МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Уфимский государственный нефтяной технический университет»

На правах рукописи

СЕЛИВАНОВ КОНСТАНТИН СЕРГЕЕВИЧ

МНОГОСЛОЙНЫЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЛОПАТОК ТУРБОМАШИН ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

Специальность: 2.6.17. Материаловедение
(технические науки)

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени
доктора технических наук

Научный консультант:
доктор технических наук, профессор
Кузеев Искандер Рустемович

Уфа – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАЗРАБОТОК В ОБЛАСТИ СОЗДАНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ И СПОСОБОВ ИХ НАНЕСЕНИЯ 15

1.1 Проблема эксплуатации лопаток паровых и газовых турбин 16

1.2 Анализ повреждений лопаток паровых турбин и газотурбинных установок 18

1.3 Способы упрочнения материала поверхности лопаток паровых турбин и компрессоров газотурбинных двигателей из титановых сплавов 31

1.4 Вакуумные ионно-плазменные покрытия 38

1.5 Выводы по главе 1 48

ГЛАВА 2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНЕШНЕГО ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЛОПАТКИ ТУРБОМАШИН С МНОГОСЛОЙНЫМИ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫМИ ПОКРЫТИЯМИ 50

2.1 Моделирование остаточных напряжений в многослойных покрытиях 50

2.2 Теоретическое исследование напряженного состояния в многослойных покрытиях в области трещины 57

2.2.1 Развитие трещины в многослойных композиционных покрытиях 61

2.2.2 Развитие трещины на границе нитридных и титановых слоев 67

2.3 Теоретическое исследование многослойных покрытий при каплеударной эрозии 74

2.3.1 Рассеяние плоских волн при прохождении многослойных покрытий 78

2.3.2 Рассеяние вторичных отраженных волн на границах слоев в многослойных покрытиях 83

2.3.3 Численное моделирование рассеивания упругих волн в многослойных покрытиях 85

2.4 Теоретическое исследование многослойных покрытий при газоабразивном износе 92

2.4.1 Моделирование ударного взаимодействия многослойных покрытий с кварцевыми частицами 96

2.4.2 Моделирование ударного взаимодействия многослойных покрытий с электрокорундовыми частицами 100

2.4.3 Моделирование напряженно-деформированного состояния поверхности при трении абразивной частицей 104

2.5 Выводы по главе 2 114

ГЛАВА 3 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ 116
3.1 Модель формирования ионно-плазменного покрытия при его осаждении с нескольких протяженных ионных источников 116
3.1.1 Нанесение многослойного покрытия на рабочие лопатки паровой турбины 125
3.1.2 Нанесение многослойных покрытий на рабочие лопатки компрессора 129
3.2 Моделирование ионно-имплантационной обработки с нескольких протяженных ионных источников, совмещенных в одном вакуумном объеме 132
3.2.1 Ионное легирование (модификация) азотом рабочих лопаток паровой турбины 133
3.2.2 Ионное легирование (модификация) азотом рабочих лопаток компрессора ГТУ 138
3.3 Выводы по главе 3 145
ГЛАВА 4 ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ 147
4.1 Основные материалы, выбранные для исследования 147
4.1.1 Материалы образцов 148
4.1.2 Материалы для нанесения многослойных ионно-плазменных покрытий 149
4.2 Оборудование и методика металлографических исследований 152
4.3 Оборудование и методики растрового микроскопического и химического анализа 153
4.4 Оборудование и методики рентгеноструктурных исследований 153
4.5 Оборудование и методики просвечивающей электронной микроскопии 154
4.6 Методика измерения микротвердости по глубине поверхности 154
4.7 Оборудование и методики исследования внутренних остаточных напряжений 155
4.7.1 Определение внутренних напряжений первого рода 155
4.7.2 Определение внутренних напряжений второго рода 155
4.8 Оборудование и методика проведения испытаний на стойкость при фреттинге и фреттинг-коррозии 156
4.9 Оборудование и методика проведения испытаний на газоабразивный износ 160
4.10 Методика испытания образцов на каплеударную эрозию 161
4.11 Оборудование и методики испытания на многоцикловую усталость 164
4.12 Оборудование и методика инструментального индентирования материала поверхности алмазными наконечниками 166
4.13 Выводы на главе 4 169

ГЛАВА 5 ИССЛЕДОВАНИЯ И ИСПЫТАНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ 171
5.1 Испытание образцов на газоабразивный износ 171
5.2 Испытание образцов на каплеударную эрозию 181
5.3 Испытание образцов на стойкость при фреттинг-коррозии 188
5.3.1 Испытания на фреттинг-коррозию 189
5.3.2 Исследование дефектности поверхности 197
5.3.3 Исследование особенностей изнашивания многослойных покрытий 199
5.3.4 Испытания на трение скольжения 205
5.4 Испытание на многоцикловую усталость 212
5.4.1 Испытания образцов 212
5.4.2 Испытания рабочих лопаток с износостойкими покрытиями 215
5.4.3 Фрактографическое исследование лопаток с покрытиями после испытания на многоцикловую усталость 217
5.5 Металлографическое исследование образцов с покрытиями 222
5.5.1 Исследование образцов в исходном состоянии и после ионной имплантации 223
– Микроструктура материала поверхности 223
– Элементный состав материала поверхности 225
– Микротвердость материала поверхности 226
5.5.2 Исследование многослойных покрытий типа Ti + TiN 228
– Микроструктура и элементный состав материала покрытия 228
– Элементный состав материала покрытия 233
– Рентгеноструктурный анализ материала покрытия 235
5.5.3 Исследование многослойных покрытий типа (V, Ti) + (V, Ti)N 237
– Микроструктура и элементный состав материала покрытия 237
– Элементный состав материала покрытия 240
– Рентгеноструктурный анализ материала покрытия 241
5.6 Исследование микротвердости 244
5.7 Исследование внутренних остаточных напряжений 246
5.8 Инструментальное индентирование 250
5.9 Выводы по главе 5 256
ГЛАВА 6 УПРОЧНЕНИЕ РАБОЧИХ ЛОПАТОК ПАРОВЫХ ТУРБИН И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ 261

6.1 Основные требования к упрочнению лопаток газовых и паровых турбин 261
6.2 Разработка технологического процесса для обработки лопаток паровых и газовых турбин из титановых сплавов 262
6.2.1 Требования к материалам и заготовкам лопаток 262
6.2.2 Электролитно-плазменное полирование лопаток из титановых сплавов 263
6.2.3 Комплексная вакуумная ионно-плазменная обработка 265
– Очистка поверхности в тлеющем разряде 266
– Ионная имплантация (модификация) поверхности 266
– Ионный нагрев деталей 268
– Осаждение многослойного ионно-плазменного покрытия 270
6.3 Контроль качества покрытия 274
6.4 Технологическое оборудование и физические устройства, применяемые для нанесения многослойных ионно-плазменных покрытий 276
6.5 Практический опыт применения разработанных технологических процессов упрочнения лопаток последних ступеней ТНД паровых турбин 279
6.6 Практический опыт применения разработанных технологических процессов упрочнения рабочих лопаток компрессора ГТД 284
6.7 Выводы по главе 6 284
ГЛАВА 7 ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ МНОГОСЛОЙНЫХ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИОННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ 287
7.1 Нейросетевая модель газоабразивного износа 290
7.2 Нейросетевая модель каплеударной эрозии 298
7.3 Прогнозирование эксплуатационной долговечности лопаток с покрытиями при газоабразивном износе 302
7.4 Расчетное прогнозирование свойств многослойных покрытий при длительной эксплуатации лопаток компрессора ГТД 307
7.5 Прогнозирование эксплуатационной долговечности лопаток с покрытиями при каплеударной эрозии 312
7.6 Расчетное прогнозирование свойств многослойных покрытий при длительной эксплуатации лопаток паровых турбин 314
7.7 Выводы по главе 7 316
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 319
Список сокращений и условных обозначений 323

Словарь терминов 324
Список литературы..... 326
Приложение А. Результаты численного моделирования удара твердых частиц о поверхность с многослойным ионно-плазменным покрытием 352
Приложение Б. Процессы комплексной ионно-плазменной обработки 357
Приложение В. Компьютерная программа, реализующая модель нанесения ионно-плазменных покрытий при работе нескольких протяженных ионных источников..... 389
Приложение Г. Экспериментальные результаты испытания многослойных ионно-плазменных покрытий из различных материалов на газоабразивный износ 393
Приложение Д. Экспериментальные результаты усталостных испытаний..... 402
Приложение Е. Экспериментальные результаты инструментального индентирования 408
Приложение Ж. Нормативно-техническая документация, разработанная на основании проведенных исследований упрочнения лопаток из титановых сплавов 421
Приложение И. Экспериментальные данные для верификации математических моделей 428
Приложение К. Акты о внедрении..... 430

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

В соответствии с «Энергетической стратегией Российской Федерации на период до 2035 года» (утверждена распоряжением Правительства РФ от 09.06.2020 г., № 1523-р) и «Прогнозом научно-технологического развития Российской Федерации на период до 2030 года» (утвержден Правительством РФ 03.01.2014 г.) одним из приоритетных направлений развития топливно-энергетического комплекса РФ в средне и долгосрочной перспективе является разработка новых конструкционных материалов и покрытий, обеспечивающих защиту деталей машин энергетического оборудования. Разработка новых материалов, покрытий и технологий их нанесения наиболее актуальна и востребована при производстве особо ответственных и самых массовых деталей энергогенерирующего оборудования – рабочих и направляющих лопаток паровых и газовых турбин, изготавливаемых из титановых сплавов. Перспективность использования этих сплавов обусловлена высокой удельной прочностью, позволяющей уменьшить вес деталей, снизить уровень центробежных и вибрационных нагрузок, повысить прочность, коррозионную стойкость.

Основными проблемами эксплуатации лопаток из титановых сплавов являются: чувствительность к поверхностным дефектам, снижающим сопротивление усталости, и низкие триботехнические свойства, обусловливающие высокий износ при газоабразивном, эрозионном воздействии, фреттинге, приводящий к ускоренному разрушению деталей. Экономические потери при повышенном износе или поломке лопаточного аппарата обусловлены риском аварийного разрушения дорогостоящего энергогенерирующего или газотранспортного оборудования, затратами на проведение его диагностики, ремонтно-восстановительных работ, вынужденным простоем, недовыработкой энергии или недопоставкой объема газа.

В диссертационной работе теоретически показано и экспериментально подтверждено, что повышение долговечности лопаток энергогенерирующих и газотранспортных установок достигается созданием на их поверхности износостойких многослойных покрытий с заданной конструкцией (материал, толщина, количество слоев), формируемой вакуумной ионно-плазменной обработкой. Полученные результаты позволили разработать технологические процессы и промышленное оборудование, применяемые в области энергетического машиностроения для нанесения износостойких покрытий на лопатки газовых и паровых турбин.

Степень разработанности темы исследования

В последнее десятилетие наиболее динамично развиваются технологии обработки и полу-

чения новых материалов, относящиеся к Перечню важнейших наукоемких технологий Российской Федерации (утверждён Указом Президента РФ № 529 от 18.06.2024 г.). Проблемой получения новых материалов, покрытий и упрочнения деталей машин занимаются ведущие отечественные и зарубежные научно-исследовательские центры: ФГУП «НИЦ «Курчатовский институт»-«ВИАМ», ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», ФГБОУ ВО «Московский государственный институт стали и сплавов (технологический университет)», МГТУ «Станкин», ГОУ ВПО «Ульяновский государственный технический университет»; зарубежные фирмы: Sandvik AB (Sweden), OC Oerlikon Corporation AG (Switzerland), Sulzer AG (Switzerland), Siemens (Germany) и др. Наиболее полно в настоящее время исследованы износостойкие покрытия, применяемые для повышения стойкости режущего инструмента, штампов, пресс-форм. Большой вклад в исследование этой проблемы внесен Верещакой А.С., Табаковым В.П., Андреевым А.А., Саблевым Л.П., Шулаевым В.М., Григорьевым С.Н. и др. Применительно к упрочнению лопаток газотурбинных двигателей (ГТД), исследования и внедрение ионно-плазменных технологий в реальное производство активно проводятся ГНЦ «ЦИАМ им. П.И. Баранова», «НИЦ «Курчатовский институт»-«ВИАМ», ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет». В ВИАМ под руководством д.т.н., профессора С. А. Мубояджяна было создано научное направление в авиационном материаловедении, занимающееся разработкой «*вакуумных плазменных технологий высоких энергий*». Для решения проблемы надежности и долговечности энергетического оборудования в НИУ «Московский энергетический университет» (МЭИ) под руководством д.т.н., профессора, А.М. Рыженкова был создан научный центр «Износостойкость», где на протяжении ряда лет проводились активные исследования каплеударной эрозии лопаток паровых турбин, в том числе с защитными покрытиями.

Исследованию упрочнения лопаток газовых и паровых турбин посвящены работы Сулимы А.М., Евстигнеева М.И., Мубояджяна С.А., Будиновского С.А., Рыженкова А.М., Крайнова В.К., Кротинова Н.Б., Барвинка В.А., Бецофена С.Я., Лозована А.А., Смыслова А.М., Шехтмана С.Р., Душкина А.М., Кудрякова О.В., Варавки В.Н., Белоуса В.А. и др.

Проблема упрочнения лопаток турбомашин из титановых сплавов в настоящее время является актуальной, требующей систематических исследований взаимосвязей состава и структуры защитных покрытий с их физико-механическими и эксплуатационными свойствами применительно к конкретным условиям работы деталей.

Цели и задачи исследования

Целью работы является научное обоснование и разработка износостойких ионно-плазменных покрытий на основе тугоплавких металлов IV-V групп и их нитридов для повышения долго-

вечности лопаток газовых и паровых турбин из титановых сплавов, эксплуатирующихся в условиях газоабразивного изнашивания, каплеударной эрозии и фреттинга.

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

1 Анализ причин преждевременного разрушения рабочих и направляющих лопаток турбомашин. Обобщение мирового опыта в области исследований влияния материала, структуры и состава износостойких покрытий, а также способов их нанесения на эксплуатационные свойства лопаток газовых и паровых турбин из титановых сплавов.

2 Разработка математических моделей многослойных покрытий, проведение теоретических исследований процессов их разрушения при газоабразивном изнашивании и каплеударной эрозии. Разработка требований к материалу, толщине и количеству слоев покрытий, наносимых на лопатки паровых и газовых турбин с целью их защиты от внешнего эксплуатационного воздействия.

3 Обоснование выбора известных экспериментальных и расчетных методов исследований. Разработка методики определения механических свойств многослойных ионно-плазменных покрытий инструментальным индентированием. Модернизация установки для испытаний на фреттинг и фреттинг-коррозию образцов с криволинейными поверхностями, имитирующими бандажное сопряжение лопаток турбомашин.

4 Разработка износостойких композиций ионно-плазменных покрытий на основе тугоплавких металлов IV-V групп и их нитридов с различным количеством и составом слоев. Проведение и анализ экспериментальных исследований влияния материала, количества и толщины слоев покрытий на износостойкость при газоабразивном изнашивании, каплеударной эрозии, фреттинге. Определение влияния исследуемых покрытий на сопротивление усталости лопаток из титановых сплавов.

5 Прогнозирование долговечности лопаток газовых и паровых турбин с износостойкими покрытиями по результатам ускоренных испытаний материала поверхности на газоабразивный износ и каплеударную эрозию.

6 Разработка научно обоснованных рекомендаций и новых способов нанесения многослойных ионно-плазменных покрытий на лопатки паровых и газовых турбин из титановых сплавов.

7 Модернизация технологического оборудования. Внедрение разработанных рекомендаций, технических условий и технологических процессов в производство лопаток газовых и паровых турбин.

Научная новизна

1 Научно обосновано, что повышение износостойкости титановых сплавов обеспечива-

ется за счет нанесения на их поверхности многослойных покрытий на основе тугоплавких металлов IV-V групп и их нитридов. Целенаправленно изменяя материал, толщину и количество слоев покрытия, можно управлять механизмом и кинетикой процессов изнашивания лопаток турбомашин при газоабразивном, каплеударном воздействии, фреттинге и фреттинг-коррозии. Экспериментально доказано существенное повышение износостойкости титановых сплавов с нанесенными покрытиями: при газоабразивном изнашивании до 12,3 раз; при каплеударной эрозии до 2,8 раз; при фреттинг-коррозии до 8,1 раза.

