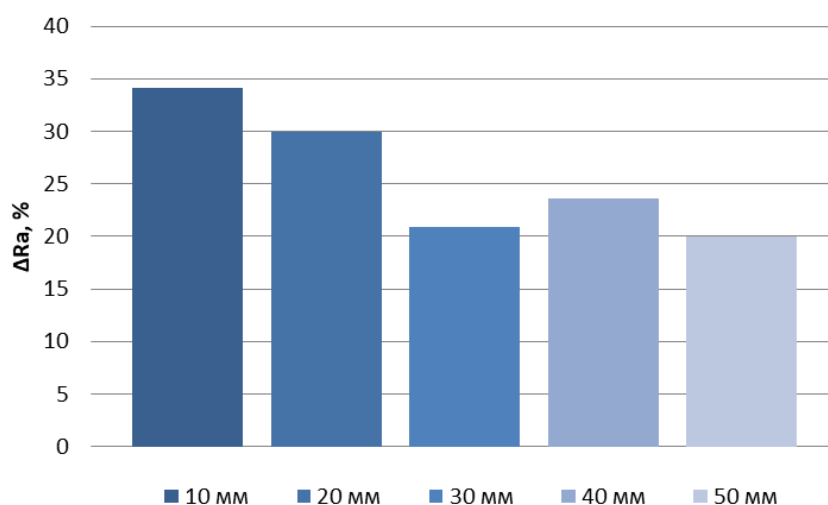


Рисунок 61 – Изменение относительного сглаживания ΔR_a с расстоянием Z от нижнего торца при времени ЭПП 2 мин.

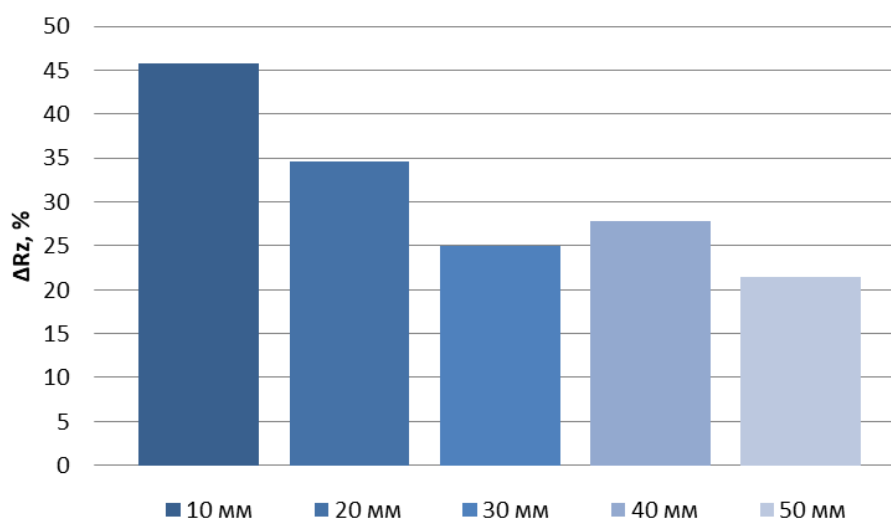


Рисунок 62 – Изменение относительного сглаживания ΔR_z с расстоянием Z от нижнего торца при времени ЭПП 2 мин.

5.5 Влияние ЭПП на микроструктуру материала поверхностного слоя

Наличие температурного и механического воздействия на поверхность в процессе ЭПП оценивали по изменению ее микротвердости и микроструктуры.

Измерение микротвердости проводили на поверхности образцов в состоянии после механического полирования и после механического полирования с последующим проведением ЭПП согласно методике, описанной в Главе 2. Продолжительность операции ЭПП составляла 1, 3 и 5 минуты. Результаты измерений представлены в Таблице 14.

Таблица 14 – Величина микротвердости поверхностного слоя, кгс/мм²

Нагрузка, Н	Глубина отпечатка, мкм	Продолжительность ЭПП, мин			
		0	1	3	5
0,98	4,87	334±7	330±7	334±7	332±7
0,49	3,56	322±7	330±7	332±7	331±7
0,196	2,19	325±7	328±7	339±7	336±7

Анализ результатов измерений показал незначительное увеличение микротвердости поверхности по сравнению с исходным состоянием (Рисунок 63),

что указывает на отсутствие избирательного растворения структурных составляющих материала поверхностного слоя.

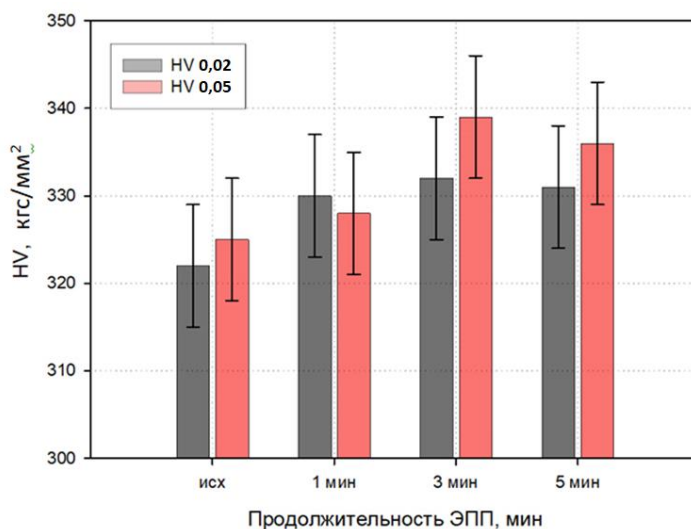


Рисунок 63 – Изменение микротвердости поверхностного слоя образцов из сплава ВТ6 в зависимости от продолжительности ЭПП

Влияние ЭПП на микроструктуру поверхностного слоя исследовали методом фазового рентгеноструктурного анализа (РСА) на тех же образцах, что использовались для исследования микротвердости в исходном состоянии и после обработки ЭПП в течение 5 минут.

Результаты измерений представлены на Рисунке 64 и в Таблице 15. Анализ результатов измерений не выявил существенных изменений в микроструктуре материала в поверхностном слое после обработки методом ЭПП. Рентгенограммы с поверхности до и после проведения ЭПП включают в себя набор основных рентгеновских пиков с индексами Миллера ($10\bar{1}0$), (0002), ($10\bar{1}1$), ($10\bar{1}2$), ($11\bar{2}0$), ($10\bar{1}3$), ($11\bar{2}2$) и ($20\bar{2}1$), соответствующих ГПУ решетке чистого α -Ti и набор пиков с индексами Миллера (110), (200), (211), (220), характерных для ГЦК решетки β -Ti (Рисунок 64). Рассчитанные методом Ритфелда (с использованием ПО PDWin) параметры a и c ГПУ-решетки α -фазы, а также плотности дислокаций, после проведения ЭПП, существенно не отличаются от таковых в исходном состоянии (Таблица 15). Различие в величине параметров a и c ГПУ решетки составляет менее 0,1 % а плотности дислокаций менее 1 %.

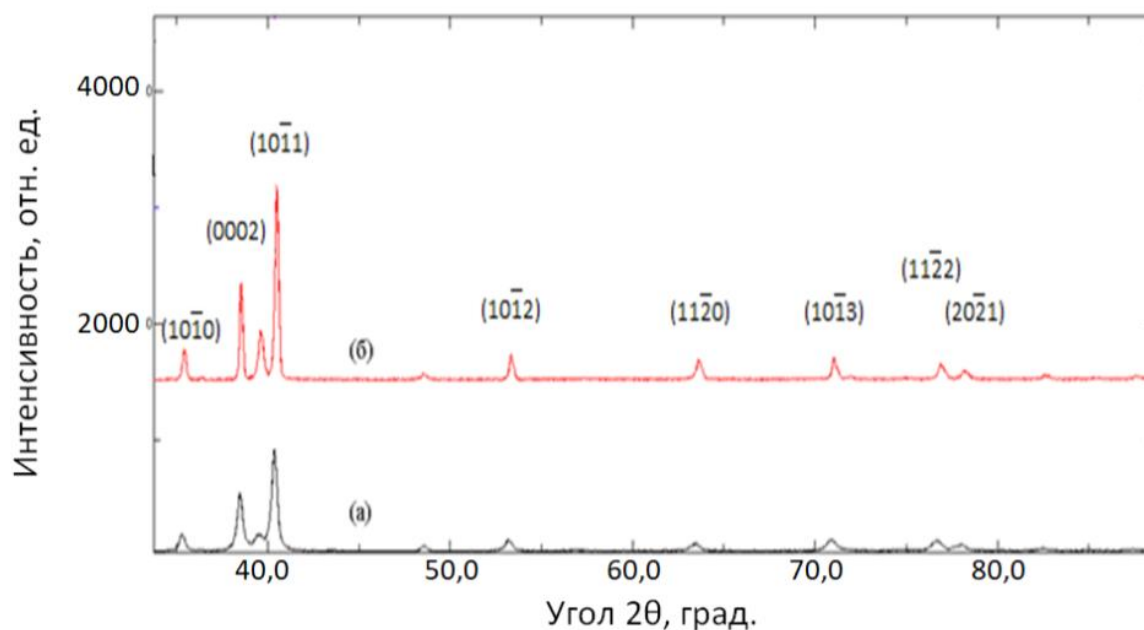


Рисунок 64 – Рентгенограммы поверхностного слоя титанового сплава ВТ6:
а) до ЭПП, б) после ЭПП

Таблица 15 – Параметры микроструктуры, полученные методом РСА

Состояние	Параметр решетки α , Å	ОКР, нм	$\langle \varepsilon^2 \rangle, \times 10^{-4}$	$\rho, 10^{14} \text{ м}^{-2}$	Содержание β фазы, %
До ЭПП	$a = 2,9266$ $c = 4,6670$	27,4	21,3	9,1	13,6
После ЭПП	$a = 2,92316$ $c = 4,6710$	28,0	22,1	9,0	13,5

5.6 Анализ возможности наводороживания поверхностного слоя

Среди всех химических элементов, входящих в составы металлических материалов авиационного назначения, водород является одной из наиболее вредных примесей, главной особенностью которого является малая энергия активации диффузии в отличие от атомов кислорода или азота. При внедрении водорода в кристаллическую решетку происходит интенсивное охрупчивание и, как следствие, снижение механических характеристик материалов [88, 114]. Учитывая, возможность анодного электрохимического механизма растворения в процессе ЭПП, сопровождающегося выделением водорода, большой интерес

представляет исследование возможности его наличия в поверхностном слое образцов из титанового сплава ВТ6.

Измерение концентрации водорода в поверхностном слое проводили оптико-эмиссионным методом в соответствии с ОСТ1 90034–81 «Сплавы титановые». Измерение проводили в трех сечениях, расположенных на различном расстоянии от нижнего торца пластин из сплава ВТ6 размером 70х20х4 мм (Рисунок 65). Измерения показали, что максимальная концентрация водорода после электролитно-плазменной обработки в режиме полирования не превышает исходного значения после полирования войлочными кругами с абразивом (Таблица 16). При этом, можно отметить, что вблизи нижнего торца его концентрация в поверхностном слое ниже, чем в верхних сечениях (Таблица 16). Причиной такого характера распределения водорода может быть описанное выше увеличение скорости растворения обрабатываемого материала вблизи нижнего торца в процессе электролитно-плазменного полирования.