2 Установлено, что при нанесении в среде реакционного газа (азота) нитридных слоев титан-ванадиевого покрытия (V, Ti)N в результате протекания плазмохимических реакций образуются твердые растворы внедрения азота в кристаллическую решетку титана и ванадия. Это обусловливает формирование кристаллических структур с некогерентными межфазными границами, преимущественно соответствующих нитридным фазам: δ-TiN (55,4 отн. %) и VN (20,2 отн. %), являющихся эффективными барьерами для протекания пластической деформации.

3 Теоретически показано и экспериментально подтверждено, что повышение износостойкости при газоабразивном изнашивании и каплеударной эрозии обеспечивается за счет сопротивления возникновению первичных (зародышевых) трещин и сдерживания их развития на границах металлических и нитридных слоев покрытия. Для этого толщина нитридных слоев должна не менее, чем в два раза превышать глубину действия максимальных напряжений, возникающих от удара твердыми или жидкими частицами. Покрытие должно состоять из чередующихся нитридных и металлических слоев при соотношении их толщин 4:1. Это значительно (до 50%) уменьшает размер зоны пластической деформации, возникающей в металлических слоях перед трещиной, и обусловливает ее развитие вдоль границ слоев без перехода в материал подложки. Твердость нитридных слоев должна превышать твердость абразивных частиц более, чем в 1,5 раза.

4 Для оценки стойкости многослойных покрытий к каплеударной эрозии теоретически обосновано применение критерия максимального рассеяния упругой волны $max(D)$, учитывающего параметры конструкции покрытия (материал, толщина, количество слоев), физико-механические свойства (плотность, модуль упругости, скорость звука), а также конкретные условия эксплуатации рабочих лопаток паровых турбин (размер капель, угол падения, скорость удара, температура рабочей среды). Экспериментально установлена линейная зависимость относительной износостойкости многослойных покрытий при каплеударной эрозии от величины $lg(D)$, что подтверждает сделанное теоретические предположение о том, что наиболее износостойким покрытием является то, которое способно максимально полно рассеивать упругую деформацию, возникающую вследствие удара каплями.

5 Экспериментально установлено и теоретически обосновано, что повышение стойкости к фреттингу и фреттинг-коррозии титановых сплавов обеспечивается за счет включения в состав

многослойных нитридных покрытий слоев α-Ti толщиной не менее 0,5 мкм. При изнашивании нитридных слоев титан попадает в зону трения, окисляется и выступает в качестве твердой смазки, обеспечивая износостойкость материала в зоне трения.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость работы заключается в научном обосновании возможности применения многослойных ионно-плазменных покрытий на основе тугоплавких металлов IV-V групп и их нитридов для повышения износостойкости и долговечности лопаток газовых и паровых турбин из титановых сплавов, эксплуатирующихся в условиях газоабразивного изнашивания, каплеударной эрозии, фреттинга и фреттинг-коррозии.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1 Разработаны способы нанесения многослойных ионно-плазменных покрытий на лопатки турбомашин из титановых сплавов (патенты РФ №2768945, №2478140, №2388685, №2373302, №2375493, №2403316, №2390578, №2677041, №2655563, №2479667), позволяющие формировать на упрочняемых деталях слоистые композиции с заданным количеством, толщиной и материалом слоев. Разработанные способы использованы в энергетическом турбостроении для повышения износостойкости и циклической долговечности лопаток газовых и паровых турбин.

2 Разработаны конструкции вакуумных установок (патенты РФ №2425173, №2710809, №2380456) и электродуговых испарителей (патенты РФ №2399692, №2376398, №2380457, №2404284, №2420608), позволяющие путем совмещения в одном вакуумном объеме нескольких ионных источников реализовать различные способы нанесения ионно-плазменных покрытий на лопатки турбомашин.

3 Совместно с ООО «Газпром инвест» (г. Санкт-Петербург) автором разработаны рекомендации и технологические процессы нанесения износостойких ионно-плазменных покрытий на рабочие и направляющие лопатки стационарных ГТУ импортного производства. Проведенное внедрение технологических процессов на отечественных предприятиях ПАО «Газпром» позволило изготовить и отремонтировать импортные комплектующие для ГТУ SGT-600 (всего более 250 наименований). Упрочненные запасные части работают в составе агрегатов, эксплуатируемых в ПАО «Газпром» с 2018 года.

4 Разработана математическая модель нанесения многослойных ионно-плазменных покрытий на лопатки турбомашин при их планетарном вращении вокруг собственной оси и оси вакуумной камеры, позволяющая с точностью до 50 нм/мин прогнозировать скорость роста покрытия и количественное соотношение материалов, наносимых с нескольких одновременно работающих ионных источников. Экспериментальное подтверждение разработанной модели позволило автору совместно с АО «ОДК-Климов» (г. Санкт-Петербург) разработать Технические

условия (ТУ) №0274-001-2015 «Двухстадийное коррозионностойкое покрытие, наносимое на рабочие лопатки и направляющие аппараты компрессора ГТД РД-33МК», внедренные в конструкторскую документацию. При обработке деталей было обеспечено снижение класса шероховатости поверхности относительно базового серийного покрытия, повышение сплошности наносимого многослойного покрытия (отсутствие расслоения и фрагментации), равномерности и прочности его сцепления с основой.

Разработанные ТУ с 2015 года по настоящее время используются в серийном производстве при нанесении защитных покрытий на рабочие лопатки и направляющие аппараты компрессора изделий РД-33МК и РД-93МА.

5 Разработанные способы формирования многослойных ионно-плазменных покрытий внедрены в серийное производство ООО «Научно-производственное предприятие «Уралавиаспецтехнология» (г. Уфа) в виде технологических процессов упрочнения лопаток газовых и паровых турбин (№ВАТТ.900.006.000, №ВАТТ.900.007.000-2016, №УАСТ-1-001/1-16, №УАСТ-1-002/1-19, №203-01-04), что позволило повысить их износостойкость при газоабразивном изнашивании, каплеударной эрозии и фреттинг-коррозии от 3 до 12 раз. В настоящее время по разработанным технологиям обработано более 10 000 рабочих лопаток из титановых сплавов последних ступеней ЦНД паровых турбин, а также рабочих лопаток реактивного ЦВД и лопаток, работающих в зоне фазового перехода паровых турбин производства АО «Силовые машины» (г. Санкт-Петербург).

6 Разработан способ оценки прочности сцепления многослойного покрытия (патент РФ №2728732) и методика инструментального индентирования, внедренная в производство ООО «Научно-производственное предприятие «Уралавиаспецтехнология» (г. Уфа), в виде методических указаний №УАСТ-024-001-00 «Контроль механических свойств и адгезионной прочности твердых покрытий при их индентировании алмазными наконечниками». Данная методика позволяет проводить контроль механических свойств защитных покрытий и широко используется при проведении научно-исследовательских, опытно-технологических, разработке новых технологий их нанесения.

Методология и методы исследования

Методология исследований заключалась в поэтапном изучении структурных, физико-механических и эксплуатационных свойств многослойных покрытий при различном сочетании их толщины, количества и материала слоев. При этом применялись усовершенствованные автором экспериментальные методы испытаний материалов на фреттинг и фреттинг-коррозию, определения максимальных контактных напряжений при инструментальном индентировании по методу

ASTM C1624-2022, а также стандартные методы исследования, включающие оптическую металлографию, растровую электронную микроскопию, энергодисперсионный и волновой микроанализ, рентгеноструктурный анализ, определение микротвердости, адгезионной прочности, износостойкости и усталостной прочности.

Положения, выносимые на защиту

1 Научное обоснование возможности и перспективности применения многослойных ионно-плазменных покрытий для упрочнения лопаток из титановых сплавов с целью повышения их долговечности.

2 Доказательство достоверности установленных способов обеспечения износостойкости многослойных покрытий в условиях газоабразивного изнашивания, каплеударной эрозии и фреттинга.

3 Доказательство достоверности установленных экспериментальных зависимостей износостойкости многослойных покрытий от параметров их конструкции (материал, толщина, количество слоев).

4 Обоснование корректности предлагаемых в работе расчетных методов прогнозирования долговечности лопаток из титановых сплавов с износостойкими покрытиями.

5 Научное обоснование разработанных в работе практических рекомендаций по упрочнению лопаток газовых и паровых турбин энергетического оборудования.

Степень достоверности и апробация результатов исследования

Достоверность результатов работы обеспечивалась путем применения общепризнанных апробированных и государственных методик экспериментальных исследований, выполненных на оборудовании, прошедшем государственную поверку. Все экспериментальные данные обрабатывались с использованием положений теории ошибок эксперимента и математической статистики.

Основные положения диссертационной работы докладывались на _Международной конференции «Надежность и качество в промышленности, энергетике и на транспорте» (Самара, 1999); XXV Международная молодёжная научная конференция «Гагаринские чтения» (Москва, 1999); Объединенная международная научно-техническая конференция «Проблемы конструкционной прочности двигателей» (Самара, 1999); X Межнациональное совещание «Радиационная физика твердого тела» (Севастополь, 2000); Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы создания перспективных авиационных двигателей» (Москва, 2015); Научно-техническая конференция «110 лет отечественного паротурбиностроения» (Санкт-Петербург, 2017); 7th International Conference on Nanomaterials by Severe Plastic Deformation «NanoSPD7» (Sydney,

2017); Научно-техническая конференция «Климовские чтения – 2022: перспективные направления развития авиадвигателестроения» (Санкт-Петербург, 2022).

Диссертационная работа выполнялась в рамках Государственных научно-технических программ: Грант РНФ, проект №19-79-10108 «Повышенные эксплуатационные свойства и механизмы разрушения ультрамелкозернистых титановых сплавов в сочетании с наноструктурированными покрытиями», 2019…2021 г.г.; Грант РНФ, проект №16-19-10356 «Разработка научных основ повышения эксплуатационных свойств титановых сплавов за счет комплексного модифицирования структуры в объеме и поверхностном слое», 2016…2018 г.г.; проект ФЦП «Повышение надежности и ресурса газотурбинных двигателей транспортных средств, эксплуатирующихся в условиях запыленной атмосферы и морской среды», 2009…2013 г.г.; проект ФЦП «Разработка новых многофункциональных покрытий и технологий их нанесения», 2007…2009 г.г.; НИР «Ионно-имплантационное модифицирование поверхности деталей ГТД с целью многократного повышения эксплуатационных свойств» (договор с ПАО «ОДК-УМПО», Уфа), 2005 г.; НИР «Разработка технологии и модернизация установки ЭЛУ-9Б для упрочнения бандажных полок титановых рабочих лопаток последних ступеней ЦНД ТЭС «Альхольма», методом ионной имплантации с применением упрочняющего покрытия» (договор с АО «Силовые машины-ЛМЗ», Санкт-Петербург), 2009 г.

Публикации

По теме диссертационной работы опубликовано 45 научные публикации, в т.ч. 11 статей в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК, 8 статей - в рецензируемых журналах, включенных в базы данных Scopus и Web of Science, 3 - в других изданиях; 2 монографии; 1 учебное пособие; получено 20 патентов РФ на изобретение.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 7 глав, заключения, списка литературы из 312 наименований источников, списка сокращений и условных обозначений, словаря терминов, 9 приложений. Работа изложена на 439 страницах машинописного текста, включающих 50 таблиц и 218 рисунков.

ГЛАВА 1
АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАЗРАБОТОК В ОБЛАСТИ СОЗДАНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ И СПОСОБОВ ИХ НАНЕСЕНИЯ

Стратегия энергетической политики России до 2035 года [1] определяет, что реакция на начавшийся в 2014 году геополитический кризис, который привел к введению рядом стран финансовых и технологических ограничений против России, требует кардинального ускорения научно-технологического развития страны. В Стратегии отмечается, что современная энергетика России при решении проблемы энергетической безопасности сталкивается со сложным комплексом внутренних и внешних вызовов. Среди основных внутренних проблем и ограничений выделено в том числе технологическое отставание некоторых сегментов российского топливно-энергетического комплекса (ТЭК) от передового уровня и чувствительная зависимость от импорта некоторых видов оборудования (газовые турбины, газоперекачивающие агрегаты и др.), материалов, запасных частей [1]. Отмечается, что зависимость российской энергетики от иностранных технологий, оборудования, материалов по ряду направлений достигла критической отметки и создала угрозы энергетической безопасности России. В связи с этим, для преодоления упомянутых кризисных явлений одна из ключевых ролей отведена развитию новых технологий и производству конкурентоспособных образцов техники с применением современных материалов.

Наиболее перспективные области развития науки и технологий РФ, обеспечивающие реализацию конкурентных преимуществ страны, изложены в Прогнозе научно-технологического развития Российской Федерации на период до 2030 года. В соответствии этим документом одним из приоритетных направлений развития ТЭК в средне- и долгосрочной перспективе является разработка перспективных материалов для энергетики и электротехники, обладающих повышенной прочностью, в. т.ч. функциональных покрытий, обеспечивающих защиту деталей машин и долговечность изделий вцелом. При этом, особо подчеркивается необходимость создания новых инновационных материалов и технологий их получения, а именно композиционных керамических материалов с особыми свойствами, износостойких и антифрикционных покрытий, адгезивных материалов и др. [2].

Разработка новых инновационных материалов, покрытий, наукоемких технологий и современного промышленного оборудования для их реализации решает несколько крупных задач Российского энергомашиностроения:

– повышение конкурентоспособности существующих образцов отечественной техники, газовых и паровых турбин, в части их надежности и обеспечения заданных служебных свойств, как следствие, увеличение доли рынка энергетического оборудования, в т.ч. в странах ЕАЭС и за рубежом;

– повышение эффективности существующего энергогенерирующего оборудования, увеличение межремонтного периода его эксплуатации и сокращение потребности в запасных частях;

– формирование научно-технического задела, необходимого для создания новых образцов газовых и паровых турбин, в т.ч. импортных аналогов с целью их импортозамещения.

Таким образом на данный момент, главной задачей научно-исследовательской и инновационной деятельности предприятий ТЭК является необходимость практического применения научных разработок в области новых материалов и технологий их получения с целью преодоления научно-технической и технологической зависимости РФ в этой сфере от импортных технологий и оборудования энергетического машиностроения [1].

1.1 Проблема эксплуатации лопаток паровых и газовых турбин

Порядка 80% от общей установленной мощности всех электростанций России приходится на тепловые и атомные станции, основу которых составляют паровые (50% от всех турбин) и, в меньшей степени, парогазовые (14,9%) и газовые (4,5%) турбинные установки [3].

Одним из наиболее напряженных узлов энергетической турбины, в значительной степени определяющим экономичность, надежность и конструктивную схему всего турбоагрегата, является его лопаточный аппарат. Для паровых турбин наиболее важным при этом является цилиндр низкого давления (ЦНД), где установлены лопатки максимального размера [4, 5], а, следовательно, подверженные наибольшим механическим и вибрационным нагрузкам.

Наиболее нагруженными лопатками газотурбинного двигателя являются рабочие лопатки компрессора [6]. Они работают в экстремальных условиях сложного напряженно-деформированного состояния, сочетающих в себе знакопеременные циклические нагрузки, воздействие газоабразивного износа, коррозионной среды и повышенных температур до 400-600 °С на последних ступенях некоторых компрессоров) [7-14].

Наиболее перспективнысми материалами для изготовления высоконагруженных деталей, в т.ч. лопаток паровых и газовых турбинных установок с точки зрения конструктора являются титановых сплавы, которые характеризуются высокой кратковременной и длительной прочностью на равне со сталями в широком диапазоне температур эксплуатации, вплоть до 600°С [15]. Также одним из основных преимуществ титановых сплавов по сравнению со сталями является их относительно невысокая плотность. Это свойство наиболее полно используется при проектировании деталей с повышенными габаритными размерами, например, оболочечных корпусов больших диаметров или рабочих лопаток последних ступеней ЦНД паровых электростанций с высотным размером до 1400 мм. Кроме того, при одинаковых уровнях резонансных колебаний

уровень переменных напряжений в титановых лопатках ниже, чем в стальных [15], что обеспечивает их виброустойчивость и повышенную усталостную прочность в широком диапазоне частот колебаний.

Проблема эксплуатации деталей из титановых сплавов связана с высокой чувствительности этих сплавов к различного вида концентраторам напряжений, возникающих как на стадии производства, так и при эксплуатации в составе изделий [16]. В Таблице 1.1 приведены обобщенные статистические данные по преобладающим видам повреждений деталей проточной части паровых турбин [17, 18]: лопатки, валы ротора, диафрагмы, обоймы, муфты, диски, уплотнения и др. Из приведенных данных видно, что наиболее повреждаемыми деталями являются рабочие лопатки паровых турбин. На них приходится примерно половина от всего числа повреждений проточной части [17] вследствие того, что эти детали кроме значительных механических, в основном центробежных нагрузок, испытывают повышенную вибрацию на переходных режимах, контактное взаимодействие (в местах крепежа и бандажного зацепления), агрессивное воздействие внешней среды, например, коррозионный, газоабразивный износ, каплеударную эрозию.

Основными причинами преждевременного разрушения лопаток компрессора, как наиболее массовой детали ГТД, являются [19]:

а) усталостное многоцикловое разрушение – 60…70%;

б) усталостное малоцикловое разрушение – 15…20%;

в) разрушение по причине недостаточной длительной прочности – 10…12%;

г) разрушение по причине недостаточной термопрочности – 7%;

д) недопустимое изменение геометрии по причине механического износа – 2%.

Таблица 1.1 – Повреждения элементов проточных частей паровых турбин по актам дефектации при плановых ремонтах [17, 18]

Элементы проточного тракта	Механический износ	Эрозионные	Коррозионные	Отложения в проточной части
Валы роторов	1	3*	6	–
Уплотнения	74	9	28	2
Диски рабочих колес	1	–	6	4
Рабочие лопатки и бандажи	82	56**	11	31
Направляющие лопатки, диафрагмы и обоймы	30	20	4	8
Цилиндры	–	7	2	1
Элементы парораспределения	–	2	1	–
Всего, %	48	25	15	12

* Электроэрозия шеек роторов; ** В том числе 32 случая за зоной фазового перехода.

По данным статистических наблюдений [20] за последние десять лет по причине преждевременного разрушения рабочих лопаток компрессора ГТД из титановых сплавов было выведено в ремонт 497 двигателя (Таблица 1.2). Основной причиной разрушения лопаток являются: прижоги (охрупчивание поверхностного слоя металла при локальном термическом воздействии и окислении) и наличие механических концентраторов напряжения в виде забоин поверхности пера и замятий торцев.

Таблица 1.2 – Распределение повреждений деталей ГТД [20]

Повреждения газовоздушного тракта компрессора низкого (КНД) и высокого давления (КВД)	Кол-во двигателей	%
Первая ступень КНД, сплав ВТ6	337	67,8
Вторая ступень КНД, сплав ВТ6	140	28,2
Третья ступень КНД, сплав ВТ6	18	3,6
Четвёртая ступень КНД, сплав ВТ6	1	0,2
Повреждения КВД (ВТ18У, ЭП-718)	1	0,2

1.2 Анализ повреждений рабочих лопаток паровых турбин и газотурбинных установок

Одной из основных проблем эксплуатации лопаток из титановых сплавов является их повышенная чувствительность к концентраторам напряжений. Такими концентраторами, кроме механических повреждений, могут также выступать различные неоднородности материала по макро- и микроструктуре, наличие включений и прижогов [15]. Как правило, основное количество таких дефектов связано с нарушениями технологий изготовления и сборки на одном из этапов производства лопаток. Наличие на титановых лопатках механических концентраторов напряжений, как правило, приводит к возникновения усталостных дефектов (главным образом трещин) вследствие исчерпания материалом запасов прочности и циклической долговечности в условиях активного протекания процессов эрозионного и коррозионного изнашивания. По данным НИУ «МЭИ» особенно остро эта проблема стоит для большеразмерных титановых лопаток последних ступеней паровых турбин, которые в большей степени подвержены эрозионному износу, а также для лопаток зоны фазового перехода, работающих в условиях активного воздействия коррозионной среды [22, 252].

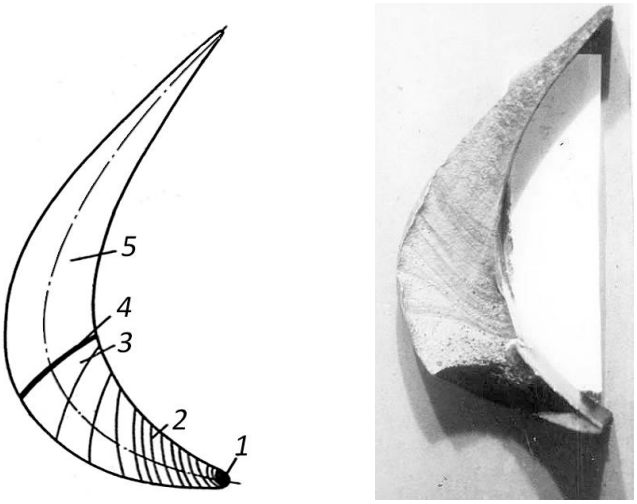
Рассмотрим подробнее основные причины разрушения рабочих лопаток паровых турбин и газотурбинных установок.

Усталостное разрушение материала лопаток

Разрушение рабочих лопаток паровых турбин и ГТУ по причине исчерпания их материалом запаса прочности, как было сказано выше, составляет около половины от всех аварийных случаев. В работах [4] приводятся две основные причины преждевременного усталостного разрушения металла и отрыва пера рабочих лопаток:

– зарождение и развитие многоцикловых усталостных трещин, вызванное повышенной продолжительной вибрацией (Рисунок 1.1);

– действие чрезмерных центробежных и изгибающих сил, вызывающих малоцикловую усталость.



а *б*

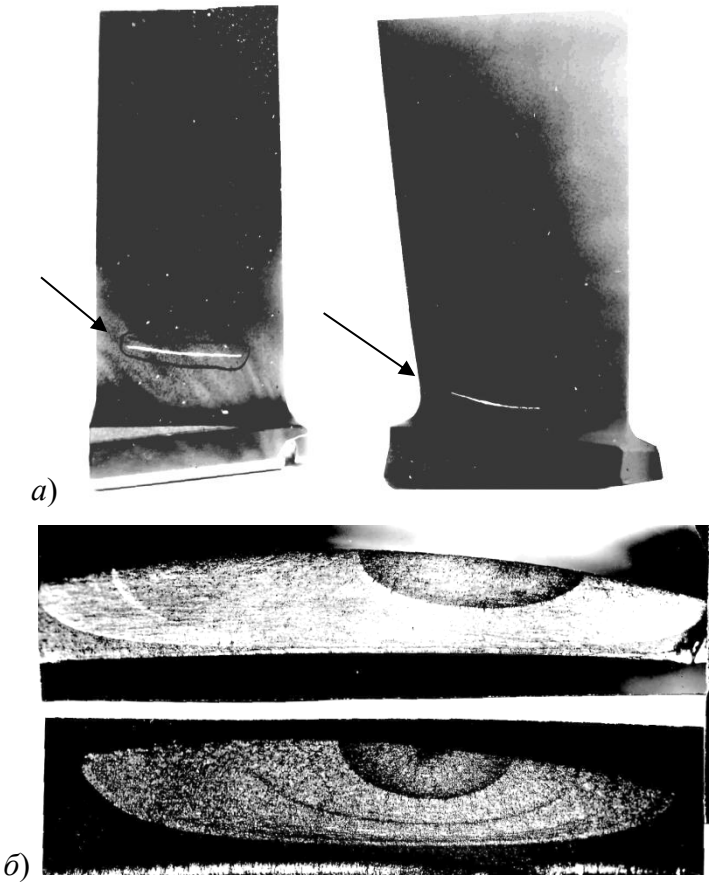
а – схема усталостного излома; *б* – усталостный излом стальной лопатки паровой турбины мощностью 220 МВт

1 – очаг разрушения; *2* – линии отдыха; *3* – зона ускоренного развития трещины; *4* – фронт трещины; *5* – зона ускоренного разрушения, долома

Рисунок 1.1 – Пример усталостного разрушения рабочей лопатки паровой турбины [23, 24]

При возникновении в материале лопатки даже незначительных (менее предела упругости) знакопеременных или меняющихся по величине напряжений в некоторых кристаллографических плоскостях зерен вследствие структурной неоднородности металла происходят микропластические деформации. Такие деформации обусловлены движением дислокаций и их скоплением вблизи структурных неоднородностей материала, по границам зерен или включений. Увеличение плотности дислокаций вдоль линий скольжения приводит к накоплению структурных дефектов

металла, исчерпанию запасов пластичности и, как следствие, повышению хрупкости. По мере увеличения числа циклов нагружения в охрупчненном слое материала возникает очаг усталостного разрушения, дающий начало развитию трещины и разрушению лопатки (Рисунок 1.1). В рабочих лопатках очаг усталостного разрушения чаще всего наблюдается в материале поверхности, в областях с максимальным уровнем действующих напряжений: на кромках пера лопатки, в галтельных переходах пера в хвостовик, в области бандажных отверстий и возможных поверхностных дефектов в виде механических рисок, царапин, забоин [4, 25], как это показано на Рисунке 1.2.



а)

б)

а – расположение трещин (указаны стрелками); *б* – вид усталостного излома с очагом, расположенным на поверхности пера лопатки

Рисунок 1.2 – Внешний вид расположения трещины лопаток РКНД ГТД после контроля ЛЮМ-1ОВ [20]

Рисунок 1.3 – Характер разрушения лопатки 4 ступени РКВД из сплава ВТ18У двигателя семейства АЛ31 по высокочастотной форме [20]

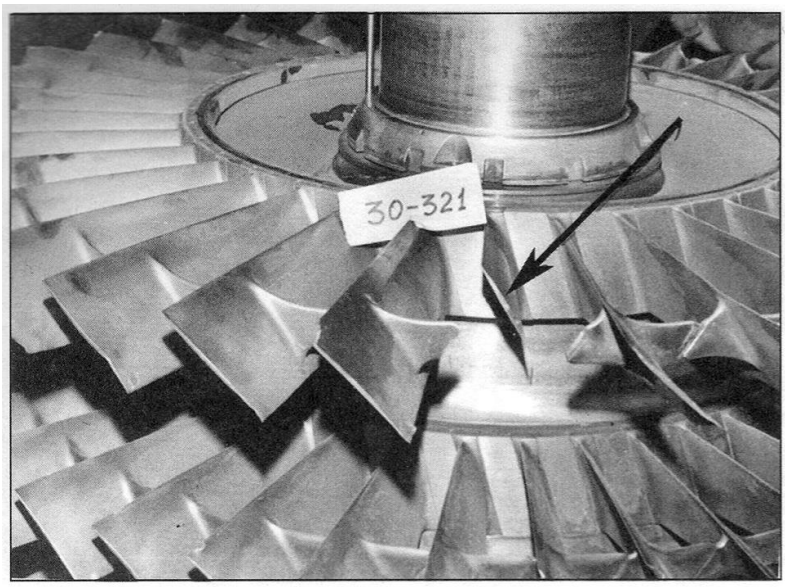


Рисунок 1.4 – Пример ускоренного усталостного разрушения лопатки компрессора по высокочастотной форме колебания (место разрушения показано стрелкой) вследствие преждевременного износа бандажных полок [25]

Дубин А.И. в работах [20, 21] отмечает, что наиболее типичной причиной эксплуатационных разрушений большинства титановых лопаток компрессора ГТД является отсутствие достаточной выносливости по высокочастотной изгибно-крутильной форме колебаний, в т.ч. в условиях высокотемпературного окисления, характерного для лопаток последних ступеней компрессора. Типичный характер такого разрушения лопатки 4-й ступени РКВД из сплава ВТ18У приведён на Рисунке 1.3.

Ускоренному развитию усталостных процессов в пере рабочих лопаток ГТД также может приводить сопутствующий износ элементов их конструкции, например, антивибрационных полок. В этом случае происходит ослабевание натяга между лопатками («разбандажирование») и, как следствие, появление высокочастотного воздействия на перо лопаток значительных переменных изгибных и крутильных колебаний. Пример такого разрушения рабочих лопаток 1-й ступени КВД двигателя Д-30КУ, изготовленных из титанового сплава ВТ3-1, показан на Рисунке 1.4 [25].

Особенностью высокочастотного усталостного разрушения титановых лопаток с повышенной амплитудой колебания является то, что усталостные трещины начинаются из-под поверхности и характеризуются достаточно протяженным очагом разрушения, ориентированным вдоль хорды пера лопатки (Рисунок 1.5). Кроме разрушения пера лопаток, высокочастотное вибрационное воздействие ускоряет процессы фреттинга в местах контакта хвостовика лопатки пазов диска, что приводит к возникновению поверхностных повреждений, в том числе усталостных трещин в диске.

В методических указаниях о порядке оценки работоспособности лопаточного аппарата в процессе изготовления, эксплуатации и ремонта [26] определены основные дефекты, приводящие к его ускоренному разрушению:

а) механические забоины, риски, волосовины и другие протяженные дефекты на входных, выходных кромках;

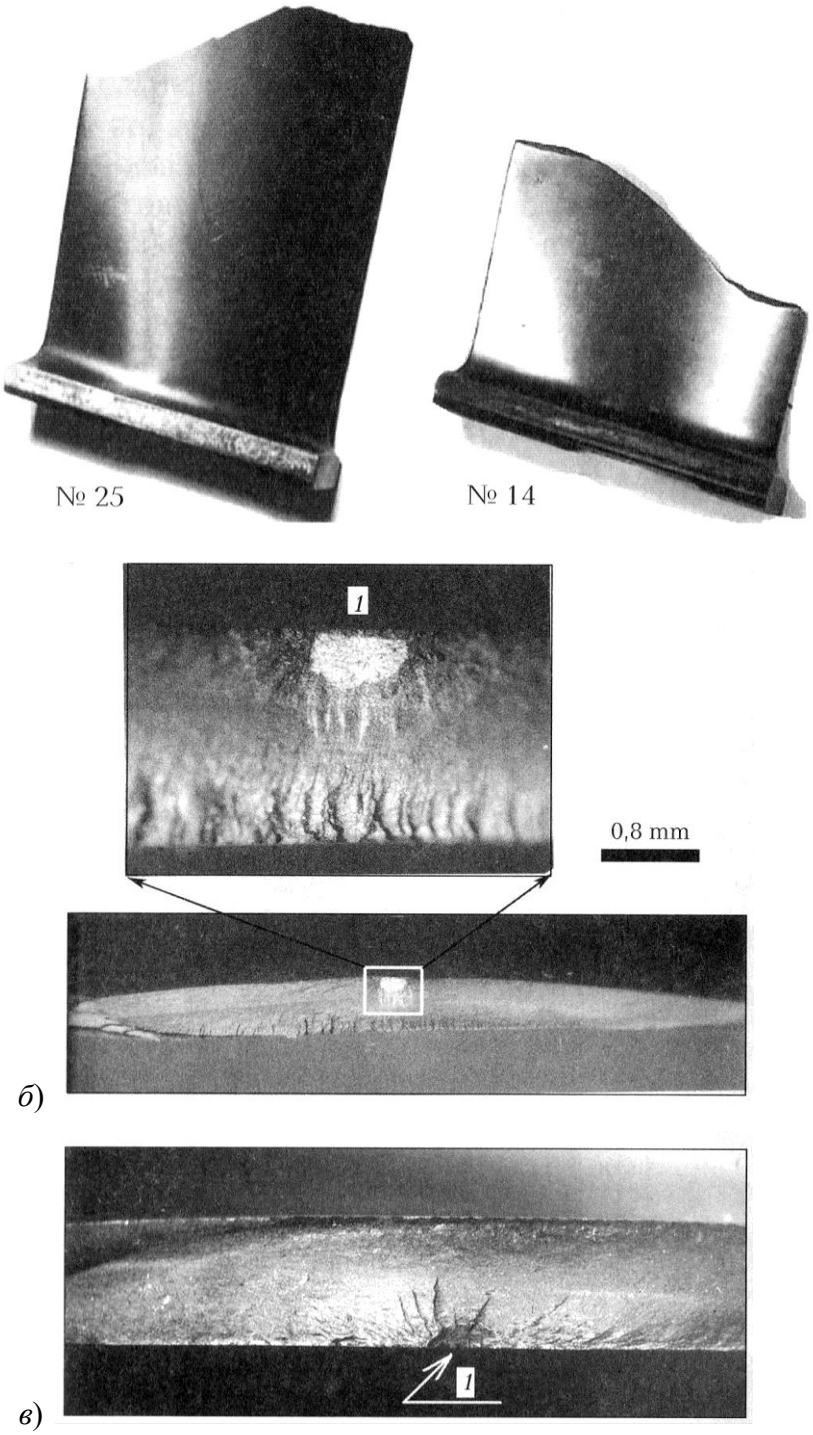
б) механические повреждения в виде трещин, грубых забоин и деформаций кромок (особенной в нижней трети пера лопатки), повреждения или нарушение сплошности бандажей, снабберов, антивибрационных полок, элементов хвостовиков и проч.;

в) нарушения плотности сборки ступеней, выходы лопаток из ряда, их разворот, а также отклонение демпферных связей от заданного положения;

г) отсутствие противоэрозионной защиты входных кромках лопаток паровых турбин, работающих во влажном паре;

д) коррозионные повреждения;

е) наличие на поверхности лопаток эрозионного износа.