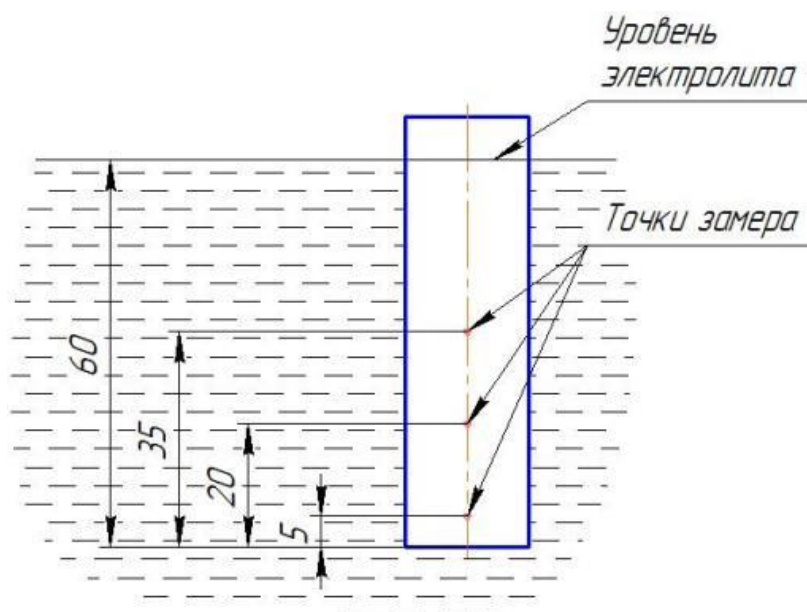


Рисунок 65 – Схема расположения образца в процессе ЭПП и точек замера концентрации водорода

Учитывая безусловное выделение при ЭПП водорода, его низкая концентрация в поверхности может быть объяснена высокой скоростью растворения материала поверхности, равной 3...4 мкм/мин в сравнении со скоростью его диффузии, а также образованием на гладкой полированной

поверхности сплошной бездефектной оксидной пленки [115], уменьшающей скорость его сорбции в несколько раз [116].

Таблица 16 – Содержание водорода в поверхностном слое сплава ВТ6 после плазменного полирования, % масс

Расстояние от нижнего торца образца до точки замера, мм	Содержание водорода, % масс ($\pm 15\%$)		
	Исходное содержание, на поверхности	ЭПП, 5 мин.	
		На поверхности	На глубине 1 мм от поверхности
35	0,007	0,007	0,003
20	0,006	0,005	0,003
5	0,007	0,003	0,003

5.7 Влияние ЭПП на усталостную прочность конструктивно-подобных образцов

Влияние ЭПП на усталостную прочность исследовали методом «лестницы» на образцах, изготовленных в соответствии с методикой, описанной в Главе 2. Образцы погружались в электролит вертикально, утолщенной частью вниз. Шероховатость рабочей поверхности образцов до и после ЭПП в течение 5 минут составляла Ra 0,60 и Ra 0,30 мкм. Место закрепления образцов в оснастке указано на Рисунке 66. Результаты испытаний представлены в Таблицах 17 и 18.

Параметры, необходимые для расчёта среднего предела выносливости, приведены в Таблице 19. Средний предел выносливости на базе 20×10^6 циклов для образцов из сплава ВТ6 после механического полирования и после операции ЭПП, рассчитанный по формуле (9), составил 500 ± 5 и 520 ± 5 МПа соответственно. Установленное повышение предела выносливости может быть связано со

снижением высоты микронеровностей поверхностного слоя и формированием радиуса на кромках.



Рисунок 66 – Внешний вид образцов для усталостных испытаний до и после ЭПП

Таблица 17 – Результаты усталостных испытаний исследуемых образцов из сплава ВТ6 после механического полирования

№ п/п	Напряжение	Частота f , Гц		Число наработанных циклов N	Результаты испытаний
	$\sigma \pm 1\%$, МПа	начало	конец		
1	460	1238	1238	20×10^6	Не разрушился
2	500	1262	1230	20×10^6	Не разрушился
3	540	1280	1278	$1,5 \times 10^6$	Сломался
4	500	1240	1240	14×10^6	Сломался
5	460	1200	1200	20×10^6	Не разрушился
6	500	1232	1200	20×10^6	Не разрушился

Таблица 18 – Результаты усталостных испытаний исследуемых образцов из сплава ВТ6 после плазменного полирования

№ п/п	Напряжение	Частота f , Гц		Число наработанных циклов N	Результаты испытаний
	$\sigma \pm 1\%$, МПа	начало	конец		
1	460	1226	1226	20×10^6	Не разрушился
2	500	1136	1134	20×10^6	Не разрушился
3	540	1200	1170	$0,3 \times 10^6$	Сломался
4	500	1179	1179	20×10^6	Не разрушился
5	540	1231	1200	$0,2 \times 10^6$	Сломался
6	500	1237	1210	20×10^6	Не разрушился

Таблица 19 – Сводная таблица числа разрушений и не разрушений

	$\sigma \pm 1\%$, МПа	Номера образцов по порядку						Количество событий*	
		1	2	3	4	5	6	Р	Н
До ЭПП	460	Н				Н		0	2
	500		Н		Р		Н	1	2
	540			Р				1	0
N								2	4
5 мин ЭПП	460	Н						0	1
	500		Н		Н		Н	1	3
	540			Р		Р		2	0
N								2	4

Примечание: Р- разрушение, Н - не разрушение

Выводы по главе 5

Для разработанного компонентного состава рабочего электролита экспериментально установлено:

1. Степенная зависимость скорости растворения поверхностного слоя сплава ВТ6 от расстояния до нижнего торца образца: у торца — 4,0 мкм/мин, на удалении более 20 мм — 2,8...2,2 мкм/мин. Значимого влияния напряжения в интервале 280...310 В на скорость растворения не выявлено;

2. Регрессионные модели изменения радиуса верхней и нижней кромок образцов, позволяющие назначать время ЭПП лопаток компрессора при разработке технологического процесса;

3. Отсутствие разупрочнения поверхностного слоя образцов из сплава ВТ6 предварительно обработанных полировальными кругами с абразивом (по данным микроструктурных и усталостных испытаний);

4. Отсутствие наводороживания поверхностного слоя благодаря высокой скорости растворения (2,2...4,0 мкм/мин) и формированию сплошной оксидной плёнки, служащей диффузионным барьером для водорода.

ГЛАВА 6. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА ГТД ИЗ ДВУХФАЗНЫХ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ОПЕРАЦИИ ЭПП

С учетом требований конструкторской документации на лопатки компрессора ГТД, разрабатываемый технологический процесс финишной обработки должен обеспечивать низкие значения шероховатости обработанной поверхности, высокие требования по точности обработки, а также высокую стабильность получаемого результата. Кроме того, актуальной является задача обеспечения равномерного радиуса во всей длине входной и выходной кромок пера и очистки (обезжиривания) поверхности перед завершающими операциями нанесения защитных покрытий.

6.1 Обеспечение равномерности обработки на операции ЭПП

Согласно полученным данным, вдоль обрабатываемой поверхности наблюдается градиент скорости растворения материала, составляющий от 2,3 до 4,0 мкм/мин [113] как в вертикальном, так и в горизонтальном направлениях. Причиной этого является изменение толщины парогазовой оболочки по глубине погружения в РЭ и вблизи кромок. В связи с этим, оптимальным, с точки зрения повышения равномерности обработки и обеспечения одинаковых условий для формирования радиуса вдоль входной и выходной кромок, является горизонтальное расположение оси Z лопатки, при котором одна из указанных кромок находится внизу (Рисунок 67). При описанном размещении лопатки в ванне ЭПП создаются благоприятные условия, предотвращающие скопление пузырьков газа вдоль обрабатываемой поверхности, а условия обработки по всей длине кромки максимально идентичны. Дальнейшим шагом на пути повышения равномерности обработки может быть проведение ЭПП в два перехода: с переворотом лопатки на 180° относительно ее оси Z после достижения половины назначенного времени обработки [113].

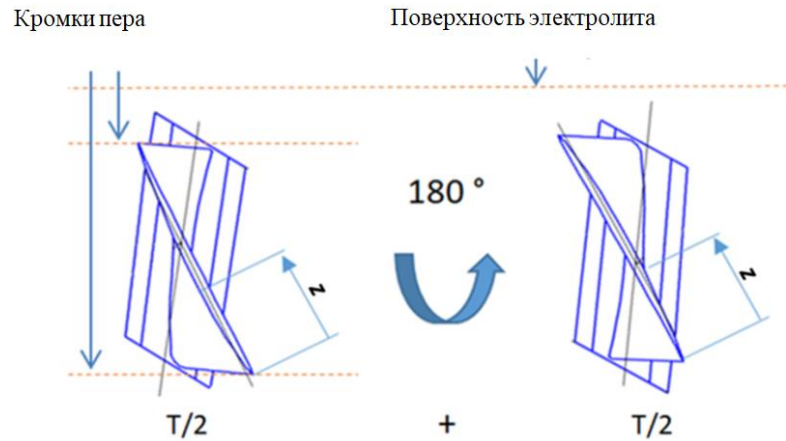


Рисунок 67 – Схема размещения лопаток в ванне ЭПП: Т- назначенное время полирования [113]

При увеличении длительности обработки Т возрастает разность Δ между наибольшей и наименьшей толщиной удалённого слоя материала (увеличивается неравномерность обработки). Используя выражение (38), можно сопоставить динамику изменения Δ во времени для двух вариантов расположения лопатки. Для схемы без переворота эта зависимость описывается формулой (44), а для схемы с переворотом — формулой (45) [113]. Величина L в формулах (44 и 45) соответствует максимальной длине хорды, выраженной в миллиметрах [113].

$$\Delta_1 = \Delta H(2; T) - \Delta H(L; T) \quad (44)$$

$$\Delta_2 = \frac{\Delta H(2; T)}{2} + \frac{\Delta H(L-2; T)}{2} - \Delta H\left(\frac{L}{2}; T\right) \quad (45)$$

Неравномерность обработки Δ для лопатки с длиной хорды 55 мм после ЭПП в течение 4 минут без переворота и с переворотом, рассчитанная на основании формул (44) и (45) составит 6,0 мкм и 2,0 мкм, соответственно (Рисунок 68).

На Рисунке 69 представлены графики изменения неравномерности обработки Δ от времени ЭПП и длины хорды, построенные для двухстадийной обработки на основе выражения (45). Как видно из построенных графиков, с

увеличением времени полирования и длины хорды пера неравномерность обработки увеличивается.