а)

б)

в)

а – вид разрушения; *б* – вид излома лопатки №25; *в* – вид излома лопатки №14

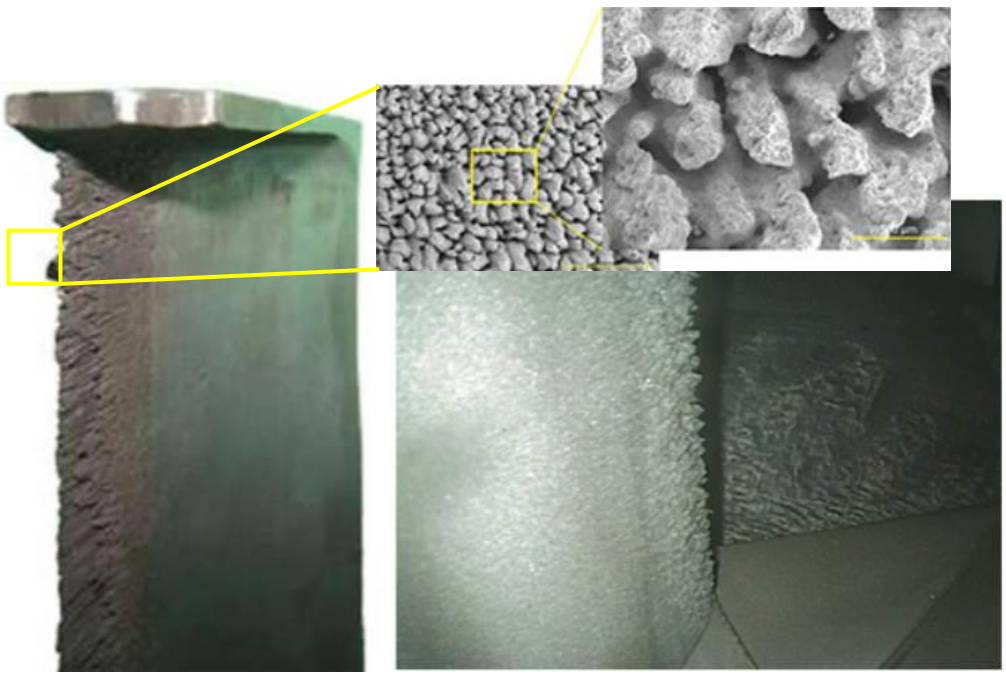
Цифрой «*1*» обозначена зона очага усталостного разрушения

Рисунок 1.5 – Разрушенные рабочие лопатки 1-й ступени КВД двигателя Д-30КУ №25 и №14 из материала ВТ3-1 [25]

Каплеударная эрозия

Каплеударная (или капельная) эрозия возникает и развивается на поверхности рабочих лопаток под действием капель жидкости, ударяющих с большой скоростью (несколько сотен м/с). Наиболее интенсивной эрозии подвергаются входные кромки периферийных зон лопаток и выходные кромки в прикорневых сечениях [4]. Каплеударная эрозия характерная для лопаток всех ступеней, работающих в среде влажного пара, однако наибольшему износу подвержены лопатки последних ступеней ЦНД вследствие бóльших окружных скоростей на периферии пера лопатки (Рисунок 1.6). С квадратом скорости возрастает кинетическая энергия капель влаги и, следовательно, увеличивается их ударное воздействие на поверхность лопатки. По данным [4] уже через 6-8 лет эксплуатации износ лопаток может достигать десятки миллиметров, а в сечениях периферийной части – до трети хорды.

Эрозионный износ рабочих лопаток при ударах капель влаги вначале проявляется в виде грубой шероховатости поверхности, затем на ней появляются различные дефекты в виде единичных углублений, кратеров, язвин. При длительной работе в результате износа материала лопаток изменяется форма их профиля преимущественно в области кромок. После достаточно продолжительной эксплуатации в условиях каплеударной эрозии внешний вид разрушения изношенной поверхности является характерным для всех лопаток, как это показано на Рисунках 1.6-1.8.



а *б*

а – входная кромка; *б* – выходная кромка

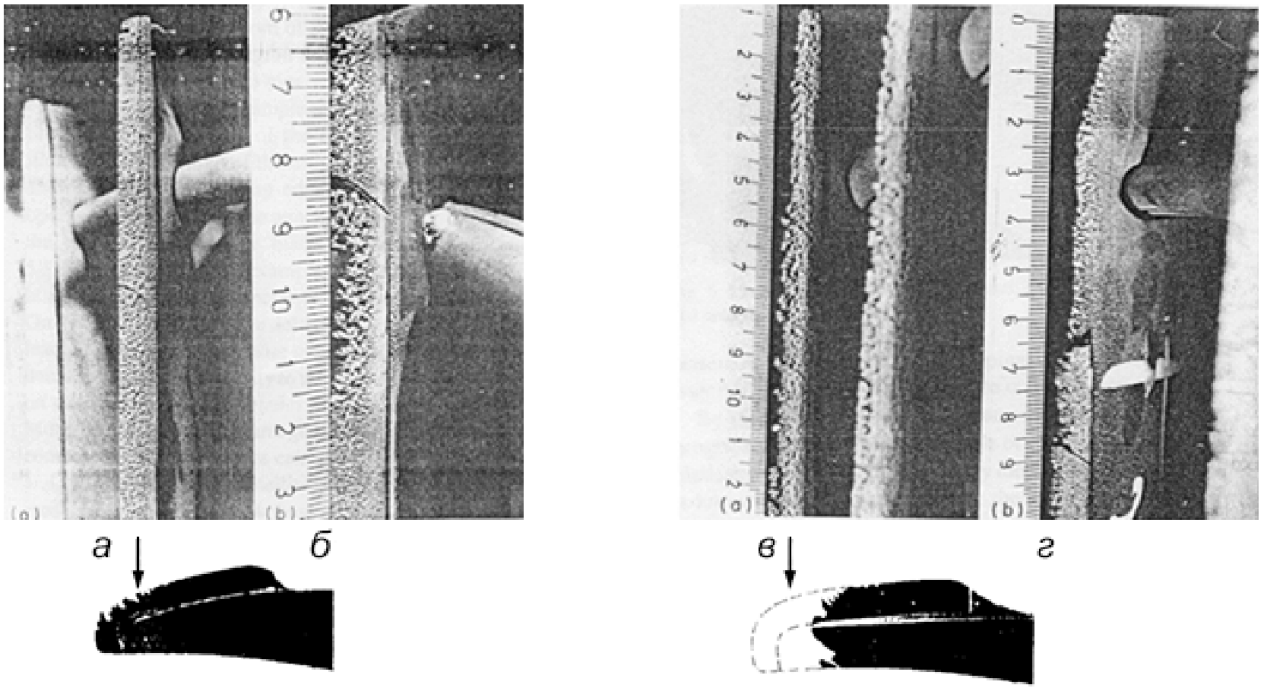
Рисунок 1.6 – Вид изношенной рабочей лопатки паровой турбины в результате каплеударной эрозии [27-28]

Интенсивное развитие эрозии рабочих лопаток приводит к снижению надежности их работы из-за уменьшения площади изнашиваемых сечений. Наиболее опасной является область корневых сечений, особенно в области выходных кромок, где повышенный износ может привести в преждевременные потери усталостной прочности, появлению трещины и отрыву пера лопатки. Кроме того, одним из важных последствий износа лопаток является ухудшение расчетных параметров работы лопаточного аппарата из-за уменьшения его рабочей площади, появления утечек через периферийный зазор и др., что в целом приводит к снижению к.п.д. ступени с эродированными лопатками. Особенно сильно на снижение экономичности турбины влияет эрозионный износ лопаток последних ступеней ЦНД, поскольку именно на них приходится наибольшая часть вырабатываемой мощности в общем балансе мощности турбины. Экспертно установлено [4], что экономический ущерб от работы эродированных лопаток с каждым годом удваивается, так что каждые 4-5 лет эксплуатации требуется проведение замены (перелопачивания) изношенных лопаток.

Обзор отечественных и зарубежных исследований в области каплеударной эрозии конструкционных материалов наиболее полно изложен в работах [21, 30-36].

По мнению авторов [21, 32, 33, 34, 37], процесс изнашивания лопаток последних ступеней паровых турбин в условиях влажно-паровой (каплеударной) эрозии в настоящее время достаточно хорошо изучен. В частности, определены стадии эрозионного износа [33, 38], влияние размеров частиц влаги [39,40], скорости и углы их соударения с поверхностью [41-43], установлены общие закономерности эрозионной стойкости лопаточных сталей и титановых сплавов [30, 32, 33, 34, 44].

Рисунок 1.7 – Эрозионный износ рабочих лопаток со стороны спинки,
видны следы коррозии



а – 8785 ч; *б* – 20489 ч; *в* – 56384 ч; *г* – 82910 ч

Рисунок 1.8 – Изменение во времени величины износа входной кромки со стеллитовой пластинкой на периферийном сечении лопатки ЦНД паровой турбины мощностью 210 МВт с различной наработкой [29]

В 1995 г. на базе НИУ «МЭИ» при участи РАО «ЕЭС России» и под руководством проф. Рыженкова В.А. создан и в настоящее время действует научный центр «Износостойкость», где разработаны оригинальные методики и специальное оборудование для оценки скорости эрозии лопаточных материалов. Создан комплекс уникальных стендов и установок «Гидроударный стенд «Эрозия-М», который обеспечивает физическое моделирование условий соударения жидких частиц влаги с размерами от 20 до 1200 мкм, движущихся со скоростью от 200 до 600 м/с [38, 45].

В настоящее время универсального способа повышения стойкости к каплеударной эрозии лопаток последних ступеней ЦНД паровых турбин не существует. В первую очередь это связано со сложность самого процесса эрозии лопаточного аппарата, который характеризуется большим количеством факторов, включающих условия капелеударного воздействия (характер потока капель, их размер, скорость лопаток, угол взаимодействия и другие), физико-механические свойства материла лопаток, прочность их поверхностного слоя, напряженно-деформационное состояние и другие. Одним из перспективных путей повышения стойкости лопаток паровых турбин к

каплеударной эрозии является решение материаловедческой проблемы разработки новых эрозионно-стойких материалов, способов их упрочнения и нанесения защитных покрытий, соответствующих следующим требованиям [46, 47]:

а) высокая эрозионная и коррозионная стойкость;

б) эффективная защита поверхности входных и выходных кромок рабочих лопаток;

в) неизменность исходных механических и прочностных свойств основного материала рабочих лопаток, в том числе отсутствие негативного влияния технологических процессов упрочнения на структуру и механические свойства материала;

г) сохранение эффективности упрочнения при различных эксплуатационных режимах работы турбины;

Способы упрочнения титановых лопаток последних ступеней паровых турбин подробно рассмотрены в п. 1.3.

Фреттинг-износ и фреттинг-коррозия

К одним из наиболее опасных видов эксплуатационных повреждений, приводящим к значительному снижению усталостной прочности лопаток, относится фреттинг, включающий в себя сразу несколько процессов: фреттинг-износ, фреттинг-коррозию и фреттинг-усталость. Фреттинг возникает в зонах контакта деталей, образующих прессовые или малоподвижные соединения, при их циклическом нагружении. Амплитуда относительного перемещения в зоне контакта деталей, достаточная для возникновения фреттинг-износа, находится в пределах от 0 до 0,3 мм, частота контактного взаимодействия находится в широких пределах, от единиц до сотен Гц [48].

Внешний признак фреттинга – скопление по границе области контакта окисленных продуктов износа материала сопряженных деталей. Визуальное исследование деталей, которые подвергались фреттингу при эксплуатации, показывает, что внешние признаки этого процесса проявляются на контактных поверхностях в виде ярко выраженных следов схватывания, потертостей с сеткой мелких (не более 0,2 мм) трещин; образований в виде язв и каверн, заполненных порошком из окислов металла [49]. Вид каверн при этом заметно зависит от условий протекания фреттинга. Визуально их можно разделить на мелкие блюдцеобразные углубления и на глубокие отверстия в виде питтингов. Первые появляются в результате того, что продукты износа имеют возможность выхода из зоны первоначального поражения и начинают абразивное изнашивание вблизи нее. Вторые образуются, когда вторичные продукты фреттинга, окислы, полностью заперты внутри зоны первоначального поражения в результате того, что они занимают больший объем (в случае железа – в два с половиной раза), чем основной металл [49].

Анализ эксплуатационных разрушений показывает, что большинство усталостных изломов деталей, работавших в сопряжениях, имеют началом разрушения темную от наклепа контактную выработку, а в месте зарождения усталостной трещины наблюдается растрескивание металла поверхности с пленкой налета красно-бурого или темно-коричневого цвета, что характерно для протекания фреттинг-коррозии.

Подобный характер фреттинг-износа описан во многих работах [19, 49, 50, 51], что свидетельствует о том, что процесс фреттинга имеет преимущественно усталостную природу разрушения при одновременном активном протекании коррозионных процессов.

Наблюдаемые поверхностные дефекты, образованные при фреттинге, являются концентраторами напряжения, которые ускоряют процессы зарождения усталостных трещин, их развития и, как следствие, приводят к резкому сокращению выносливости и долговечности деталей [19, 52]. Проведенные испытания [49] на усталость образцов со сформированными дефектами от фреттинга показали, что их предел выносливости по сравнению с исходным состоянием при прочих равных условиях уменьшается примерно от 50 до 100 МПа.

Кроме усталостного разрушения деталей, распространенной причиной отказов и нарушения работоспособности является образование и накопление продуктов фреттинг-коррозии в местах подвижных сопряжений [49, 50, 51]. При эксплуатации это приводит к нарушению работы, заклиниванию и схватыванию, что при обслуживании затрудняет, а в некоторых случаях исключает возможность разборки узла без разрушения деталей [50].

Проблема возникновения и развития фреттинга особенно остро стоит при эксплуатации высоконагруженных деталей турбинной техники, работающих в условиях повышенных вибраций. Следы от фреттинг-коррозии наиболее часто возникают на крепежных деталях, в замковых соединениях лопаток с дисками, на поверхности деталей подшипниковых опор и многих других [54]. Наличие или появление в процессе работы небольших поверхностных дефектов в условиях фреттинга приводит к ускоренному разрушению материала, зарождению и росту под действием рабочих нагрузок усталостных трещин, преждевременной поломке всего изделия [49, 53, 54, 55].

В паровых турбинах наиболее опасным повреждениям от фреттинг-износа и фреттинг-усталости подвержены рабочие лопатки, изготовленные из различных сталей и титановых сплавов. На рабочих лопатках паровых турбин фреттинг-износ в первую очередь проявляется в бандажных и замковых соединениях. Даже незначительный в начальной стадии износ бандажных полок из-за вибрации вызывает уменьшение, а иногда и полное срабатывание конструкционного и эксплуатационного натяга. Вследствие этого на контактных поверхностях изменяются условия трения: возникает повышенный уровень контактных нагрузок, усиливаются процессы износа, появляется риск ударного взаимодействия, в пере лопатки возникают дополнительные циклические изгибные и крутильные колебания повышенной амплитуды.

Примеры эксплуатационных разрушений от фреттинг-износа бандажных полок рабочих лопаток последних ступеней ЦНД паровых турбин и антивибрационных полок рабочих лопаток КНД ГТД из титановых сплавов приведены на Рисунках 1.9-1.14.

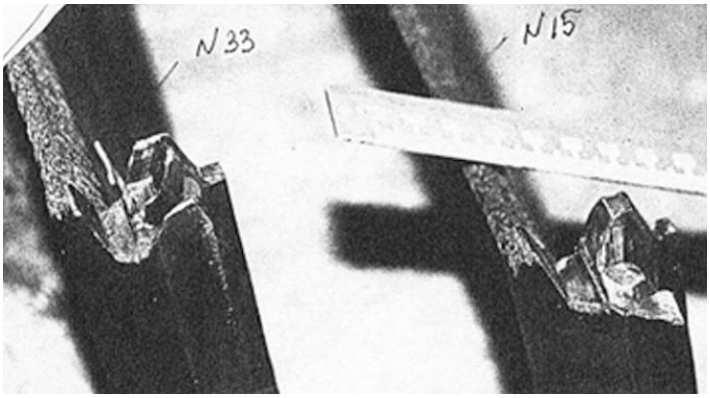


Рисунок 1.9 – Внешний вид лопаток паровой турбины с усталостным фреттинг-разрушением бандажных полок, наработка 88428 ч. [54]

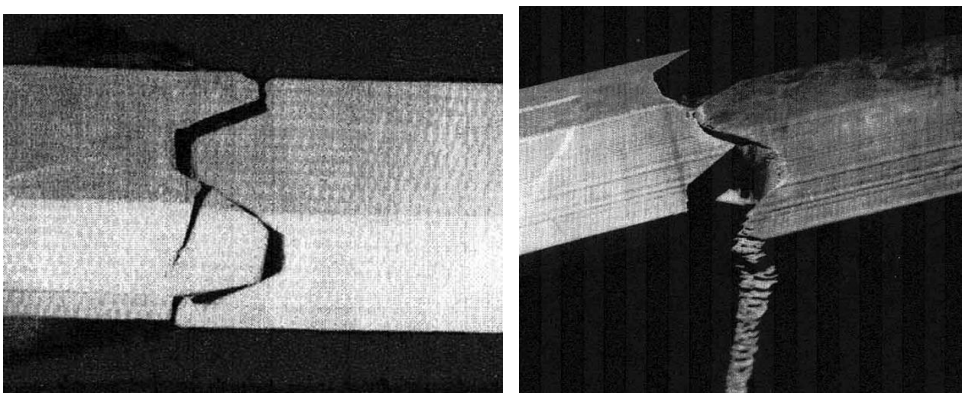


Рисунок 1.10 – Пример разрушения бандажной полки лопатки паровой турбины из титанового сплава при фреттинг-усталости [54]

Обобщая вышесказанное, можно сделать вывод, что рабочие лопатки паровых и газовых турбин являются наиболее многочисленными и ответственными деталями проточного тракта, работающие в условиях сложного напряженно-деформированного состояния и агрессивного воздействия внешней среды. В процессе эксплуатации энергоустановок, особенно на стадии пуска и выхода на стационарный режим, возникают дополнительные проблемы снижения их надежности работы, связанные с действием на лопатки повышенных циклических механических напряжений от вибрации, которые могут достигать критических значений особенно при наличии механического износа, эрозионных или коррозионных повреждений.

а – со стороны выходной кромки; *б* – со стороны входной кромки

Рисунок 1.11 – Внешний вид зубчатого зацепления бандажных полок рабочих лопаток из титанового сплава ВТ6 с разрушением от фреттинга, наработка 12835 ч.

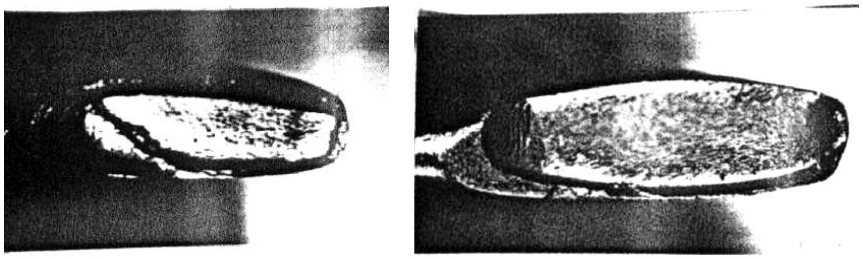
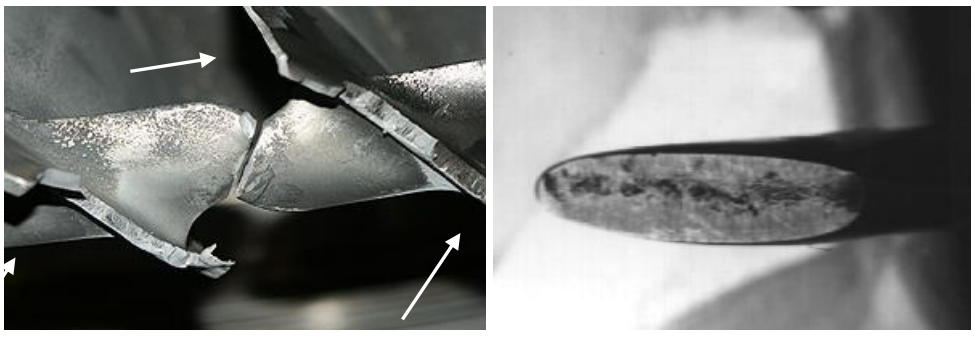
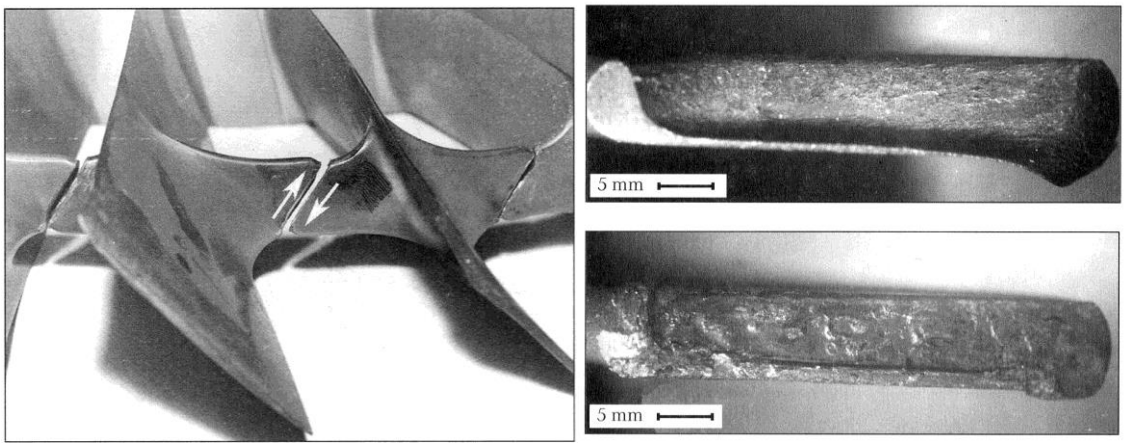


Рисунок 1.12 – Внешний вид повреждений на антивибрационных полках рабочей лопатки 2 ст. РКНД двигателя АЛ-31СТ из сплава ВТ6 [20]



а – места разрушения лопаток (показаны стрелками); *б* – контактная поверхность антивибрационной полки со следами фреттинга

Рисунок 1.13 – Рабочие лопатки компрессора АЛ-31СТ из сплава ВТ6



а *б*

а – места разрушения лопаток (показаны стрелками); *б* – контактная поверхность антивибрационной полки со следами фреттинга

Рисунок 1.14 – Рабочие лопатки компрессора Д-30КУ из сплава ВТ3-1 [25]

Значительные материальные потери из-за повреждений лопаток, как наиболее многочисленных и, как правило, дорогостоящих деталей подтверждают актуальность исследований в области разработки новых материалов защитных покрытий и способов их нанесения с целью повышения усталостной прочности, сопротивления газоабразивному, эрозионному износу и фреттингу.

1.3 Способы упрочнения материала поверхности лопаток паровых турбин и компрессоров газотурбинных двигателей из титановых сплавов

Сплавы на основе титана нашли свое широкое применение в современном энергомашиностроении за счет уникальных физико-механических свойств, среди которых важнейшими являются высокая удельная прочность, малая плотность и коррозионная стойкость. Так, например, замена стальных лопаток на титановые уменьшает суммарную массу лопаточного аппарата в турбомашине на 40…45%, а массу дисков – на 20…25% [56, 57]. Вместе с этим трещиностойкость и ударная вязкость титановых сплавов меньше по сравнению с лопаточными сталями (20Х13, 15Х11МФ и др.), поэтому стойкость титановых лопаток к эрозии перед внезапным полным отказом заметно меньше, чем у стальных лопаток. Титановые сплавы более чувствительны к концентраторам напряжения, в виде эрозионных повреждений, возникающих на их поверхности. Таким образом, к титановым лопаткам предъявляются повышенные требования к упрочнению и защите от внешнего агрессивного воздействия [58].

С целью повышения прочности деталей из титановых сплавов в настоящее время разработано значительное количество методов поверхностного упрочнения. Проведенный анализ научных публикаций показал, что в последнее десятилетие наиболее динамично развивающиеся методы упрочняющей (финишной) обработки связаны с процессами целенаправленного воздействия на конструкционные материалы концентрированными потоками энергии. К числу таких относят электронно-лучевые, лазерные, ионно-имплантационные, вакуумные ионно-плазменные и комбинированные методы обработки, позволяющие значительно повысить эксплуатационные свойства ответственных деталей машин [59].

При обработке поверхности металлического материала концентрированными потоками энергии в тонком приповерхностном слое (от сотых долей до нескольких десятков микрометров) происходит изменение химического состава, микроструктуры и свойств материала. Это создает ряд преимуществ в сравнении с традиционными технологическими процессами деформационной, термомеханической и химико-термической обработки. Такими преимуществами являются возможность обработки заданных участков поверхности при минимальном искажении формы детали и остаточных термических напряжениях. Основными физическими явлениями, происходящие в материале при обработке концентрированными потоками энергии, являются управляемое изменение структуры и химического состава, изменение микрорельефа путем уменьшения шероховатости и сглаживания возможных поверхностных дефектов и др.

Изучение доступной научно-технической и патентной информации позволил выявить высокий интерес (по количеству публикаций) следующих отечественных и зарубежных предприятий к проблеме упрочнения деталей машин концентрированными потоками энергий: ФГУП «ВИАМ» НИЦ «Курчатовский институт», ГОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет», МГТУ «Станкин», АО «Моторостроитель», НИИ ЯФ при Томском политехническом университете, НПГП «Синтез» при Донском государственном техническом университете, АО «ТЕТРА», ФГБОУ ВО «Московский государственный институт стали и сплавов» (технологический университет), ООО «АЛЬБАТЭК»; зарубежные фирмы: Hitachi Tool Engineering, Ltd. (Tokyo, JP), Toshiba Tungaloy Co., Ltd. (Kawasaki, JP), General Motors Corporation (Detroit, MI, US), Bridgestone Americas Holding, Inc. (Akron, OH), Commissariat a L'Energie Atomique (Paris, FR), Sandvik AB (Sandviken, SE).

Наиболее часто среди опубликованных и запатентованных разработок отечественных институтов и предприятий встречаются разработки ФГУП «ВИАМ», ГОУ ВПО «Ульяновский государственный технический университет» и НИИ ЯФ при Томском политехническом университете. Среди зарубежных фирм наиболее активно патентуют свои разработки Sumitomo Electric Industries, Ltd. (Osaka, JP) и Sandvik AB (Sandviken, SE).

Проведенный анализ научно-технической и патентной литературы позволил сделать вывод, что для повышения эксплуатационных свойств лопаток паровых турбин и компрессора газотурбинных двигателей применяют следующие способы упрочнения концентрированными потоками энергии:

а) термическая обработка;

б) лазерное упрочнение;

в) ионная имплантация (модифицирование);

г) нанесение вакуумных ионно-плазменных покрытий;

д) комбинированная (последовательная и совместная) обработка концентрированными потоками энергии.

Термическая обработка

Наиболее широко известным, но редко используемым способом упрочнения лопаток из титановых сплавов и сталей является закалка токами высокой частоты (ТВЧ), значительно повышающая их твердость до ≈700 HV [60-63]. Ограничение применимости этого способа связано со снижением трещиностойкости после проведения ТВЧ-закалки. В [61] авторами утверждается, что ресурс работы рабочей лопатки с кромками, упрочненными ТВЧ-закалкой, сильно ограничен. Объясняется это тем, что увеличение твердости материала поверхности до 580...620 HV сопряжено с реальным риском возникновения термических трещин при эксплуатации [61], что категорически недопустимо.

Известен способ упрочнения поверхности входных кромок турбинных лопаток, включающий индукционный нагрев поверхностного слоя металла и механическую деформацию, которую производят путем накатки на поверхности нагретого слоя канавок с наклонными стенками и последующее охлаждение [64]. Существенным недостатком этого способа является снижение усталостной прочности лопаток при эксплуатации в результате охрупчивания материала поверхностного слоя преимущественно в области входных кромок.

В работе [65] исследовали влияние длительных высокотемпературных (450...500 °С) выдержек на структуру и фазовый состав анодно-оксидного покрытия на образцах из сплавов ВТ8М и ВТ25У в среде NaCl. Оксидирование образцов проводили в кислотном растворе в импульсном режиме при напряжении выше начала искрения. Показана принципиальная возможность применения анодно-оксидного покрытия толщиной 10...15 мкм для защиты поверхности титановых сплавов от солевой коррозии при температурах до 450...500°С в течение 1000 ч.

В работе [63] приведено описание реальной технологии и оборудования для закалки лопаток паровых турбин токами высокой частоты на заводе «Турбоатом». В результате обработки

получают упрочненный слой с твердостью 42-46 HRC и толщиной 1...3 мм в области пера лопатки и 5...7 мм на входной кромке. Ширина упрочненного слоя составляет 65...75 мм. Для проведения локальной обработки отдельных конструктивных элементов лопаток паровых турбин используют специальные установки, обеспечивающие локальную обработку концентрированными потоками энергии посредством электронного луча или лазера [60, 66].

Лазерное упрочнение

Спектр технологий лазерного модифицирования поверхности очень широк и позволяет улучшать почти все служебные характеристики поверхностей деталей машин в т.ч. и эрозионную стойкость титановых сплавов. Одним из условий ее использования в машиностроении является создание промышленных образцов лазеров мощностью порядка 1,0 кВт при энергии импульса более 100 Дж и длительности от 10 до 30 нс, что обеспечит скорость обработки поверхности 1 $м^2$/час. Наиболее близкими к промышленной реализации являются обрабатывающие установки на базе волоконных лазеров [67].

На практике широко используются две основные разновидности лазерного термического упрочнения материалов и сплавов. Наибольшее распространение получил метод [67, 68] лазерной закалки из твердого состояния (без оплавления поверхности). Упрочнение заключается в лазерном нагреве поверхностных слоев материала с высокими скоростями, что приводит к перегреву α–фазы и зарождению множественных центров перекристаллизации. На стадии охлаждения происходит значительное переохлаждение аустенита и его полиморфное превращение с образованием метастабильных фаз. С увеличением скоростей нагрева и охлаждения возрастают величины перегрева и переохлаждения фаз, при этом возникает большее количество центров перекристаллизации и активнее протекает процесс диспергирования структуры. С другой стороны, увеличение скоростей нагрева и охлаждения возможно только за счет повышения скорости, движения луча лазера, что сокращает время диффузионных процессов, уменьшает толщину зоны лазерного воздействия (ЗЛВ) и, тем самым, ограничивает технологическую применимость этого способа [69].

Другой метод, лазерная закалка из жидкого состояния [70] используется, как правило, для увеличения толщины ЗЛВ. Этот метод не получил широкого применения из-за того, что при низких скоростях движения лазерного луча в зоне оплавления образуется разнонаправленная дендритно-зеренная структура, характеризуемая пониженным значением микротвердости. Различное направление роста соседних ансамблей дендритов и, как следствие, действие растягивающих напряжений увеличивает вероятность появления микротрещин по границам зерен. В связи с этим, метод упрочнения с оплавлением поверхности не нашел широкого применения при упрочнении лопаток.

На практике метод лазерной обработки в основном используется для закалки средне- и высокоуглеродистых сталей и для упрочнения титановых и цветных сплавов (за счет обработки с оплавлением и низкими скоростями) показало малую эффективность [68,69]. Указанные недостатки лазерных технологий упрочняющей обработки могут быть несколько снижены путем использования легирующих добавок как при твердом, так и при жидком состоянии поверхностного слоя. Если в первом случае насыщение достигается за счет ускорения диффузионных процессов в поле высоких температур, то в случае легирования с оплавлением – в результате перехода этих элементов в жидкий поверхностный слой с возможным протеканием химико-термических реакций.