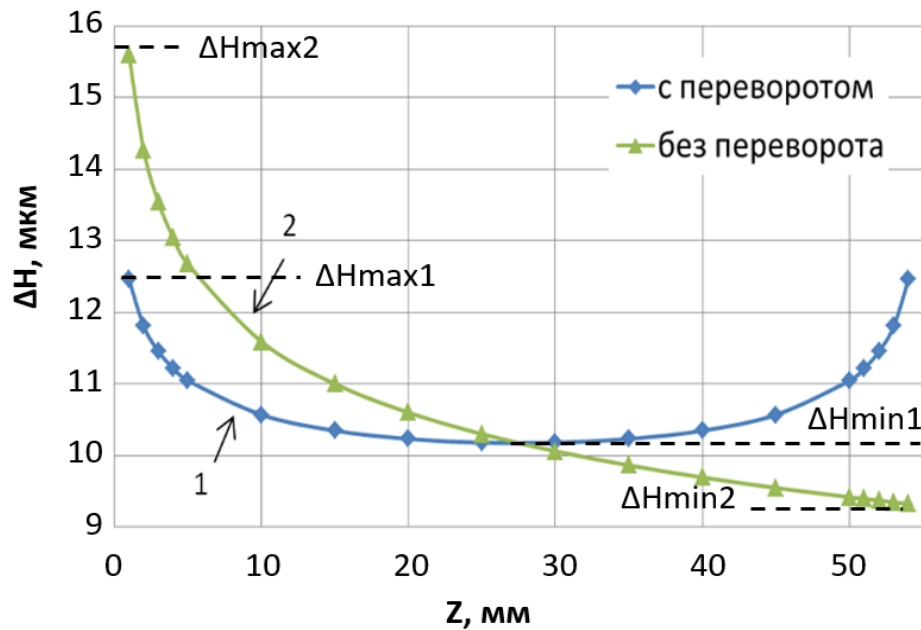


Рисунок 68 – Расчетная величина толщины растворенного материала вдоль хорды лопатки (на расстоянии H от кромки) после 4 минут ЭПП (для лопатки с длиной хорды 55 мм) при горизонтальном расположении оси Z и вертикальном расположении оси X рабочей ванне: 1 – обработка с переворотом на 180° после 2-х минут полирования; 2 – обработка без переворота лопатки

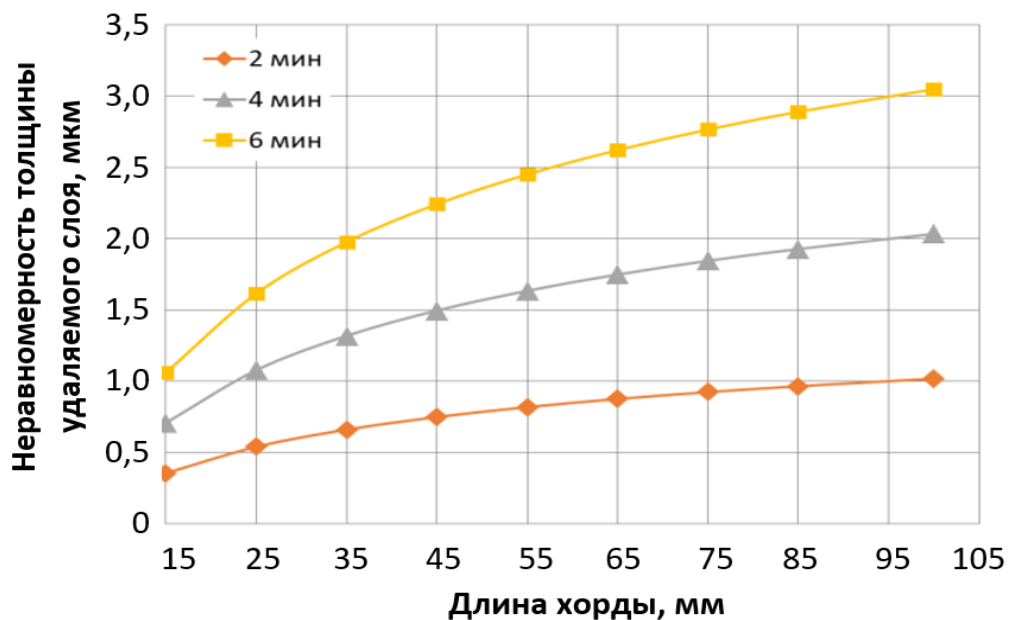


Рисунок 69 – Расчетный график изменения неравномерности обработки Δ в зависимости от длины хорды пера лопатки и времени ЭПП при обработке по разработанным технологическим рекомендациям

Таким образом, зная максимальное значение длины хорды лопатки и требуемую точность обработки пера можно определить максимальное время ЭПП. После этого, на основании графика изменения шероховатости может быть назначено ее исходное значение, которое должно быть обеспечено на предыдущей операции для достижения требуемого значения после ЭПП. Зная время полирования, с учетом формулы (38), может быть определен припуск на операцию ЭПП [113].

6.2 Разработка маршрутного описания технологии финишной обработки с использованием операции ЭПП

Технологический процесс изготовления основной номенклатуры лопаток компрессора ГТД предполагает доведение геометрических размеров профиля пера до чертежных значений, в том числе профиля входной и выходной кромок, методом ручного полирования. Далее, в случае необходимости, перо лопаток подвергается обработке методом высокоэнергетической ионной имплантации и (или) нанесению эрозионностойких покрытий, производимым в вакуумных камерах [117, 118]. Внедрение ЭПП между указанными операциями позволяет решить несколько задач:

- 1) обеспечение высокого класса чистоты поверхности пера лопаток;
- 2) формирование равномерного профиля входной и выходной кромок пера вдоль всей их длины;
- 3) своевременное выявление недопустимых рисков, обнаружение которых осложнено на общем фоне шероховатости после ручного полирования;
- 4) подготовка поверхности к последующей операцией нанесения защитного покрытия в вакуумной камере (очистка и активация поверхности).

Схема предлагаемого маршрутного описания технологии финишной обработки лопаток с применением ЭПП и последующего нанесения защитного покрытия представлена на Рисунке 70. Операции 005 и 025 «Полировальная» проводят войлочными кругами с абразивом. Операцию 005 проводят с целью

доведение геометрии профиля пера лопатки до чертежных значений и сглаживания следов от фрезерного инструмента с достижением шероховатости поверхности $Ra\ 0,5...0,6$ мкм. Операцию 010 «Промывка» производят с использованием ультразвуковых ванн в слабощелочном моющем растворе с целью удаления с поверхности жировых и масляных загрязнений, образующихся при механическом полировании. После проведения промывки производят визуальный контроль поверхности пера на отсутствие волнистости от фрезерного инструмента. Операция 015 «ЭПП» проводят с целью выявления недопустимых рисков, имеющих большую глубину. Лопатки с глубокими царапинами после операции 020 «Контроль» передают на операцию 025 «Полировальная» для локального вывода обнаруженных дефектов. Лопатки без дефектов после операции 020 и лопатки с выведенными дефектами после операции 030 передают на операцию 035 «ЭПП» с целью финишной полировки с доведением шероховатости до значений $Ra\ 0,3...0,4$ мкм. Далее лопатки передают на операцию 045 «Нанесение вакуумно-плазменного покрытия».

Обработка лопаток на операциях 015 и 040 «ЭПП» необходимо производить с применением оснастки из коррозионностойких материалов, обеспечивающей защиту замковой части от воздействия рабочего электролита и обеспечивающей надежный электрический контакт.

Работы на участке «ЭПП» должны проводиться с соблюдением требований техники безопасности для работы с веществами 2 класса опасности.

Двухстадийное ЭПП в разработанном маршрутном технологическом процессе (Рисунок 70) обеспечивает решение двух задач: повышение точности обработки, что показано в разделе 6.1 и гарантированное удаление рисков от режущего инструмента.

Опыт внедрения ЭПП в НПП «УАСТ» [119, 120] показывает, что глубокие царапины на поверхности пера (Рисунок 71) обнаруживаются на 30...50 % лопаток, с наибольшей локализацией на участках изменения знака радиуса кривизны поверхности, в т.ч. в радиусах перехода перо-полка. При значении шероховатости поверхности $Ra\ 0,6...0,4$ мкм, обнаружение таких рисков при

визуальном контроле перед ЭПП не представляется возможным. Указанные места выявления рисков являются проблематичными для ручного полирования, т.к. требуют смены инструмента и сопряжены с вероятностью получения «подреза» кромки (локального уменьшения длины хорды).

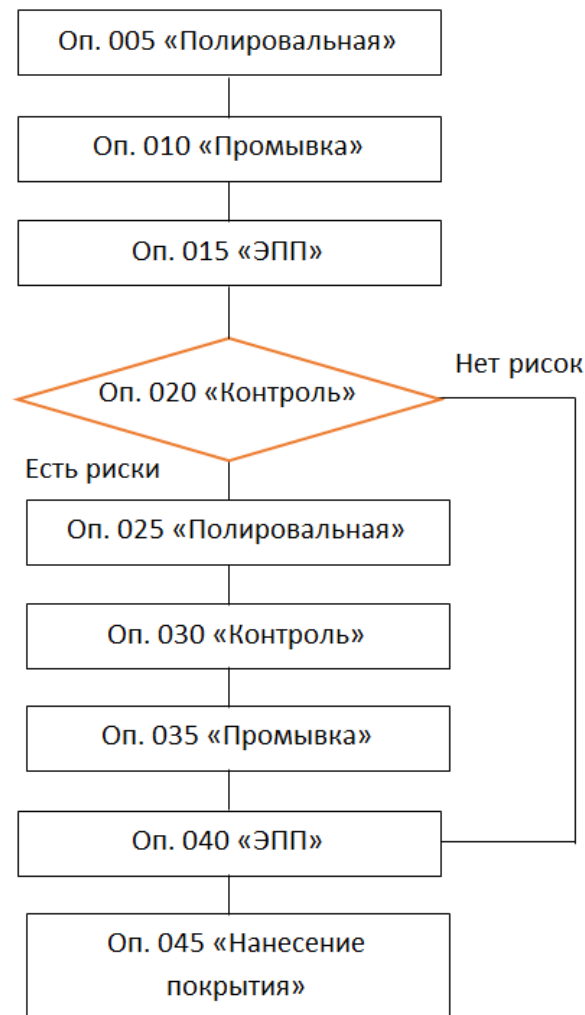


Рисунок 70 – Маршрутное описание технологического процесса финишной обработки лопаток с применением ЭПП

Разработанный способ внедрен в технологический процесс ТП №1602-300-219-УГАТУ «Технологический процесс на проведение электролитно-плазменного полирования, ионной имплантации и нанесения многослойного покрытия на направляющие лопатки ГТД», применяемый в основном производстве НПА «Технопарк АТ» для обработки деталей ГТД (акт о внедрении приведен в Приложении А).



Рисунок 71 – Царапины от режущего инструмента, выявленные на лопатках НА из сплава ВТ6 после 1 минуты ЭПП

6.3 Корректировка состава рабочего электролита в ходе эксплуатации

Важной частью любых методов химической и электрохимической обработки является вопрос обеспечения постоянства рабочих характеристик рабочих электролитов, т.к. в процессе работы происходит естественное изменение их химического состава. В связи с этим, неотъемлемой частью технологического процесса ЭПП являются технологические инструкции по корректировке состава электролита в процессе его работы.