В работе [71] показано, что в случае легирования с образованием жидкой фазы присадочного материала за счет введения новых фаз и с учетом конвективного перемешивания, достигается периодический характер распределения элементов по зоне легирования и, как результат, наблюдается повышенная стойкостью материала к абразивному и гидроабразивному износу.

В случае легирования поверхностного слоя добавлением в расплав керамических частиц TiC, TiN и др. [71], происходит образование металлокерамической поверхности с высокой твердостью. Она обладают повышенной сопротивляемостью к абразивному износу и способна выдерживать высокие контактные нагрузки, не ухудшая своих антифрикционных свойств.

В патенте Холдинга Нуово Пиньоне СПА (IT) [72] описан способ обработки рабочих лопаток паровых турбин, подвергающихся эрозии. Способ включает в себя лазерное осаждение покрытия из сплава на основе кобальта, содержащего от 28 до 32 мас.% Cr, от 5 до 7 мас.% W, от 0,1 до 2 мас.% Si, от 1,2 до 1,7 мас.% C, от 0,5 до 3 мас.% Ni. Обработкой достигается повышенная стойкость лопаток к эрозии под ударным воздействием жидкостей.

Лазерной обработкой [73] проводят предварительное поверхностное локальное легирование нитридообразующими элементами деталей с нанесенной на их поверхность обмазкой при лазерном нагреве до температуры T = 690-710 °C с выдержкой в течение 3-4 часов. Затем осуществляют низкотемпературное азотирование при нагреве до температуры T = 570-590 °C с выдержкой в течение 6-8 часов в среде аммиака. Получается равномерный по поверхности упрочненный слой, при этом длительность процесса азотирования стальных деталей сокращается, сохраняется высокой твердость слоя.

Перспективность применения лазерного легирования материалов лопаток паровых турбин с целью повышения их эрозионной стойкости показана в работе [74]. Фирма Nuovo Pignone разработала для GE Power Systems покрытие «L.I.E.R.–35», которое наносится путем лазерной наплавки. Получаемое покрытие с толщиной ≈0,4 мм и твердостью более 500 HV обеспечивает эрозионную стойкость стальных лопаток паровых турбин на уровне стеллита [75].

Известен способ [76] комбинированной обработки, совмещающей деформацию обрабатываемой поверхности изделий деформирующим элементом и последующую лазерную обработку. Деформацию проводят за один проход по всей ширине обрабатываемой поверхности всей длиной рабочей зоны деформирующего элемента, ось которого расположена под углом 80...85° к направлению его перемещения, при наложении на деформирующий элемент ультразвуковых колебаний. Ширина следа лазерной обработки, осуществляемой за один проход лучом лазера, сформированным в линию, с равномерным распределением плотности энергии по длине пятна, образованного лучом лазера, равна ширине следа ультразвуковой деформации.

Во многих случаях [77-80] лазерную обработку ведут нанесением на упрочняемую поверхность порошкового присадочного материала с последующим его облучением сфокусированным лучом лазера при многократном сканировании по обрабатываемой поверхности. При этом выполняют предварительный нагрев детали, формирование подслоя, получение слоя наплавки путем подачи порошка на обрабатываемую поверхность и оплавление ее лучом лазера с последующем контролем высоты и ширины наплавляемого валика для исключения несплавления по его бокам.

Преимуществами лазерного упрочнения является возможность управлять тепловыми и диффузионными процессами при обработки широкого класса конструкционных материалов, возможность применения при восстановительном ремонте лопаток турбомашин, высокая степень автоматизации и повторяемости технологического процесса. Основным недостатком лазерной обработки применительно к упрочнению лопаток паровых и газовых турбин в большинстве случаев является необходимость ограничивать температурное воздействие на материал деталей во избежание его охрупчивания, возникновения нежелательных остаточных напряжений и риска появления трещин.

Ионная имплантация (модификация)

Ионная имплантация (и.и.) – процесс поверхностного легирования, в котором практически любой химический элемент может быть внедрен в обрабатываемую поверхность. Физическая сущность процесса и.и. заключается в бомбардировке поверхности детали ионными пучками. При этом атомы легируемого вещества, внедряясь в кристаллическую решетку обрабатываемой детали, образуют твердые растворы или новые химические соединения [81].

Профессором, д.т.н. Гусевой М.И. показано [94, 106], что, изменяя энергию и дозу облучения ионов, можно варьировать профилем распределения имплантированных атомов по глубине поверхностного слоя от десятков до нескольких сот нм. При этом в отличии от традиционных методов введения легирующих примесей, и.и. сопровождается образованием большого количества радиационных дефектов структуры: вакансий, дислокаций, пор, межузельных атомов,

происходит образование новых фаз. Проведение вакуумного отжига после ИИ (N^+, C^+, B^+) титановых сплавов приводит к увеличению глубины проникновения имплантированных ионов в 2 раза (до ≈10 мкм), а также к образованию на межфазных границах высокотвердых соединений TiN, TiC, TiB размером 20...60 нм. Такие включения способствуют упрочнению сплавов вследствие формирования сжимающих микронапряжений вокруг них, что приводит к повышению микротвердости ее поверхности и усталостной прочности детали.

В работах Kan и Kochman [82] при имплантации ионов N^+ и B^+ (E = 100 кэВ, $D = 10^{17}$ ион/см^2) в титановый сплав Ti-24V отмечено образование в поверхностном слое дисперсных частиц Ti_xN_y и TiB, обусловивших упрочнение, торможение дислокации при знакопеременном нагружении и, как следствие, повышение сопротивления усталости.

Dearnaley показал [83], что в случае имплантации ионов Ba^+ в титановый сплав Ti-6Al-4V, наблюдается повышение усталости в условиях фреттинга. Кроме этого, имплантация бария в титан приводит одновременно к повышению жаростойкости вследствие его выделения по границам зерен и дислокациям, образованием с примесным кислородом и титаном фазы $BaTiO_3$ с решеткой пировскита, которая в дальнейшем блокирует диффузионные пути окисления.

В одной из первых отечественных работ по имплантации ионов: C^+ и N^+ (E = 150 кэВ, $D = 10^{17}$ ион/см^2) в титановые сплавы: ВТ8 и ВТ18, реализованной на ускорителе «Везувий-1» [84], показано, что имплантация резко сокращает рассеяние результатов усталостных испытаний и приводит к повышению на 5...7% предела выносливости.

Для некоторых деталей при эксплуатации предъявляются одновременное сочетание коррозионных и усталостных свойств. В этом случае, как показано в [85], имплантация поверхности ионами N^+ (E = 40 кэВ, $D = 10^{17}$ ион/см^2) может обеспечивать в коррозионной среде повышение предела выносливости и долговечности до двух раз.

По данным [86] после ионно-имплантационной обработки титановых сплавов изменяется химический и фазовый состав поверхностного слоя толщиной до 0,2 мкм за счет образования мелкодисперсных карбидов и оксикарбидов. Происходит ионное распыление пленок окислов с уменьшением шероховатости поверхности с 20 до 0,05...0,1 Ra. Одновременным с этим происходит удаление (распыление) микродефектов поверхности, сопровождаемое повышением микротвердости с 320...460 HV до 460...650 HV соответственно.

До недавнего времени наибольшее распространение ионная имплантация получила в полупроводниковой технике и микроэлектронике. Однако, уже первые работы по упрочнению режущего инструмента [87-89], пар трения и штамповой оснастки [90-92] подтвердили перспективность применения процесса ионной имплантации в машиностроении.

Впервые возможность повышения циклической долговечности деталей из титановых сплавов с (α+β)-структурой (Ni-6Al-4V) при имплантации N^+ и C^+ (энергия ионов E = 75 кэВ, доза

D = $2 \cdot 10^{17}$ ион/см^2) установлена в 1982 г. [93]. Полученные результаты позднее подтверждаются в работах [166, 106, 107], где авторами установлено, что имплантация ионов N^+ в сплавы ВТ18У и ВТ1-0 при дозе $D = (10^{17} \ldots 2 \cdot 10^{17})$ ион/см^2 с последующим отжигом при температуре 540 °С в течение 2 ч приводит к увеличению микротвердости поверхности на 40-50 %. Там же отмечается, что увеличение плотности радиационно-стимулированных дефектов кристаллической решетки после ИИ, приводит к существенному сдерживанию движения дислокаций, что объясняет увеличение на 15…19 % предела выносливости (σ_{-1}) рабочих лопаток ГТД из титановых сплавов.

Проведение ионной имплантации различных конструкционных материалов позволяет существенно повысить их усталостную прочность и циклическую долговечность [89-95, 97-99], коррозионную стойкость [100-102] и сопротивление высокотемпературному окислению [96, 99, 103].

Обобщая проведенный анализ научно-технической литературы по вопросу ионной имплантации, можно сделать вывод, что подбором сорта иона, его энергии и дозы облучения достигается повышение:

а) предела выносливости – до 70%;

б) циклической долговечности, в т.ч. в условиях фреттинга – кратно;

в) сопротивление горячей солевой коррозии – от 4 до 6 раз;

г) сопротивление газоабразивному износу – на 50%.

К преимуществам технологии ионно-имплантационной обработки авторы [104-107] относят возможность получения практически любой комбинации матрица-легирующий элемент и проведения процесса ионного легирования в широком диапазоне температур, в том числе нормальной и отрицательной. Внедрение строго дозированного количества легирующих ионов, то есть возможность получать заданные профили залегания легирующих примесей с заданным стехиометрическим составом материала поверхности. Возможность обработки локальных участков поверхности без существенного нагрева детали, что обеспечивает практическую неизменность ее размеров, отсутствие коробления.

К недостаткам метода обычно относят относительно высокую стоимость оборудования и недостаточную изученность физико-химических процессов, происходящих в поверхности при воздействии на нее ионов с различными энергиями.

1.4 Вакуумные ионно-плазменные покрытия

Применительно к упрочняющей обработке рабочих лопаток паровых и газовых турбин наиболее перспективными методами нанесения защитных покрытий являются процессы вакуумного ионно-плазменного осаждения из низкотемпературной плазмы (известные методы «КИБ» и

«PVD») [108-121, 133-146]. Этими методами наносят металлические и высокотвердые карбидные, нитридные, оксидные, оксикарбидные и др. покрытия в самом широком диапазоне физико-химических свойств, определяемых их структурой и сочетанием используемых материалов. Нанесенные покрытия являются плотными, практически лишенные пор, равномерными по своему составу и имеют высокую адгезию к поверхности на деталях сложной конфигурации.

При осаждении ионно-плазменных покрытий ионы металла, выделенные из квазинейтральной плазмы в среде реакционного газа, конденсируется на поверхности детали при одновременном протекании плазмохимических реакций. Управлением параметрами плазы, ионного пучка и расположением детали в вакуумной камере достигается формирование на детали равномерного покрытия с заданной структурой и толщиной, состоящей из одного или нескольких чередующихся слоев различных материалов, обычно тугоплавких соединений с высокой (более 1000 HV) твердостью [110-114, 121]. Разогрев детали при нанесении ионно-плазменных покрытий строго контролируется и обычно находится в диапазоне от 300 до 500 °С, что исключает ее коробление, обеспечивает сохранение структуры и свойств основного металла после обработки.

Выпуск первых серийных вакуумных установок для нанесения покрытий был освоен в СССР в 70-80-е годы. Это широко известные установки «Булат», «УВМ», «Пуск», разработанные преимущественно для упрочнения металлорежущего инструмента путем ионно-плазменного осаждения высокотвердых износостойких покрытий на основе нитридов и карбидов титана. Большой вклад в решение проблемы повышения износостойкости металлорежущего инструмента путем нанесения многослойных износостойких покрытий был внесен учеными: Верещака А.С., Табаковым В.П., Саблиным П.А., Григорьевым С.Н., Андреевым А.А. и др. [34, 116-118, 122-124]. Предложенная в работах [34, 117, 123, 124] концепция проектирования износостойких покрытий для режущего инструмента предполагает нанесение многослойных покрытий с различными функциональными свойствами. Внешний (поверхностный) слой должен иметь высокую твердость и максимальную износостойкость при термическом воздействии, нижний слой должен обеспечивать высокую адгезионную связь с материалом основы. Остальные промежуточные слои выполняют различные функции, например, препятствуют встречной диффузии химических элементов обрабатываемого материала и инструмента, сдерживают трещинообразование и др. Реализованные принципы нанесения многослойных ионно-плазменных покрытий систем, полученных комбинацией нитридов и карбонитридов титана: TiN, TiCN, TiAlN, TiZrN, TiCrN и т.д., обеспечивают повышение стойкости режущего инструмента от 2 до 7 раз и скорости резания до 60% [111, 112, 115, 118, 123].

Первые серийные установки серии «МАП», реализующие вакуумно-плазменные технологии высоких энергий (ВПТВЭ) применительно к упрочнению лопаток ГТД, были разработаны ФГУП «ВИАМ» и внедрены в производство двигателя РД-33 на ММП им. В.В. Чернышева в

середине 1980-х годов [125]. Приблизительно в то же время появились первые опубликованные исследования [126, 127] по нанесению ионно-плазменных покрытий нитрида титана на лопатки компрессора газотурбинного вертолетного двигателя с целью повышения их стойкости к газоабразивному износу. На лопатки наносилось ионно-плазменное покрытие TiN толщиной 10 мкм, испытанное обдувкой газоабразивным потоком. По результатам испытаний был сделан вывод, что износостойкость деталей с покрытием увеличилась в несколько раз. Снижения предела выносливости и коррозионной стойкости лопаток с покрытием по сравнению с серийными и не отмечалось. В работе [126] делается главный вывод, что ионно-плазменные покрытия TiN, не смотря на свою сравнительно малую толщину, могут применяться для защиты рабочих лопаток компрессора от пылевой эрозии.

В работе [127] приведены результаты исследования различных ионно-плазменных покрытий на основе карбидов и нитридов тугоплавких металлов IV…VI групп периодической таблицы Менделеева: Ti, Nb, Cr, Zr, Mo, V и их сочетаний применительно к повышению износостойкости лопаток компрессора вертолетных ГТД. Покрытия толщиной от 5 до 20 мкм наносились на образцы лопаток из сталей и титановых сплавов, таких как 14Х17Н2, ВТ8, ВТ6. Образцы с покрытием обдувались воздушно-абразивным потоком со скоростью от 190 до 210 м/с. В качестве абразива использовался кварцевый песок со средним размером частиц 40 мкм. Исследования показали, что наибольшее повышение износостойкости (до 86,5 раз) показало ионно-плазменное покрытие TiN, толщиной ≈ 21 мкм. Отмечено, что наиболее эффективно покрытие защищает поверхность от эрозии при небольших углах атаки до 20°. В этом случае эрозионная стойкость возрастает в десятки раз. Ускоренному разрушению покрытия соответствуют углы атаки от 70 до 90°. В этом случае отмечено наименьшее повышение износостойкости из-за хрупкого характера разрушения материала покрытия.

Перспективность ионно-плазменного покрытия TiN с точки зрения повышения эрозионной стойкости лопаток компрессора ГТД также отмечают авторы работы [127], но при этом указывают на недостаточную стойкость покрытия против электрохимической коррозии и указывают, что максимальная температура применения покрытия в компрессоре ГТД не должна превышать 350 °С вследствие начала интенсивного окисления.

Известно [20, 54, 110, 119, 133], что нанесение ионно-пламенных покрытий на основе нитридов и карбидов тугоплавких металлов при различных режимах осаждения может приводить к значительным внутренним остаточным напряжениям, возникающим на границе покрытия с основным металлом. Остаточные напряжения появляются из-за различия коэффициентов теплового расширения различных материалов и могут быть причиной самопроизвольного разрушения (отслоения) покрытия. Эти выводы также подтверждаются в работах [110, 119, 128, 129, 131], где

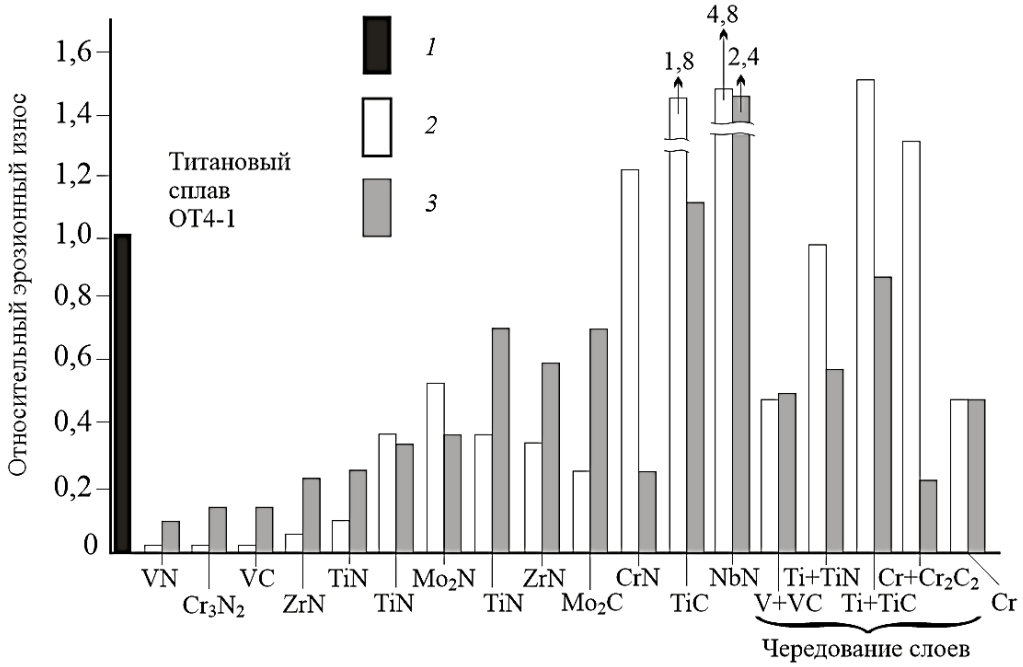
авторы отмечают, что с увеличением толщины покрытия происходит снижение адгезии и сопротивление усталости.

Отсутствие в конце 80-х годов на авиационных предприятиях СССР промышленного вакуумного оборудования для серийного производства лопаток ГТД а, главное, риск снижения усталости лопаток после нанесения защитных покрытий, явились на то время главными препятствиями внедрения метода вакуумного ионно-плазменного осаждения покрытий на лопатки компрессора авиационных ГТД. Российские разработчики и изготовители авиационной техники вернулись к этой проблеме только к началу 2000-х годов, когда экономика страны начала оживать и возникла реальная необходимость защиты компрессора ГТД в связи с увеличением объема ее выпуска [8, 10, 130, 137, 149]. В работах по разработке защитных покрытий применительно к лопаткам вертолетных ГТД участвовали ПАО «ОДК-Климов», ЦИАМ им. Баранова, ФГУП «ВИАМ».

Результаты целого ряда исследований износостойких вакуумных ионно-плазменных покрытий в запыленном потоке воздуха объединены в техническом отчете Центрального института авиационных материалов (ЦИАМ) [132]. В отчете делается вывод, что приоритетным способом повышения износостойкости компрессорных сталей и титановых сплавов является нанесение ионно-плазменных покрытий на основе тугоплавких соединений, что стимулировало активный поиск, исследование, а главное возможность применения таких покрытий в процессе изготовления лопаток двигателей.

Широкое внедрение процессов нанесения износостойких покрытий в производство газотурбинной техники сдерживалась отсутствием промышленных технологий и серийного оборудования. В связи с этим ВИАМ активно занялся не только разработкой и исследованием ионно-плазменных покрытий [6, 8, 9, 11, 14, 134-145], но и разработал серию технологического оборудования для их нанесения. В настоящее время ВИАМ выпустил одну из наиболее современных установок серии «МАП-5», реализующую комплекс технологий нанесения ионно-плазменных покрытий толщиной от 3 до 120 мкм на основе металлов (Ti, Zr, Cr, Al и др.) и их соединений в условиях ионного ассистирования. В исследовании [10] сделан вывод, что наиболее предпочтительным покрытием для защиты титановых лопаток компрессора вертолетных ГТД от эрозионного износа является нитрид циркония (ZrN) при его ассистировании ионным пучком. Повышение износостойкости авторы связывают с процессом ионного ассистирования, позволившего получить безтекстурные покрытия, имеющие более совершенную структуру [10, 146].

Некоторые результаты исследования ионно-плазменных эрозионно-стойких покрытий, нанесенных на титановый сплав ОТ-1, показаны на Рисунке 1.15. На основании проведенных сравнительных испытаний на эрозионный износ сделан вывод [137], что наибольшую износостойкость для титановых сплавов показало покрытие на основе нитрида циркония (ZrN).



1 – без покрытия (эрозионная стойкость принята за единицу); *2* и *3* – с покрытием при α=20° и 70º (соответственно)

Рисунок 1.15 – Относительный эрозионный износ покрытий из нитридов и карбидов различных металлов на титановом сплаве ОТ4-1 [10]

В работе [143] приведены исследования различных конструкций композиционных покрытий, состоящих из первого слоя чистого металла, промежуточных чередующихся наноразмерных слоев различных металлов (Cr, Ti, Zr), их карбидов (CrC, TiC, ZrC) и нитридов (CrN, TiN, ZrN), а также верхнего эрозионностойкого слоя из карбидов и нитридов. Общая толщина покрытия изменялась от 18 до 25 мкм при максимальном количестве промежуточных слоев 2500. Результаты исследования показывают, что при уменьшении толщины промежуточных слоев износостойкость покрытий снижается, при этом наибольшей износостойкостью обладают покрытия с толщиной промежуточных слоев 50...80 нм при общем количестве слоев от 10 до 15.

Перед нанесением ионно-плазменного покрытия, состоящего из адгезионного слоя титана и функционального слоя нитрида титана, авторы работы [147] предлагают проводить низкоэнергетическую бомбардировку поверхности детали ионами титана для образования «слоисто-структурной» поверхности, утверждается, что в результате такой обработки происходит повышение износостойкости лопаток на 10%.

В патенте на изобретение ФГУП «НПЦ Салют» [148] предлагается проводить нанесение многослойных покрытий из чередующихся двадцати двух наноразмерных (150...300 нм) слоев

металлов (Ti, Al) и их нитридов (TiN/TiAlN) с предварительной высокочастотной короткоимпульсной очисткой поверхности ионами аргона (амплитуда импульса 4 кВ, длительность – 5 мкс, коэффициент заполнения – 0,55) и ионным азотированием. Твердость нанесенного таким образом покрытия составляет 450±80 HV, модуль упругости E = 108 ГПа. Обработкой достигается повышение эрозионной стойкости лопаток на 30%.

В монографии [149] посвященной проблеме газоабразивного износа лопаток вертолетных ГТД, приводится опыт нанесения на титановые лопатки из сплава ВТ8 двухслойного нитридного покрытия (TiZrN), изначально применяемого для упрочнения режущего инструмента. Покрытие наносилось с двух электродуговых источников с катодами титана и циркония на установке «Булат-6» на базе Луганского национального университета им. В. Даля. Эрозионная стойкость лопаток с покрытием определялась взвешиванием после их обдувки электрокорундовым песком (14А F60) с размерами частиц от 100 до 300 мкм, подаваемом на лопатку при давлении 0,30...0,35 МПа. По заявлению авторов эти условия соответствуют условиям эксплуатации лопаток компрессора вертолетного двигателя типа ТВ3-117, приведенных в работах [150, 150]. В результате сравнительных исследований установлено, что двухслойное ионно-плазменное покрытие TiZrN обеспечивает повышение эрозионной стойкости до 4,5 раз по сравнению с лопаткой без покрытия. При этом отмечается, что при эрозионном воздействии на лопатки внешний слой покрытия (TiZrN) работает как армирующий элемент, который предотвращает появление в покрытии микротрещин. Второй, нижележащий слой (TiZrN), благодаря своей высокой плотности и микротвердости, защищает лопатку от ударных нагрузок со стороны абразивных частиц.

В одной из последних работ ВИАМ [145], посвященных разработке износостойких ионно-плазменных покрытий для лопаток вертолетных ГТД из сплава ВТ8М-1, представлено исследование многослойных покрытий TiN/CrN и Ti+TiN. Приведены результаты испытаний лопаток с покрытием на эрозионную стойкость, фреттинг-износ, многоцикловую усталость и длительную прочность. В работе делается вывод, что сочетанием слоев нитридов титана и хрома (TiN/CrN) при общей толщине покрытия 15…18 мкм обеспечивается многократное повышение эрозионной стойкости лопаток за счет внутреннего демпфирования слоев [144] при воздействии абразивных частиц. Кроме этого, покрытие Ti+TiN толщиной 7...8 мкм повышает стойкость к фреттингу замковой части лопаток ГТД более, чем в 3 раза и обеспечивает более высокую температуру эксплуатации по сравнению с серийно применяемым покрытием ВАП-2.

Работы, выполненные в научном центре «Износостойкость» НИУ «Московский энергетический университет» (МЭИ) [21, 34, 152, 153, 154] посвящены проблеме повышения долговечности ответственных деталей энергетического оборудования, в т.ч. лопаток паровых турбин электрических станций. Авторы этих работ одними из первых в стране показали техническую возможность применить ионно-плазменные покрытия для защиты рабочих лопаток паровых турбин

от коррозионного и эрозионного износа. На основании результатов проведенных работ делается вывод, что для получения покрытия, осуществляющего защиту поверхности конструкционных материалов от одновременного воздействия эрозии и коррозии необходимо обеспечить следующие условия:

а) покрытие должно быть многослойным, т.е. включать в себя коррозионно- и эрозионностойкие слои, в качестве которых рекомендуется использовать соответственно титан толщиной около 1 мкм и нитрид титана толщиной свыше 2,5 мкм (оптимальная толщина, предлагаемая авторами, 9 мкм);

б) покрытие должно формироваться при температуре поверхности не ниже 200 °С;

в) перед началом нанесения ионно-плазменного покрытия необходимо провести ионную очистку поверхности, например, ионами аргона.

К числу наиболее перспективных покрытий, достаточно полно отвечающих этим требованиям, относятся ионно-плазменные покрытия на основе металлоподобных и неметаллических соединений (карбидов, нитридов, боридов и др. металлокерамических соединений тугоплавких металлов) [9, 10, 128, 129, 131, 133, 137, 141, 143, 155].

Наиболее благоприятным сочетанием физико-химических и механических свойств обладают нитриды, карбиды, карбонитриды титана, циркония и хрома. В настоящее время они широко используются в качестве износостойких покрытий металлорежущего инструмента [115, 118, 124, 156-160], твердой смазки [161-165] и защитных покрытий от внешнего эксплуатационного воздействия, например, эрозии лопаток паровых и газовых турбин [127, 139, 147, 150, 166-169].

Повышение износостойкости может быть достигнуто нанесения многослойных композиционных покрытий. При этом сочетанием слоев из различных материалов достигают повышение служебных свойств многослойного покрытия по сравнению со свойствами его слоев, взятых по отдельности. Например, экспериментально установлено, что многослойное покрытие системы TiN+CrN имеет твердость 29 ГПа, при этом однослойные покрытия, полученные при сопоставимых условиях, имеют меньшую твердость: CrN – 20 ГПа, TiN – 24 ГПа, TiCrN – 22 ГПа [170].

Увеличением количества промежуточных слоев многослойного покрытия TiCN+TiZrN+TiN достигается многократное увеличение стойкости торцевых фрез с твердосплавными пластинами МК8: по сравнению с однослойным покрытием TiN – от 2,8 до 3,5 раза и по сравнению с инструментом без покрытия – от 4,9 до 7,2 раз [123].

В работе [170] отмечается, что твердость и прочность многослойного покрытия увеличивается с уменьшением толщины отдельных слоев до единиц нанометров. Например, если однослойное покрытие TiCrAlN имеет твердость 24 ГПа, то у многослойного покрытия системы

TiAlN+CrN с толщиной слоев 15 и 6 нм соответственно наблюдается повышение твердости до 35 ГПа.

Развитие плазменной техники дало возможность точной регулировки в автоматическом режиме давления и состава реакционного газа, интенсивности и размеров плазменного потока, фильтрации «микрокапельной фазы». Последнее позволило развить технологию получения композиционных покрытий. Покрытия этого типа представляют собой чередующиеся слои из различных материалов с заданными толщинами. Толщина каждого слоя может варьироваться от нанометров до нескольких десятков микрометров [171, 172]. В настоящее время этот класс покрытий остается пока наименее изученным.

Однокомпонентные покрытия

Традиционным, наиболее изученным и широко применяемыми соединениями, сочетающими широкий комплекс функционвльных свойств, являются нитриды титана различного стехиометрического состава (Ti_xN_y). Они имеет широкую область гомогенности, которую можно реализовать управлением режимами нанесения покрытия. Это позволяет в значительных пределах изменять структуру и такие физико-механические свойства покрытий, как микротвердость, вязкость, остаточные напряжения, адгезия к подложке, когезия слоев. Указанные свойства для оценки качества покрытий требуют использования (в значительной мере) нетрадиционных методов и для покрытий разработаны сравнительно недавно [173].

Нитрид хрома (CrN) – сравнительно мягкое покрытие, сочетающее хорошие трибологические свойства с относительной химической инертностью. Имеет лучшую коррозионную стойкость, чем TiN, особенно в водных растворах [174]. CrN уменьшает налипание на инструмент мягких металлов таких, как Al, Cu, Ti-сплавы. Высокая температуростойкость и сопротивление окислению делают данное покрытие подходящим для использования в средней и тяжелой металлообработке углеродистых и нержавеющих сталей, алюминиевых и медных сплавов [175]. Особенности технологического процесса при нанесении покрытия позволяют получать различные составы – от CrN, имеющего высокую износостойкость, до Cr_2N, обладающего повышенной твердостью. Область применения: штамповой и формообразующий инструмент, хирургический инструмент [176].

Нитрид гафния (Hf_3N_4) – покрытие, обладающее высокой твердостью, износостойкостью, термической прочностью и высокой энергоемкостью. Используется при обработке титановых и жаропрочных сплавов. Повышение работоспособности покрытия достигается за счет его дополнительного отжига в воздушной среде. При этом в покрытии уменьшаются внутренние напряжения, а в приповерхностных слоях образуются окисные фазы, обладающие высокими смазочными

свойствами и энергоемкостью. С уменьшением внутренних напряжений в покрытиях повышается их способность запасать энергию деформации в процессе внешнего трения [177].

Карбид хрома (Cr_3C_2) – покрытие, обладающее высокой твердостью, жаростойкостью и износостойкостью при высоких температурах. На основе карбидов хрома разрабатывают составы композиционных металлокерамических материалов (керметов). Карбид титана (TiC) – покрытие, обладающее высокой твердостью и большей стойкостью к окислению, чем его нитриды. При высокой температуре проявляет электропроводимость, стоек к соляной кислоте, сохраняет свои свойства в криогенной атмосфере, например в жидком азоте при температуре 70...72 К. Карбид циркония (ZrC) – термостойкое, металлоподобное соединение с большей стойкостью к окислению, чем ZrN, обладающее высокой твердостью, хорошей окалиностойкостью и износостойкостью при высоких температурах; проводит электрический ток [133, 158, 177].

Многокомпонентные покрытия

Карбонитрид титана (TiCN**)** – покрытие, обладающее высокой твердостью и низким коэффициентом трения по сравнению с TiN. Карбонитриды переходных металлов привлекают внимание благодаря их уникальным свойствам, таким как высокая твердость и модуль Юнга, значительная электропроводность, повышенная температурная стойкость, упругость и сопротивление коррозии [178]. Область применения: металлорежущий инструмент, особенно механически нагруженные режущие кромки инструмента в непрерывных процессах резки, штамповой инструмент.