Корректировка разработанного РЭ, с целью восполнения прореагировавшей в процессе работы плавиковой кислоты должна проводиться добавлением фторидной соли. Необходимость добавления может определяться 2-мя методами. Первый метод заключается в учете количества электрического заряда, проходящего через ванну электролита. При этом добавку фторидной соли ведут из расчета 20 г фторида натрия на 54 кКл прошедшего через электролит заряда. Качественным свидетельством недостатка фторид ионов является образование тонкой матовой пленки оксида титана вдоль нижней кромки, легко удаляемой

тонкошерстным фетровым кругом с полировальной пастой. Второй способ предполагает измерение текущего значения рН электролита и расчет концентрации HF на основе данных по содержанию в нем свободных фторид ионов. Для этой цели в ООО НПП «УАСТ» была разработана цифровая система контроля параметров электролита «СКП-01», использующая разработанную в рамках диссертационной работы математическую модель, определяющую границу его применимости по уровню минимальной концентрации HF (справка об использовании результатов диссертационной работы приведена в Приложении Б). Внешний вид и состав «СКП-01» представлен на Рисунке 72, 73, 74.

В основе принципа работы системы контроля параметров «СКП-01» лежит измерение рН раствора и активности ионов фтора ионселективным электродом. Данный метод измерения предполагает проведение предварительной калибровки ионселективного электрода по растворам с известной концентрацией измеряемого иона. Для проведения измерения требуется пробоподготовка, заключающаяся в добавлении к дозе анализируемого раствора (калибровочного раствора или электролита) регулятора ионной силы.

Смешивание анализируемого раствора и регулятора ионной силы производится в измерительной ячейке (поз. 4, Рисунок 74).

Дозирование анализируемого раствора и регулятора ионной силы в измерительную ячейку производится перистальтическими насосами (поз. 5-6, Рисунок 74).

Проба электролита забирается перистальтическим насосом НД1 из пробоотборника, в котором установлен рН электрод. Пробоотборник входит в состав установки электролитно-плазменного полирования и предназначен для охлаждения пробы до температуры не более 30 °С.

Для уменьшения времени установления стабильного сигнала ионселективного электрода используется перемешивание раствора в измерительной ячейке воздухом. Измерение активности ионов фтора производится комбинированным ионселективным электродом (поз. 7, Рисунок

74), сигнал с которого обрабатывается модулем аналогового ввода, расположенным внутри преобразовательного блока.

В зависимости от состояния клапанов Р1 и Р2 (поз. 8-9, Рисунок 74) в измерительную ячейку дозируется либо калибровочный раствор №1, либо калибровочный раствор №2, либо электролит из пробоотборника.

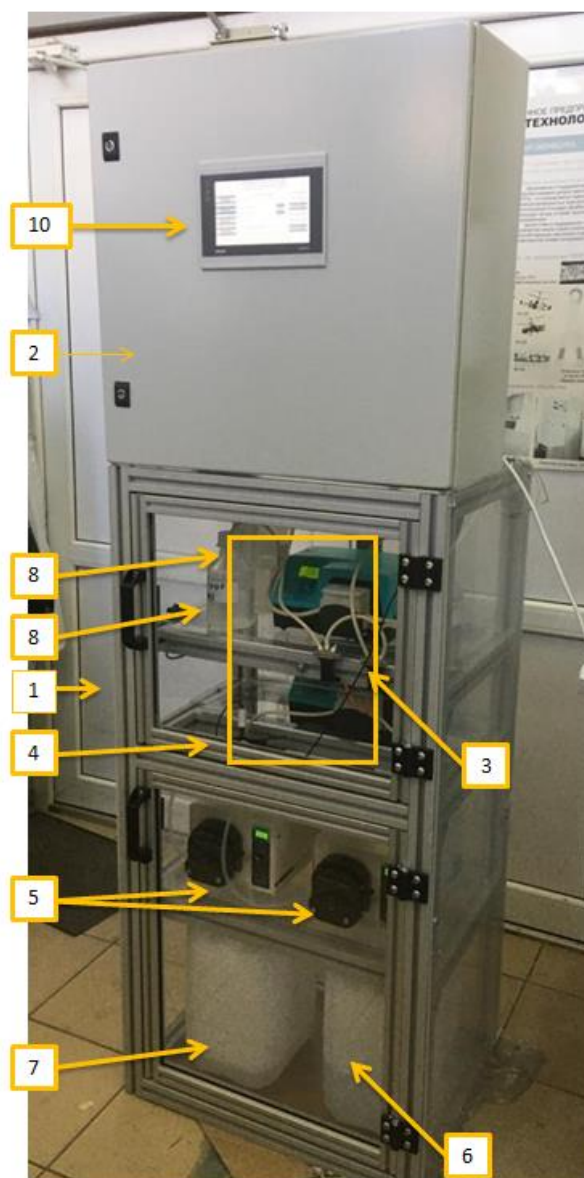


Рисунок 72 – Состав измерительно-аналитического комплекса для текущего контроля характеристик РЭ: 1 – стойка, 2 – электронный блок, 3 – узел дозирования и подготовки проб, 4 – ионоселективный электрод комбинированного типа, 5 – промывочные насосы, 6 – резервуар с дистиллированной водой, 7 – сливная емкость, 8 – контейнер с модификатором ионной силы, 9 – калибровочные растворы, 10 – сенсорный пульт оператора

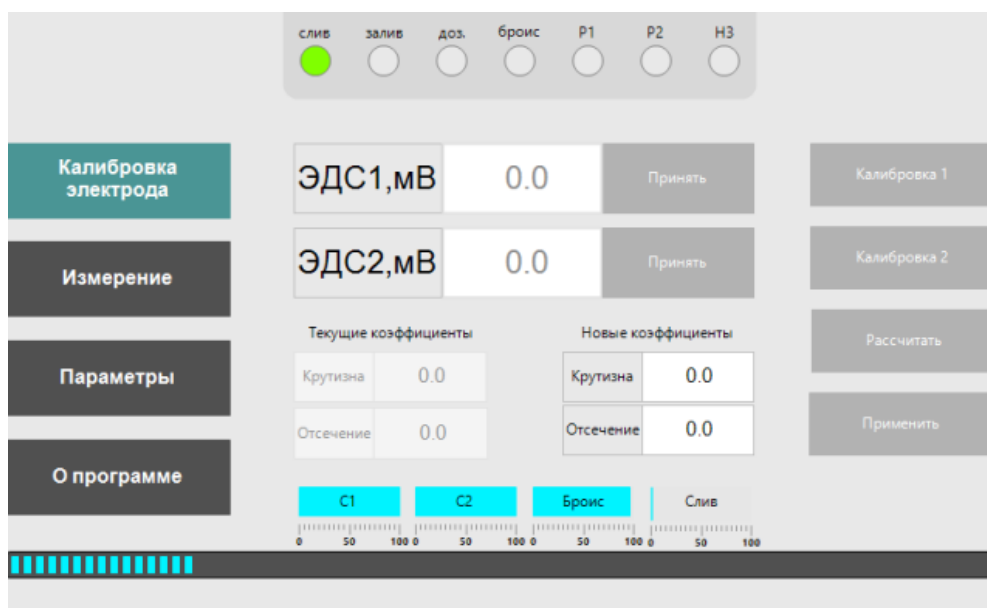


Рисунок 73 – Внешний вид экрана «Калибровки электрода»

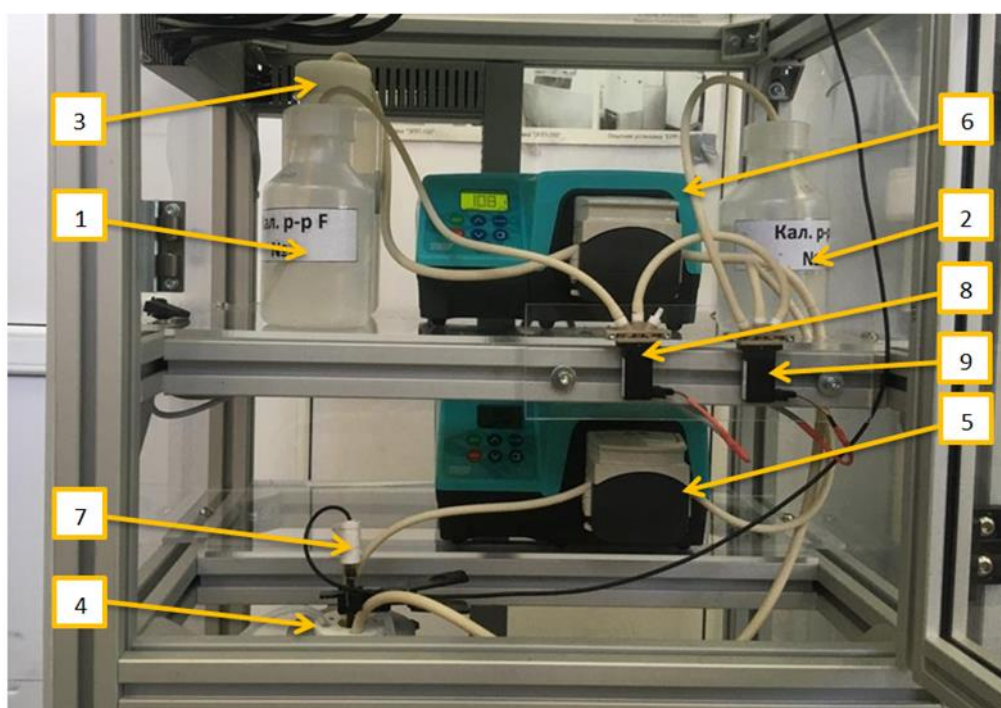


Рисунок 74 – Внешний вид блока пробоподготовки: 1 – емкость 0,5 л с калибровочным раствором №1; 2 – емкость 0,5 л с калибровочным раствором №2; 3 – емкость 1,0 л с раствором регулятора ионной силы «БРОИС»; 4 – измерительная ячейка из материала PTFE; 5 – перистальтический насос подачи пробы; 6 – перистальтический насос подачи регулятора ионной силы; 7 – ионселективный электрод; 8 – клапан электромагнитный; 9 – клапан электромагнитный

Управление системой контроля параметров СКП-01 осуществляется сенсорным панельным контроллером (поз. 10, Рисунок 72). Связь с программируемым логическим контроллером (ПЛК) установки ЭПП осуществляется через интерфейс RS-485 по протоколу Modbus. Через интерфейс RS-485 передается следующая информация из ПЛК в СКП:

- о готовности пробы в пробоотборнике,
- о величине заряда, прошедшего через электролит.

Через интерфейс RS-485 передается следующая информация из СКП в ПЛК:

- о завершении процесса измерения,
- сигнал на открытие/закрытие клапана перемешивания пробы воздухом,
- сигнал на включение/выключение насоса охлаждения пробы.

6.4 Оценка возможности расширения круга обрабатываемых титановых сплавов

Исследования, представленные в данной работе, проведены на сплаве ВТ6. Тем не менее, разработанный рабочий электролит может быть использован для обработки и других титановых сплавов, таких как ВТ8, ВТ8М-1, ВТ18У, ВТ25, ВТ1-0 либо без корректировки концентрации фторидной соли в растворе либо с незначительной корректировкой концентрации HF [121]. Пример полирования образцов из сплава ВТ8М-1 представлен на Рисунке 75.

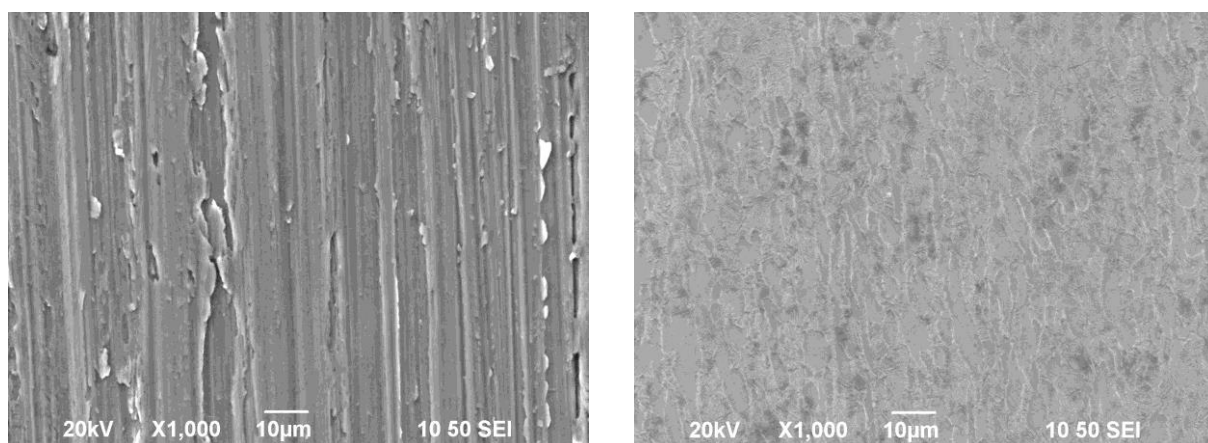


Рисунок 75 – Внешний вид поверхности образца из сплава ВТ8М-1: а) после механического полирования, б) после ЭПП

Также экспериментально было установлено, что разработанный компонентный состав рабочего электролита позволяет производить полирование однофазных титановых сплавов, что расширяет область применения данной технологии.

6.5 Подтверждение положительного влияния ЭПП на усталостную прочность направляющих лопаток вентилятора

Положительное влияние обработки методом ЭПП на усталостную прочность подтверждено результатами испытаний направляющих лопаток из сплава ВТ6, обрабатываемых ООО НПП «Уралавиаспецтехнология» в соответствии с разработанным технологическим процессом.

Определение предела выносливости методом «Локати» (на базе 20 млн. циклов) показало, что после виброабразивной обработки величина предела выносливости лопаток составляла 363 ± 4 МПа ($37,0$ кгс/мм²), проведение дополнительного электролитно-плазменного полирования позволило увеличить предел выносливости до 384 ± 4 МПа ($39,1$ кгс/мм²). Исследование лопаток после разрушения показало, что дефектов материала не обнаружено а трещины носят усталостный характер.

Выводы по главе 6

1. Разработано маршрутное описание технологии финишной обработки пера лопаток компрессора ГТД, изготавливаемых из двухфазных титановых сплавов с применением операции электролитно-плазменного полирования. Технология предполагает двухстадийную операцию ЭПП. Первая стадия, продолжительность которой составляет половину назначенного времени полирования, направлена на выявление и устранение глубоких рисок от лезвийного инструмента. Вторая стадия обработки, проводимая после переворота лопатки на 180° вдоль оси Z, направлена на доведение шероховатости до

требуемой величины с достижением равномерного радиуса вдоль всей длины входной и выходной кромок.

2. На основании приведенных технологических рекомендаций разработан технологический процесс № 1602-300-2019-УГАТУ, используемый в основном производстве НПА «Технопарк АТ» для обработки деталей ГТД. Экспериментально подтверждено что после обработки лопаток НА из титанового сплава ВТ6 их предел выносливости при симметричном цикле нагружения на базе 20 млн. циклов повысился на 21 МПа (с 363 ± 4 до 384 ± 4 МПа).

3. В ООО НПП «УАСТ» разработана и апробирована цифровая система контроля параметров электролита «СКП-01», использующая разработанную в рамках диссертационной работы математическую модель, определяющую границу его применимости по уровню минимальной концентрации HF

4. Экспериментально показано, что разработанный состав электролита может быть применен для полирования широкого круга титановых сплавов, в том числе широко применяемого в авиадвигателестроении сплава ВТ8М-1.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе теоретического и экспериментального исследования механизма финишной обработки поверхностного слоя титана и титановых сплавов методом электролитно-плазменного полирования установлена взаимосвязь рН среды фторидсодержащего РЭ, наличия оксидных пленок и следов избирательного травления межфазных границ на обработанной поверхности. Указанная взаимосвязь формализована в виде феноменологической модели, которая *позволяет* установить требования к компонентному составу рабочего электролита для финишной операции электролитно-плазменного полирования титана и титановых сплавов.

2. Разработан состав рабочего электролита для финишной операции ЭПП титановых сплавов и определены границы его применимости в виде экспериментально полученной математической модели, устанавливающей связь между концентрациями его компонентов и позволяющей осуществлять его технологическую корректировку в процессе эксплуатации по уровню минимальной равновесной концентрации HF.

3. Результаты экспериментальных исследований позволили установить взаимосвязь неравномерности толщины парогазовой оболочки вдоль обрабатываемой поверхности по глубине погружения и длительности финишной операции ЭПП в разработанном рабочем электролите с качеством поверхностного слоя. На основе этого разработаны технологические рекомендации по расположению обрабатываемых лопаток в рабочей ванне, обеспечивающие: повышение равномерности съема материала и величины шероховатости по поверхности пера, формирование радиуса на входных и выходных кромках пера без снижения усталостной прочности конструктивно подобных образцов.

4. Разработана усовершенствованная технология производства лопаток компрессора ГТД из двухфазного титановых сплавов ВТ6 с применением финишной операции электролитно-плазменного полирования в предложенном 3-х компонентном рабочем электролите, с возможностью его корректировки, и

горизонтальным расположением лопатки при обработке в две стадии с поворотом на 180° после завершения половины расчётного времени операции ЭПП, что обеспечивает снижение неравномерности съема материала с 5,0 до 1,6 мкм, снижение средней шероховатости поверхности с Ra 0,4 до Ra 0,2 мкм и повышение их предела выносливости с 363 ± 4 до 384 ± 4 МПа по сравнению с серийной технологией ручного полирования.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ГТД – газотурбинный двигатель

ЭПП – электролитно-плазменное полирование

ЭПО – электролитно-плазменная обработка

РЭ – рабочий электролит

КД – конструкторская документация

КНД – компрессор низкого давления

ПГО – парогазовая оболочка

ВАХ – вольтамперная характеристика

ЧДА – чистый для анализа

УЭП – удельная электропроводность

РСА – рентгеноспектральный анализ

РФЭС – рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия

РЭМ – растровая электронная микроскопия

Оп. – операция

Поз. – позиция

ПЛК – программируемый логический контроллер

СКП – система контроля параметров

PTFE – политетрафторэтилен (фторопласт 4)

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крымов, В. В. Производство лопаток газотурбинных двигателей / В. В. Крымов, Ю. С. Елисеев, К. И. Зудин; под ред. В. В. Крымова. – М. : Машиностроение : Машиностроение – Полет, 2002. – 376 с.
2. Дмитриев, С. А. Анализ отказов и повреждений авиационных двигателей за период 2007–2020 гг. / С. А. Дмитриев, Е. С. Симонова // Надежность и качество сложных систем. – 2023. – № 1. – С. 81 – 90.
3. Новикова, М. К. Исследование и разработка технологии ионного модифицирования поверхности лопаток компрессора ГТД из титанового сплава : спец. 05.07.05 «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов» : дис. ... канд. техн. наук / Смыслова Марина Константиновна. – Уфа, 1991. – 248 с.
4. Богуслаев, В. А. Технологическое обеспечение и прогнозирование несущей способности деталей ГТД / В. А. Богуслаев, В. К. Яценко, В. Ф. Притченко. – Запорожье : ОАО «Мотор Сич», 2006. – 335 с.
5. Акимов, В. М. Основы надежности газотурбинных двигателей / В. М. Акимов. – М. : Машиностроение, 1981. – 207 с.
6. Урядов, С. А. Сопротивление усталости деталей при различной технологии их изготовления / С. А. Урядов // Вестник РГАТА имени П. А. Соловьева. – 2015. – № 1 (32). – С. 118 – 122.
7. Иванова, В. С. Природа усталости металлов / В. С. Иванова, В. Ф. Терентьев. – М. : Металлургия, 1975. – 456 с.
8. Сулима, А. М. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин / А. М. Сулима, В. А. Шулов, Ю. Д. Ягодкин. – М. : Машиностроение, 1988. – 240 с.
9. Петухов, А. Н. Актуальные вопросы конструкционной прочности титановых сплавов и деталей из них / А. Н. Петухов // Авиационные материалы и технологии. – 2007. – № 1. – С. 8 – 13.

10. Петросов, В. В. Изыскание метода и режима упрочнения лопаток компрессора из титановых сплавов, обеспечивающих повышенную выносливость : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Петросов В. В. – Куйбышев, 1965. – 146 с.
11. Круцило, В. Г. О связи износа и повреждений рабочих лопаток турбин газоперекачивающих агрегатов с усталостной прочностью / В. Г. Круцило // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2011. – Т. 13. – № 4 (3). – С. 1083 – 1084.
12. Масловский, В. В. Полирование металлов и сплавов / В. В. Масловский, П. Д. Дудко. – М. : Высшая школа, 1974. – 255 с.
13. Лозицкий, Л. П. Конструкция и прочность авиационных газотурбинных двигателей / Л. П. Лозицкий, А. Н. Ветров, С. М. Дорошко [и др.]. – М. : Воздушный транспорт, 1992. – 540 с.
14. Патент 2768945 Российская Федерация, МПК C23C 28/00. Способ защиты лопаток компрессора газотурбинного двигателя из титановых сплавов от пылеабразивной эрозии : № 2021131332 : заявл. 27.10.2021 : опубл. 25.03.2022 / Смыслов А. М, Гонтюрев В. А., Дыбленко Ю. М. [и др.] ; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью Научно-производственное предприятие "Уралавиаспецтехнология"
15. Макаров, В. Ф. Разработка высокоэффективных технологических процессов обработки деталей газотурбинных двигателей для авиации и наземных установок / В. Ф. Макаров // Вестник РГАТА имени П. А. Соловьева. – 2017. – № 1 (40). – С. 159 – 166.
16. Михайлов, Д. А. Некоторые особенности полировки криволинейных поверхностей лопаток ГТД из титановых сплавов / Д. А. Михайлов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2014. – № 3 (49). – С. 120 – 127.
17. Жуплов, М. В. Современные проблемы автоматизации финишной обработки пера лопаток авиационных двигателей / М. В. Жуплов, М. Г. Яковлев // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2011. – № 1. – С. 132 – 138.

18. Макаров, В. Ф. Оптимизация процесса полирования лопаток газотурбинных двигателей из титановых сплавов / В. Ф. Макаров, Е. Н. Бычина // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2011. – № 4/3 (288). – С. 41 – 47.
19. Карташов, И. П. Обработка деталей свободными абразивами в вибрирующих резервуарах / И. П. Карташов, М. Е. Шаинский, В. А. Власов, Б. П. Румянцев [и др.]. – К. : Вища школа, 1975. – 188 с.
20. Копылов, Ю. Р. Виброполирование штампованных деталей / Ю. Р. Копылов, С. П. Попов, Г. А. Мануковская // Машиностроитель. – 1988. – № 2. – С. 18 – 19.
21. Грилихес, С. Я. Электрохимическое и химическое полирование : теория и практика. Влияние на свойства металлов / С. Я. Грилихес. – Л. : Машиностроение, Ленингр. отделение, 1987. – 232 с.
22. Синькевич, Ю. В. Химическое полирование металлов и сплавов / Ю. В. Синькевич // Машиностроение : республиканский межведомственный сборник научных трудов. Белорусский национальный технический университет. – Минск, 2018. – Вып. 31. – С. 91 – 95.
23. Патент WO 2017/186992 A1 ВОИС, МПК C25F3/16. Method for smoothing and polishing metals via ion transport by means of free solid bodies, and solid bodies for carrying out said method : № PCT/ES2017/070247 : заявл. 24.04.2017 : опубл. 02.11.2017 / Pau Sarsanedas Millet; заявитель и патентообладатель Drylyte SL.
24. Патент 2716292 Российская Федерация, МПК C25F 3/16. Способ электрополирования металлической детали : № 2019130515 : заявл. 27.09.2019 : опубл. 11.03.2020 / Мингажев А. Д., Криони Н. К., Давлеткулов Р. К. ; заявитель и патентообладатель Мингажев А. Д., Криони Н. К., Давлеткулов Р. К
25. Грилихес, С. Я. Обезжиривание, травление и полирование металлов / С. Я. Грилихес. – 5-е изд., перераб. и доп. – Л. : Машиностроение, Ленинградское отделение, 1983. – 101 с.
26. Патент 2730306 Российская Федерация, МПК C25F 3/16. Способ сухого электрополирования лопатки турбомашин : № 2020108822 : заявл. 28.02.2020 :

опубл. 21.08.2020 / Мингажев А. Д., Криони. Н. К. ; заявитель и патентообладатель – Мингажев А. Д., Криони. Н. К.

27. Галиев, В. Э. О проблемах и перспективах изготовления прецизионных компрессорных лопаток / В. Э. Галиев, Д. З. Фаткулина, Д. Р. Таминдаров // Наука и образование : научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2014. – № 4. – С. 10 – 25.

28. Алексеев, Ю. Г. Электролитно-плазменное полирование титановых и ниобиевых сплавов / Ю. Г. Алексеев, А. Ю. Королёв, В. С. Нисс [и др.] // Наука и техника. – 2018. – Т. 17. – № 3. – С. 211–219.

29. Добрынин, Д. А. Электролитно-плазменное полирование титановых сплавов BT6 и BT8M-1 / Д. А. Добрынин // Труды ВИАМ. – 2017. – № 7 (55). – С. 14–23.

30. Куликов, И. С. Электролитно-плазменная обработка материалов / И. С. Куликов, С. В. Ващенко, А. Я. Каменев. – Минск : Беларус. навука, 2010. – 232 с.

31. Синькевич, Ю. В. Электроимпульсное полирование сплавов на основе железа, хрома и никеля / Ю. В. Синькевич, В. К. Шелег, И. Н. Янковский, Г. Я. Беляев. – Минск : БНТУ, 2014. – 325 с.

32. Патент 2725441 Российская Федерация, МПК C25F 3/16. Способ электролитно-плазменного полирования деталей из титановых сплавов : № 2019125396 : заявл. 09.08.2019 : опубл. 02.07.2020 / Ерошкин Г. М., Ерошкин М. П., Афанасов С. А. [и др.] ; заявитель и патентообладатель Публичное акционерное общество "ОДК-Сатурн".

33. Патент 2765553 Российская Федерация, МПК C25F 3/16. Электролит для электролитно-плазменного полирования деталей из жаропрочных сплавов : № 2020137935 : заявл. 18.11.2020 : опубл. 01.02.2022 / Ерошкин Г. М., Ерошкин М. П., Афанасов С. А. [и др.] ; заявитель и патентообладатель Публичное акционерное общество "ОДК-Сатурн".

34. Патент 2211261 Российская Федерация, МПК C25F 5/00. Способ удаления алюминидного покрытия на основе никеля : № 2001130186/02 : заявл. 12.11.2001 : опубл. 27.08.2003 / Будиновский С. А., Мубояджян С. А., Павлов А. Ю. ; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное унитарное

предприятие "Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов".

35. Патент 2746886 Российская Федерация, МПК C25F 3/24. Способ электролитно-плазменного полирования поверхности и скругления кромок пластины торсиона несущего винта вертолета : № 2020129384 : заявл. 07.09.2020 : опубл. 21.04.2021 / Смыслов А. М., Таминдаров Д. Р., Плотников Н. В. [и др.] ; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью Научно-производственное предприятие "Уралавиаспецтехнология".

36. Воленко, А. П. Некоторые особенности технологии электролитно-плазменного полирования аустенитной нержавеющей стали / А. П. Воленко, М. Н. Тюрков, Н. В. Чиркунова // Вектор науки ТГУ. – 2013. – № 2 (24). – С. 112–116.

37. Mhlanga, M. Surface roughness of Ti6Al4V samples produced by laser powder bed fusion for bone implants / M. Mhlanga, L. Masheane, I. Yadroitsava, I. Yadroitsev // MATEC Web of Conferences. – 2022. – Vol. 370.

38. Mhlanga, M. Surface finishing of L-PBF Ti6Al4V ELI samples for biomedical applications by dry electro- and chemical polishing / M. Mhlanga, L. Masheane, I. Yadroitsava, D. Koupryanoff, G. Ter Haar, I. Yadroitsev // MATEC Web of Conferences. – 2025. – Vol. 417.

39. Krioni, N. K. Finishing surface treatment of GTE parts with dry electropolishing / N. K. Krioni, A. D. Mingazhev, V. A. Gafarova // Journal of Physics : Conference Series. – 2021. – Vol. 1891, no. 1. – P. 012028.

40. Мукаева, В. Р. Управление технологическим процессом электролитно-плазменного полирования на основе контроля шероховатости поверхности по импедансным спектрам : спец. 05.13.06 «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (в промышленности)» : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Мукаева Вета Робертовна. – Уфа, 2014. — 19 с.

41. Патент WO 2001/000906 A1 ВОИС, МПК C25F 3/26. Bath composition for electropolishing of titanium and method for using same : № PCT/FR00/01694 : заявл. 20.06.2000 : опубл. 04.01.2001 / Guerin, Jean ; заявитель и патентообладатель Organisation Europeenne pour la Recherche Nucleaire (CERN).

42. Патент DE10037337A1 Германия, МПК C25F7/00. Electropolishing of titanium alloy and nickel-titanium alloy articles, especially Nitinol stents, is carried out in anhydrous electrolyte, preferably sulfamic acid in formamide, with article as anode : № DE10037337 : заявл. 29.07.2000 : опубл. 07.02.2002 / Bernhard Schroeder, Markus Kopf ; заявитель и патентообладатель NMI Naturwissenschaftliches und Medizinisches Institut.
43. Патент CN102312277A Китай, МПК C25F 3/26. Electrochemical polishing electrolyte adopted for titanium and titanium alloy, use method thereof : № 201110327361.3 : заявл. 25.10.2011 : опубл. 30.04.2014 / Wang Zhoucheng, Yan Weili ; заявитель и патентообладатель Xiamen University.
44. Липкин, Я. Н. Химическое полирование металлов / Я. Н. Липкин, Т. М. Бершадская. – М. : Машиностроение, 1988. – 112 с.
45. Ямпольский, Я. М. Краткий справочник гальванотехника / Я. М. Ямпольский, В. А. Ильин. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л. : Машиностроение, 1981. – 269 с.
46. Патент US3514407A США, МПК C23F3/06. Chemical polishing of titanium and titanium alloys : № 3514407 : заявл. 28.09.1966 : опубл. 26.05.1970 / Leo Missel ; заявитель и патентообладатель Lockheed Missiles & Space Company.
47. Балякин, А. В. Химическое полирование образцов из сплава ВТ6, полученных методом лазерного сплавления порошковых материалов / А. В. Балякин, Е. И. Жученко, Д. Л. Скуратов // Проблемы и перспективы развития двигателестроения : материалы докладов междунар. науч.-техн. конф., 12–14 сентября 2018 г. – Самара, 2018. – С. 174–176.
48. Патент 1715887 Российская Федерация, МПК C23F 3/03. Раствор для химического полирования поверхности титана и его сплавов : № 4668633 : заявл. 10.02.1989 : опубл. 28.02.1992 / Пекшева Н. П. ; заявитель и патентообладатель Белгородский технологический институт строительных материалов им. И.А. Гришманова
49. Патент 2168565 Российская федерация, МПК C25F3/16. Способ электрохимического полирования металлических изделий : № 99127843/02 : заявл. 30.12.1999 : опубл. 10.06.2001 / Мирзоев Р. А., Стыров М. И., Степанова Н.

И., Майоров А. И. ; заявитель и патентообладатель Мирзоев Р. А., Стыров М. И., Степанова Н. И., Майоров А. И.

50. Патент 2461667 Российская федерация, МПК C25F 3/16. Способ электролитно-плазменного полирования деталей из титана и титановых сплавов : № 2011116388/02 : заявл. 25.04.2011 : опубл. 20.09.2012 / Таминдаров Д. Р., Смыслов А. М., Мингажев. А. Д. ; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "Научно-производственное предприятие Вакууммаш", Таминдаров Дамир Рамилевич.

51. Дураджи, В. Н. Нагрев металлов в электролитной плазме / В. Н. Дураджи, А. С. Парсаданян. – Кишинев : Штиинца, 1988. – 216 с.

52. Еретнев, К. Н. Процессы нагрева и очистки поверхности металлов в электролите и их практическое использование / К. Н. Еретнев, С. В. Лебедев. — Липецк, 1997. — 150 с.

53. Тюрин, Ю. Н. Особенности электролитно-плазменной закалки / Ю. Н. Тюрин, А. Д. Погребняк // Журнал технической физики. – 2002. – Т. 72. – Вып. 11. – С. 119–120.

54. Суминов, И. В. Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов : в 2 т. Т. 1 / И. В. Суминов, П. Н. Белкин, А. В. Эпельфельд. – М. : Техносфера, 2011. – 512 с.

55. Кусманов, С. А. Изменение характеристик анодной цементации в процессе эксплуатации электролитов с разными углеродсодержащими добавками / С. А. Кусманов, И. Г. Дьяков, П. Н. Белкин // Электрохимические и электролитно-плазменные методы модификации металлических поверхностей : материалы III Международной научно-технической конференции, 2010 г. – Кострома : КГУ им. Н. А. Некрасова, 2010. – С. 228–234.

56. Дураджи, В. Н. Цементация и нитроцементация стали при нагреве в электролитной плазме / В. Н. Дураджи, И. В. Брянцев, Е. А. Пасинковский // Электронная обработка материалов. – 1977. – № 2. – С. 15–18.

57. Лазаренко, Б. Р. Применение электролитной плазмы для интенсификации процесса азотирования / Б. Р. Лазаренко, П. Н. Белкин, Е. А. Пасинковский, А. А. Факторович // Электронная обработка материалов. – 1977. – № 6. – С. 19–22.
58. Yerokhin, A. Characterisation of oxide films produced by plasma electrolytic oxidation of a Ti6Al4V alloy / A. L. Yerokhin, X. Nie, A. Leyland, A. Matthews // Surface and Coatings Technology. – 2000. – Vol. 130. – P. 195–206.
59. Сибилева, С. В. Обзор технологий получения покрытий на титановых сплавах плазменным электролитическим оксидированием / С. В. Сибилева, Л. С. Козлова // Авиационные материалы и технологии. – 2016. – № S2. – С. 3–10.
60. Баковец, В. В. Плазменно-электролитическая анодная обработка металлов / В. В. Баковец, О. В. Поляков, И. П. Долговесова. – Новосибирск : Наука. Сиб. отд., 1991. – 164 с.
61. Гордиенко, П. С. Микродуговое оксидирование титана и его сплавов / П. С. Гордиенко, С. В. Гнеденков. – М. : Наука, 1997. — 185 с.
62. Sengupta, S. K. Study on the Origin of Nonfaradaic Behavior of Anodic Contact Glow Discharge Electrolysis. The Relationship Between Power Dissipated in Glow Discharges and Nonfaradaic Yields / S. K. Sengupta // Journal of The Electrochemical Society. – 1998. – Vol. 145, No. 7. – P. 2209–2213.
63. Sengupta, S. K. Contact glow discharge electrolysis: its origin, plasma diagnostics and non-faradaic chemical effects / Susanta K. Sen Gupta // Plasma Sources Science and Technology. – 2015. – Vol. 24.
64. Синькевич, Ю. В. Физико-математическая модель процесса электроимпульсного полирования / Ю. В. Синькевич // Прогрессивные технологии и системы машиностроения : международный сборник научных трудов. – Донецк : ДонНТУ, 2006. – Вып. 32. – С. 206–212.
65. Yerokhin, A. Plasma electrolysis for surface engineering / A. Yerokhin, X. Nie, A. Leyland [et al.] // Surface and Coatings Technology. – 1999. – Vol. 122, No. 2–3. – P. 73–93.

66. Yerokhin, A. Charge transfer mechanisms underlying Contact Glow Discharge Electrolysis / A. Yerokhin, V. Mukaeva, E. Parfenov [et al.] // *Electrochimica Acta*. – 2019. – Vol. 312
67. Каленчукова, О. В. Некоторые особенности физико-химических процессов, протекающих при электролитно-плазменной обработке нержавеющей стали / О. В. Каленчукова, П. К. Нагула, Д. Л. Третинников // *Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук*. – 2016. – № 3. – С. 46–52.
68. Kusmanov, S. A. Some features of anodic plasma electrolytic processes in aqueous solution / S. A. Kusmanov, I. V. Tambovskiy, I. A. Kusmanova, P. N. Belkin // *J. Phys. Conf. Ser.* – 2019. – Vol. 1396.
69. Belkin, P. N. Mechanism and technological opportunity of plasma electrolytic polishing of metals and alloys surfaces / P. N. Belkin, S. A. Kusmanov, E. V. Parfenov // *Applied Surface Science Advances*. – 2020. – Vol. 1. – P. 100016.
70. Дураджи, В. Н. Исследование эрозии анода при воздействии на него электролитной плазмы / В. Н. Дураджи, И. В. Брянцев, А. К. Товарков // *Электронная обработка материалов*. – 1978. – № 5. – С. 13–17.
71. Parfenov, E. V. Electric field effect on surface layer removal during electrolytic plasma polishing / E. V. Parfenov, R. G. Farrakhov, V. R. Mukaeva [et al.] // *Surface and Coatings Technology*. – 2016. – Vol. 307, part C. – P. 1329–1340.
72. Мирзоев, Р. А. Анодные процессы электрохимической и химической обработки металлов : учеб. пособие / Р. А. Мирзоев, А. Д. Давыдов. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2013. — 382 с.
73. Danilov, I. Transient simulation of the removal process in plasma electrolytic polishing of stainless steel / I. Danilov, M. Hackert-Oschätzchen, I. Schaarschmidt, M. Zinecker, A. Schubert // *Excerpt from the Proceedings of the 2018 COMSOL Conference in Lausanne*. – Lausanne, 2018.
74. Синькевич, Ю. В. Исследование выхода металла по току при электроимпульсном полировании конструкционных углеродистых сталей / Ю. В.

Синькевич, В. К. Шелег, И. Н. Янковский // Машиностроение и машиноведение. – 2013. – Вып. 1. – С. 125–130.

75. Иванова, Н. П. Механизм анодного растворения коррозионностойких и конструкционных углеродистых сталей в условиях электроимпульсного полирования / Н. П. Иванова, Ю. В. Синькевич, В. К. Шелег, И. Н. Янковский // Машиностроение и машиноведение. Наука и техника. – 2013. – № 1. – С. 24–30.

76. Таминдаров, Д. Р. Влияние состава электролита на процесс электролитно-плазменного полирования титановых сплавов / Д. Р. Таминдаров, А. М. Смыслов, А. В. Сидельников // Физика и химия обработки материалов. – 2022. – № 5. – С. 31–38.

77. Shadrin, S. Y. Physical Features of Anodic Plasma Electrolytic Carburising of Low-Carbon Steels / S. Y. Shadrin, P. N. Belkin, I. V. Tambovskiy, S. A. Kusmanov // Plasma Chemistry and Plasma Processing. – 2020. – Vol. 40, No. 2. – P. 549–570.

78. Невский, О. И. Электрохимическая размерная обработка металлов и сплавов. Проблемы теории и практики : монография / О. И. Невский, В. М. Бурков, Е. П. Гришина [и др.]. – Иваново : ГОУ ВПО Иван. гос. хим.-технол. ун-т, 2006. – 282 с.

79. Wang, Ji. Influence of Voltage on Electrolysis and Plasma Polishing / Ji Wang, Xue-mei Zong, Jian-fei Liu, Sen Feng // International Conference on Manufacturing Engineering and Intelligent Materials, 25–26 February 2017. – Guangzhou, China, 2017. – P. 10–15.

80. Парфенов, Е. В. Влияние условий обработки на процесс удаления жаростойкого алюминидного покрытия электролитно-плазменным методом при стабилизации температуры электролита / Е. В. Парфенов, Р. Р. Невьянцева, А. А. Быбин, В. Р. Мукаева // Физика и химия обработки материалов. – 2011. – № 6. – С. 65–70.

81. Rajput, A. Analysis of voltage and current during the plasma electrolytic polishing of stainless steel / A. Rajput, H. Zeidler, A. Shubert // Euspen's 17th Int. Conf. Eur. Soc. Precis. Eng. Nanotechnology, 29 May – 2 June 2017. – Hannover, Germany, 2017.

82. Багаев, С. И. Разработка состава электролитов для электролитно-плазменного полирования металлов и сплавов / С. И. Багаев, Е. К. Сергеева, И. П. Смягликов // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сборник научных трудов. – Минск : ФТИ НАН Беларуси, 2019. – С. 135–144.
83. Иванова, Н. П. Исследование морфологии и химического состава электроимпульсной полированной поверхности углеродистых и коррозионностойких сталей / Н. П. Иванова, Ю. В. Синькевич, В. К. Шелег, И. Н. Янковский // Наука и техника. – 2012. – № 6. – С. 3–10.
84. Воленко, А. П. Внедрение технологии электролитно-плазменного полирования металлических изделий / А. П. Воленко, О. В. Бойченко, Н. В. Чиркунова // Вектор науки ТГУ. – 2016. – № 1 (35). – С. 11–16.
85. Патент 2168565 Российская федерация, МПК C25F 3/16. Способ электрохимического полирования металлических изделий : № 99127843/02 : заявл. 30.12.1999 : опубл. 10.06.2001 / Мирзоев Р. А., Стыров М. И., Степанова Н. И., Майоров А. И. ; заявитель и патентообладатель Мирзоев Р. А., Стыров М. И., Степанова Н. И., Майоров А. И.
86. Колачев, Б. А. Технология термической обработки цветных металлов и сплавов / Б. А. Колачев, Р. М. Габидуллин, Ю. В. Пигузов. – М. : Metallurgy, 1980. – 280 с.
87. Schafler, E. Measurement of screw and edge dislocation densities by means of X-ray Bragg profile analysis / E. Schafler, M. Zehetbauer, T. Ungar // Mater. Sci. Eng. – 2001. – V. A319–321. – P. 220–223.
88. Давыдов, Д. М. Сравнительная оценка методов определения водорода в металлических материалах / Д. М. Давыдов, В. И. Титов, А. Ф. Летов, А. Н. Луценко // Научно-технический журнал Труды ВИАМ. – 2019. – № 11. – С. 75–84.
89. Нефедов, В. И. Рентгеноэлектронная спектроскопия химических соединений : справочник / В. И. Нефедов. – М. : Химия, 1984. – 256 с.
90. Кузьмичева, Е. В. Химическое полирование титана BT1-0 с возможностью корректировки рабочего раствора : спец. 05.17.03 «Технология электрохими-

ческих процессов и защита от коррозии» : дис. ... канд. техн. наук / Кузьмичева Екатерина Викторовна. – Иваново, 2012. – 153 с.

91. Патент DE10207632A1 Германия, МПК C25F3/26. Plasma polishing of objects made of titanium or titanium alloys comprises applying a voltage to the object positioned in a warm aqueous electrolyte solution, followed by processing using plasma polishing : № 10207632 заявл. 22.02.2002 : опубл. 06.04.2006 / Lingath K., Zeidler H., Parshuta A. ; заявитель и патентообладатель Beckmann-Institut fur Technologieentwicklung De plasotec GmbH.

92. Boere, G. Influence of Fluoride on Titanium in an Acidic Environment Measured by Polarization Resistance Technique / G. Boere // Journal of Applied Biomaterials. – 1995. – Vol. 6. – P. 283–288.

93. Иванов, Д. М. Химия галогенов : учеб. пособие / Д. М. Иванов, М. Г. Иванов. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2014. — 84 с.

94. Патент 2260634 Российская федерация, МПК C23F 3/03. Раствор для химического полирования титана : № 2004121379/02 : заявл. 12.07.2004 : опубл. 20.09.2005 / Донцов М. Г., Котов В. Л., Невский О. И, Балмасов А. В. ; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Ивановский государственный химико-технологический университет" (ГОУВПО "ИГХТУ").

95. Nakagawa, M. Effect of Fluoride Concentration and pH on Corrosion Behavior of Titanium for Dental Use / M. Nakagawa, S. Matsuya, T. Shiraishi, M. Ohta // Journal of Dental Research. – 1999. – Vol. 78(9). – P. 1568-1572.

96. Al-Mayouf, A. M. The effect of fluoride on the electrochemical behavior of Ti and some of its alloys for dental applications / A. M. Al-Mayouf, A. A. Al-Swayih, N. A. Al-Mobarak, A. S. Al-Jabab // Materials and Corrosion. - 2004. - Vol. 55 – № 7. - P. 524-530.

97. Schiffa, N. Influence of fluoride content and pH on the corrosion resistance of titanium and its alloys / N. Schiffa, B. Grosgeata, M. Lissaca, Francis Dalardb // Biomaterials. – 2002. – 23. – P. 1995–2002.

98. Большаков, К. А. Химия и технология редких и рассеянных элементов : учеб. пособие для вузов / К. А. Большаков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Высшая школа, 1976. – 360 с.
99. Robin, A. Influence of fluoride concentration and pH on corrosion behavior of titanium in artificial saliva / A. Robin, J. P. Meirelis // Journal of Applied Electrochemistry. – 2007. – Vol. 37. – P. 511–517.
100. Wilhelmsen, W. The influence of hydrofluoric acid and fluoride ion on then corrosion and passive behavior of titanium / W. Wilhelmsen, A. P. Grande // Electrochimica Acta. – 1987. – Vol. 32. – No. 10. – P. 1469-1474.
101. Петухов, Д. И. Пористые анодные оксиды алюминия и титана: структура, свойства, синтез: учеб. пособие / Д. И. Петухов, Р. Г. Валеев, С. М. Решетников. – Ижевск : Издательский центр «Удмуртский университет», 2018. – 122 с.
102. Cattarin, S. Electrodisolution of p-Si in Acidic Fluoride Media Modeling of the Steady State / S. Cattarin, I. Frateur, M. Musiani, B. Tribollet // Journal of The Electrochemical Society. - 2000. – Vol. 147.
103. Doyle, R. L. Redox and electrochemical water splitting catalytic properties of hydrated metal oxide modified electrodes / R. L. Doyle, I. J. Godwin, M. P. Brandona, M. E. G. Lyonsa // Phys. Chem. Chem. Phys. – 2013. – Vol. 15. – P. 13737-13783.
104. Кутепов, А. М. Проблемы и перспективы исследований активируемых плазмой технологических процессов в растворах / А. М. Кутепов, А. Г. Захаров, А. И. Максимов // Доклады Академии наук. – 1997. – Т. 337. – № 6. – С. 782-786.
105. Третьяков, Ю. Д. Химия : справочные материалы / Ю. Д. Третьяков, Н. Н. Олейников. - М. : Просвещение, 1989. – 224 с.
106. Алексеев, Ю. Г. Особенности процессов размерной обработки металлических изделий электролитно-плазменным методом / Ю. Г. Алексеев, А. А. Кособуцкий, А. Ю. Королев [и др.] // Литьё и металлургия. – 2005. – №4 (36). – С. 188-195.
107. Пальтиель, Л. Р. Физическая химия. Поверхностные явления и дисперсионные системы: учеб. пособие / Л. Р. Пальтиель, Г. С. Зенин, Н. Ф. Волынец. – СПб. : СЗТУ, 2004. – 68 с.

108. Пекшева, Н. П. Кинетика и катализ реакций оксидирования титана, кремния, германия и арсенида галлия / Н. П. Пекшева, В. М. Струков // Успехи химии. – 1979. – Т.48. – Выпуск 11. – С. 2034-2060.
109. Jaeger, D. A complete and self-consistent evaluation of XPS spectra of TiN / D. Jaeger, J. Patscheider // Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena. – 2012. – Vol.185. - P. 523–534.
110. Moulder, J. F. Handbook of X-ray Photoelectron Spectroscopy: A Reference Book of Standard Spectra for Identification and Interpretation of XPS Data / J. F. Moulder, W. F. Stickle, P. E. Sobol, K. D. Bomben ; edited by J. Chastain, R. C. King, Jr. – Eden Prairie, Minn. : Physical Electronics, 1995. – 261 p.
111. Hierro-Oliva, M. XPS Analysis of Ti6Al4V Oxidation Under UHV Conditions / M. Hierro-Oliva, A. Gallardo-Moreno, M. González-Martín // Metallurgical and Materials Transactions. – 2014. – Vol. 45. – P. 6285–6290.
112. Воробьёв, В. Л. Влияние компонентов сплава ВТ6 на формирование поверхностных слоев в условиях поочередного облучения ионами Ar^+ и N^+ / В. Л. Воробьёв, П. В. Быков, Ф. З. Гильмутдинов, В. Я. Баянкин // Химическая физика и мезоскопия. – 2023. – Том 25. – № 1. – С. 13-23.
113. Таминдаров, Д. Р. Обеспечение точности лопаток компрессора ГТД из двухфазных титановых сплавов при их электролитно-плазменном полировании / Д. Р. Таминдаров, А. М. Смыслов // Технология машиностроения. – 2025. – №1. – С. 16-20.
114. Madina V. Compatibility of materials with hydrogen. Particular case: Hydrogen embrittlement of titanium alloys / V. Madina, I. Azkarate // International Journal of Hydrogen Energy. – 2009. – Vol. 34. – P. 5976–5980.
115. Smyslova, M. K. Surface electrolytic-plasma polishing of Ti-6Al-4V alloy with ultrafine-grained structure produced by severe plastic deformation / M. K. Smyslova, D. R. Tamindarov, N. V. Plotnikov [et al.] // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering, 14–16 November 2018. – Pilsen, 2018. – Vol. 461 – P. 012079.
116. Андриевский, Р. А. Материаловедение гидридов / Р. А. Андриевский. – М. : Металлургия, 1986. – 128 с.

117. Мубояджян, С. А. Защитные и упрочняющие ионно-плазменные покрытия для лопаток и других ответственных деталей компрессора ГТД / Д. А. Александров, Д. С. Горлов, Л. П. Егорова, Е. Е. Булавинцева // Научные публикации сотрудников ВИАМ. – 2012.
118. Александров, Д. А. Применение комплекса ионно-плазменных технологий для защиты лопаток компрессора вертолетного газотурбинного двигателя от эрозионного износа и фреттинга / Д. А. Александров, Д. С. Горлов, С. А. Будиновский // Труды ВИАМ. – 2021. – № 2 (96). – С. 71–81.
119. Патент 2706263 Российская Федерация, МПК C25F 3/16. Способ электролитно-плазменного полирования изделий из титановых и железохромоникелевых сплавов : № 2019101785 : заявл. 23.01.2019 : опубл. 15.11.2019 / Смыслов А. М., Таминдаров Д. Р., Мингажев А. Д. [и др.] ; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "Научно-производственное предприятие "Уралавиаспецтехнология".
120. Таминдаров, Д. Р. Электролитно-плазменное полирование лопаток компрессора из титановых сплавов / Д. Р. Таминдаров, Н. В. Плотников, А. М. Смыслов // Вестник РГАТА имени П. А. Соловьева. – 2017. – № 1(40). – С. 141-145.
121. Патент 2552203 Российская Федерация, МПК C25F 3/16. Способ полирования деталей из титановых сплавов : № 2013138965/02 : заявл. 20.08.2013 : опубл. 10.06.2015 / Смыслов А. М., Таминдаров Д. Р., Мингажев А. Д. [и др.] ; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "Научно-производственное предприятие "Уралавиаспецтехнология".
122. Смирнов, Н. В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений / Н. В. Смирнов, И. В. Дунин-Барковский. – 3-е изд., стер. – М. : Наука, 1969. – 511 с.
123. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – 2-е изд., М. : Наука, 1976. – 279 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

УТВЕРЖДАЮ

Директор НПА «Технопарк АТ»
И.В. Кандаров
» февраля 2026г.



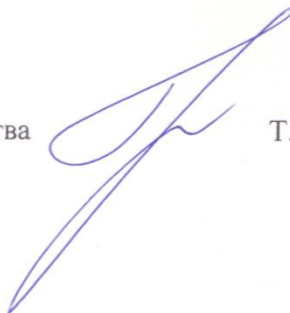
Акт

внедрения результатов кандидатской диссертационной работы
Таминдарова Дамира Рамилевича
на тему «Совершенствование технологии производства
лопаток компрессора ГТД из титановых сплавов
на основе повышения качества их поверхности электролитно-плазменным
полированием»

В диссертационной работе Таминдарова Д.Р. разработан научно-обоснованный способ электролитно-плазменного полирования лопаток компрессора ГТД из двухфазных титановых сплавов, обеспечивающий высокую равномерность обработки профиля пера и снижение параметра шероховатости R_a с 0,30 до 0,10 мкм, что позволяет повысить предел выносливости направляющих лопаток из сплава ВТ6 на 21 МПа (на базе 2×10^7 циклов) по сравнению с серийной ручной полировкой.

Разработанный способ внедрен в технологический процесс ТП №1602-300-219-УГАТУ «Технологический процесс на проведение электролитно-плазменного полирования, ионной имплантации и нанесения многослойного покрытия на направляющие лопатки ГТД», применяемый в основном производстве НПА «Технопарк АТ» для обработки деталей ГТД производства ПАО «ОДК-УМПО».

Начальник отдела серийного производства



Т.А. Юсуфов

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

УТВЕРЖДАЮ

Директор ООО НПП «УАСТ»

В.А. Гонтюрев



02 февраля 2026г.

СПРАВКА

об использовании результатов диссертационной работы
Таминдарова Дамира Рамилевича

Результаты, полученные Таминдаровым Д. Р. в диссертационной работе, выполненной на тему «Совершенствование технологии производства лопаток компрессора ГТД из титановых сплавов на основе повышения качества их поверхности электролитно-плазменным полированием», используются в основном производстве ООО НПП «Уралавиапецтехнология» при проведении электролитно-плазменного полирования рабочих и направляющих лопаток газотурбинных двигателей из титановых сплавов.

В действующих технологических процессах обработки лопаток из двухфазных титановых сплавов ВТ6 и ВТ8М-1 использован разработанный Таминдаровым Д.Р. состав рабочего электролита, позволивший повысить качество обрабатываемых деталей, обеспечить формирование радиуса входной и выходной кромок, повысить равномерность обработки пера лопаток и, таким образом, значительно (на 15-20%) снизить трудоемкость полирования, исключив повторную обработку деталей.

При разработке конструкции установки электролитно-плазменного полирования «ЕРР-50ЕМ» с цифровой системой корректировки «СКП-01» была использована математическая модель, предложенная Таминдаровым Д.Р., определяющая границу его применимости по уровню минимальной концентрации HF.

На разработанные Таминдаровым Д.Р. способы обработки получены патенты на изобретения РФ № 2706263 и № 2706263.

Технический директор, д.т.н.

К.С. Селиванов