Разработанное в начале 90-х годов покрытие нитрида системы Ti-Al (TiAlN) обладает высокой температурной стойкостью и твердостью при удовлетворительной эластичности, что уменьшает вероятность его скалывания, например, при нанесении на металлорежущий инструмент. Высокая температурная стойкость покрытия (до 800 ºС) обусловлена образованием пленки окиси алюминия, имеющей низкую температуропроводность и значительную химическую стабильность. Нитридные покрытия, содержащие алюминий, имеют высокую устойчивость к окислению до 750 ºС для $(Ti_{75}Al_{25})_{I-x}N_x$, и до 830 ºС для $(Ti_{40}Al_{60})_{I-x}N_x$, сохраняют высокую работоспособность при высоких скоростях резания труднообрабатывамых материалов [179]. Управление технологическим процессом формирования покрытия позволяет получать составы с изменяемыми свойствами в зависимости от процентного соотношения Ti и Al. Известно износостойкое покрытие [180], наносимое на стальные детали с помощью дугового разряда в атмосфере химически активных газов. Нанесением покрытия добиваются повышение срока службы и стабильности работы инструмента в условиях прерывисто-ударного резания. Покрытие состоит из $Ti_{0,15}Al_{0,85}N$ и $Zr_xAl_{1-x}N$, где x = 0,3...0,5. Компоненты в составе покрытия находятся в следующем

процентном соотношении: $Ti_{0,15}Al_{0,85}N$ – 20-25%; $Zr_xAl_{1-x}N$ – 80...75%. Известно покрытие, состоящее из смеси металлов, в частности смеси, в состав которой входит $TiAlN_x$. Причем поверхность образована несколькими чередующимися слоями с различным физико-химическим составом [181].

Совместным реакционным распылением в атмосфере азота элементов IV и IVa (или IV и VIa) групп периодической таблицы Менделеева, являющихся мишенью, получают следующие многокомпонентные покрытия.

Нитрид системы Ti+Zr (TiZrN) – высокая твердость, термодинамическая устойчивость, прочность соединения обусловлены большим подобием структур и близкими размерами атомов, обеспечивающих наличие значительных областей взаимной растворимости атомов Ti и легирующего компонента Zr в соответствующих нитридах. Максимальная микротвердость покрытия TiZrN ≈32 ГПа наблюдается при содержании 6...10 % Zr, что на 22 % превышает значения микротвердости для покрытий TiN. Перспективным также является покрытие (Ti+Zr) CN на основе карбонитридов Ti и Zr, микротвердость которого соответствует 64 ГПа [183].

Нитрид системы Ti+Mo (TiMoN) – покрытие, обладающее высокой твердостью, износостойкостью, термодинамической устойчивостью. Способствует снижению средних удельных, нормальных нагрузок и контактных напряжений. Максимальная микротвердость покрытия TiMoN составляет 47...53 ГПа при содержании 25...62 % Mo.

Нитрид системы Zr+Mo (ZrMoN) – покрытие, обладающее высокой твердостью, износостойкостью, термодинамической устойчивостью. Максимальная микротвердость покрытия ZrMoN составляет 44…46 ГПа при содержании 25...36 % Mo. Наиболее эффективно применение такого инструмента при резании титановых сплавов при концентрации молибдена 10...25 % Mo.

Нитрид системы Ti+Cr (TiCrN) – покрытие, обладающее более высокой сопротивляемостью окислению и сохраняющее свои свойства при более высоких температурах по сравнению с покрытиями TiN и CrN. Для данного покрытия характерна значительная стабилизация микротвердости по времени. Установлено, что TiCrN сдерживает диффузионные процессы при точении титановых и хромоникелевых сплавов твердосплавными пластинками из сплава ВК6.

В работах [132, 133, 137, 139, 141, 143, 166, 182] в качестве материалов, используемых для получения износостойких и эрозионностойких покрытий для лопаток турбомашин предлагается использовать нитриды, карбиды, карбонитриды таких металлов, как Ti, Zr, V, Nb и др., а также их сочетания.

Выводы по главе 1

1 На современном этапе развития техники перед материаловедческой наукой стоит ряд сложных проблем, связанных с разработкой и освоением новых конструкционных материалов на основе исследований природы физико-химических процессов, протекающих в материале приповерхностного слоя деталей. Необходимость применения комплексного подхода при изучении этого вопроса определяется множеством зависимых и, по большому счету, случайных факторов, действующих на материал детали при ее эксплуатации.

2 Наиболее ответственными и многочисленными деталями газовых и паровых турбин являются рабочие и направляющие лопатки, от долговечности работы которых зависит надежность и безаварийность эксплуатации энергетического оборудования. Основными дефектами, приводящими к ускоренному разрушению титановых лопаток, являются:

а) механические повреждения в виде трещин, грубых забоин (локальных деформаций поверхностей) особенно в нижней части пера лопатки;

б) механический износ, фреттинг-износ и фреттинг-коррозия, приводящие к разрушению демпферных связей (бандажей, антивибрационных полок, снабберов), контактных поверхностей хвостовиков и проч.;

в) газоабразивный и эрозионный износ кромок лопаток, уменьшающий площадь их сечения, что приводит к снижению прочности и предела выносливости пера лопатки, а также увеличивает риск появления усталостных трещин.

Отсутствие по вопросу преждевременного разрушения рабочих и направляющих лопаток системных теоретических и экспериментальных исследований создает перед проектными организациями определенные трудности в прогнозировании их служебных свойств применительно к конкретным условиям эксплуатации и определяет необходимость разработки новых материалов защитных покрытий и технологий их нанесения.

3 Проведенный анализ патентной и научно-технической литературы, а также результаты более ранних исследований, показывают, что одним из наиболее перспективных процессов упрочнения поверхности и повышения эксплуатационных свойств лопаток паровых и газовых турбин является технология нанесения вакуумных ионно-плазменных покрытий. В этом процессе основной материал покрытия переводится в плазменное состояние и в виде ионного потока ускоряется в направлении к обрабатываемой поверхности. В результате плазмохимических реакций в среде реакционного газа конденсируемый материал образует на поверхности покрытие с заданной толщиной, структурой и физико-химическими свойствами.

4 Повышение комплекса эксплуатационных свойств рабочих лопаток паровых и газовых турбин из титановых сплавов (сопротивление газоабразивному износу, каплеударной эрозии и

фреттинг-коррозии) возможно созданием специальной композиционной структуры покрытия, включающей в себя чередование функциональных слоев в т.ч. наноструктурной толщины, путем совмещения в одном вакуумном объеме ионно-лучевых технологий высоких энергий. При этом сочетанием слоев из различных материалов достигают многократное повышение служебных свойств многослойного покрытия по сравнению со свойствами его слоев, взятых по отдельности.

5 Наиболее стойкими к эрозии и износу являются многослойные покрытия типа *Me-MeN* (*Me* – тугоплавкий металл IV-V групп периодической таблицы Менделеева) с регулярным чередованием слоев и общей толщиной до 20 мкм. Количество чередующихся слоев может составлять от 2 до 20 и более в зависимости от общей толщины покрытия. Такая комбинация металлических и нитридных слоев позволяет заметно уменьшать внутренние напряжения в покрытии и обеспечивать высокую прочность сцепления с поверхностью детали сложной формы.

ГЛАВА 2
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНЕШНЕГО ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЛОПАТКИ ТУРБОМАШИН С МНОГОСЛОЙНЫМИ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫМИ ПОКРЫТИЯМИ

2.1 Моделирование остаточных напряжений в многослойных покрытиях

Внутренние напряжения, действующие в ионно-плазменных покрытиях, относятся к напряжениям второго рода (по классификации Давиденкова) [200] и возникают вследствие искажения кристаллической решетки между различными фазами в материалах покрытия и основы. Изучению внутренних остаточных напряжений в ионно-плазменных покрытиях в настоящее время посвящено много экспериментальных и теоретических работ [110, 202, 203], где описаны механизмы возникновения напряжений в тонких пленках и покрытиях и их влияние на физико-механические и служебные свойства. При осаждении на деталь различных, в т.ч. многослойных покрытий, в последних могут одновременно формироваться как растягивающие, так и сжимающие напряжения, зависящие от физических и механических свойств материалов основы и покрытия, а также от технологических режимов: температура осаждения, ускоряющее напряжение (напряжение смещения), плотность ионного тока и др. Сжимающие напряжения являются, как правило, благоприятными и обусловливают высокую твердость, износостойкость, сопротивление усталостному разрушению и др. Растягивающие напряжения – наоборот, приводят к ускоренному изнашиванию, появлению трещин, их ускоренному развитию и разрушению.

При моделировании внутренних напряжений ($\sigma_{ост}$), возникающих в многослойных ионно-плазменных покрытиях в процессе их нанесения, учитывалось совместное действие температурных и структурных напряжений. С учетом теоремы о разгрузке [184-186] остаточные напряжения в материале покрытия после его осаждения можно выразить в виде суммы напряжений:

$$\sigma_{ост} = (\sigma_т - \sigma_0) + \sigma_{темп} = \sigma_{стр} + \sigma_{темп}, \text{ МПа} \qquad (2.1)$$

где $\sigma_т$ – предел текучести материала с действующими в нем внутренними напряжениями, МПа;

σ_0 – предел текучести материала после снятия остаточных напряжений, например, после термообработки, МПа;

$\sigma_{темп}$ – температурные напряжения, возникающие после охлаждения детали с нанесенным покрытием, МПа;

$$\sigma_{темп} = \frac{E}{1-\upsilon}(\alpha_d - \alpha_s)\Delta T, \text{ МПа} \quad (2.2)$$

где E – модуль Юнга материала покрытия, МПа;

ν – коэффициент Пуассона;

α – коэффициент термического расширения, $К^{-1}$ (индексы: d – покрытие; s – основной материал);

ΔT – изменение температуры после нанесения покрытия, К;

$\sigma_{стр}$ – структурные напряжения, которые могут быть определены через соответствующие компоненты:

$$\sigma_{стр} = \sigma_{тр} + \sigma_{ду} + \sigma_{з} + \sigma_{д}, \text{ МПа} \quad (2.3)$$

где $\sigma_{тр}$ – компонент твердорастворного упрочнения, МПа;

$$\sigma_{тр} = \sum_i K_i C_i, \text{ МПа} \quad (2.4)$$

где Ki – коэффициент упрочнения i-м легирующим элементом, МПа;

C_i – концентрация i-го легирующего элемента;

$\sigma_{ду}$ – компонент дисперсионного упрочнения, МПа;

$$\sigma_{ду} = \alpha_0 M_0 G b \, ln\left(\frac{\lambda}{2b}\right), \text{ МПа} \quad (2.5)$$

где α_0 – коэффициент;

M_0 – ориентационный множитель;

G – модуль сдвига, МПа;

b – вектор Бюргерса, мм;

λ – расстояние между частицами вторых фаз, мм.

$\sigma_{ду}$ – компонент зернограничного упрочнения;

$$\sigma_{з} = \sigma_{зо} + \frac{k}{\sqrt{D}}, \text{ МПа} \quad (2.6)$$

где $\sigma_{зо}$ – минимальное напряжение, необходимое для скольжения дислокаций, МПа;

k – коэффициент Холла-Петча;

D – размер кристаллита, мм;

$$\sigma_{\partial} = \alpha_1 M_1 G b \sqrt{\rho}\ , \text{МПа} \qquad (2.7)$$

где $\sigma_{д}$ – компонент дислокационного упрочнения, МПа;

α_1 – коэффициент;

M_1 – ориентационный множитель;

ρ – плотность дислокаций, мм$^{-2}$.

Анализ компонент структурных напряжений позволяет сделать следующие рекомендации по выбору материалов покрытия и режимов его нанесения для формирования на поверхности обрабатываемой детали остаточных напряжений сжатия. В качестве материалов покрытия необходимо выбирать высоколегированные металлы с высоким модулем упругости и большой величиной вектора Бюргерса. В процессе напыления выбранного материала к обрабатываемой детали необходимо прикладывать положительное напряжение смещения с целью формирования направленного потока ионов, бомбардировки им осаждаемого покрытия и, как следствие, увеличения плотности дислокаций.

Структура материала покрытия является результатом действия множества случайных физических и плазмохимических процессов, протекающих на поверхности, что делает расчет структурных остаточных напряжений с приемлемой точностью затруднительным. В этой связи общую величину остаточных напряжений в исследуемых покрытиях ($\sigma_{ост}$) определяли экспериментально методом рентгеноструктурного анализа (пункт 5.5.2, глава 5), температурные напряжения ($\sigma_{темп}$) рассчитывали по приведенной выше формуле, а структурные напряжения рассчитывали вычитанием из общей величины остаточных напряжений температурного компонента, в соответствии с формулой (2.1).

Остаточные температурные напряжения в многослойных покрытиях является результатом действия локальных напряжений, возникающих в отдельных слоях покрытия, зависящих от материала и толщины конкретного слоя. Для исследования остаточных температурных напряжений в многослойных покрытиях был использован известный метод конечных элементов в среде Comsol Multiphysics. В качестве модели покрытия была принята многослойная слоистая конструкция из чередующихся слоев нитрида титана (TiN) и титана (Ti) с различной толщиной и количеством слоев. Для исследования влияния материала титановых слоев на величину и распределение остаточных напряжений были выбраны два сплава: ВТ1-0 (α-Ti) и ВТ6 ((α+β)-Ti). В качестве основного обрабатываемого материала (материала подложки) был выбран титановый сплав ВТ-6, используемый для изготовления рабочих лопаток газовых и паровых турбин. Начальная и конечная температура материалов покрытия и подложки соответствовала термическому циклу нанесения покрытия: нагрев до 500 °С в течение 10 минут, далее остывание до нормальной

температуры вместе с вакуумной камерой (≈120 минут). Исследовали распределение главных напряжений в основном материале и в покрытии при изменении его толщины от 1,5 до 30,5 мкм и количества слоев от 1 до 20.

Расчеты проводили в осесимметричной постановке с использованием нелинейных упругопластических моделей материалов, основные свойства которых приведены в Таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Свойства материалов, использованные при моделировании остаточных напряжений в покрытиях

Материал	Модуль Юнга E, МПа	Коэффициент Пуассона υ	Коэффициент линейного расширения, α $К^{-1}$ в диапазоне 100-500 °С
Титановый сплав ВТ6 [186]	$1{,}12\cdot10^5$	0,32	$1{,}10\cdot10^{-5}$
Титановый сплав ВТ1-0 [188]	$1{,}15\cdot10^5$	0,32	$8{,}6\cdot10^{-6}$
Титановый сплав ВТ20 [188]	$1{,}12\cdot10^5$	0,32	$9{,}3\cdot10^{-6}$
Ванадий [189]	$1{,}25\cdot10^5$	0,36	$9{,}6\cdot10^{-6}$
Нитрид TiN [15]	$3{,}26\cdot10^5$	0,28	$9{,}4\cdot10^{-6}$
Нитрид VN [190]	$2{,}05\cdot10^5$	0,29	$9{,}5\cdot10^{-6}$
Нитрид (50%Ti+50%V)N [190]	$2{,}56\cdot10^5$	0,28	$9{,}5\cdot10^{-6}$

Примечание – Механические свойства приведены для отожжённого состояния

Результаты расчетов остаточных температурных напряжений в многослойных покрытиях системы Ti+TiN с различной конструкцией (толщиной, количеством и материалом промежуточных слоев) приведены в Таблице 2.2. В качестве примера на Рисунках 2.1 и 2.2 показаны распределения остаточных температурных напряжений в восьмислойном покрытии толщиной 12 мкм.

Анализ полученных результатов показал, что величина остаточных температурных напряжений, возникающих в основных и промежуточных слоях исследуемых многослойных покрытий, не зависит от толщины покрытия, и позволяет рассматривать их действие в условиях плосконапряженного состояния.

Установлено, что во всех исследованных вариантах покрытий формируются напряжения сжатия от минус 250 до минус 442 МПа, которые на границе с основным материалом меняют знак так, что в основном материале действуют напряжения растяжения величиной до 55 МПа (Таблица 2.2), убывающие до нуля на расстоянии от поверхности образца более 100 мкм, как это видно на Рисунке 2.2. При этом основным критерием, определяющим величину возникающих в основном материале растягивающих напряжений, является произведение толщины покрытия на

величину действующих в нем остаточных напряжений. Установленная зависимость влияния остаточных напряжений сжатия, действующих в покрытии, на величину растягивающих напряжений в основном материале, является линейной и показана на Рисунке 2.3.

Таблица 2.2 – Остаточные температурные напряжения в многослойных покрытиях Ti+TiN, нанесенных на титановый сплав ВТ6

Толщина покрытия*, h, мкм	Толщина слоев TiN h_{TiN}, мкм	Кол-во слоев	Напряжение в слоях TiN, σ_{TiN}, МПа	Напряжение в слоях Ti, σ_{Ti}, МПа	Напряжение в основном материале на границе с покрытием**, МПа
1,5	1	2	-368	-	+2
3	2,5	2	-360	-	+5
3,5	1,5	4	-362	-217	+5
5,5	5	2	-348	-	+10
6,0	2,5	4	-347	-212	+10
7,5	1	10	-342	-210	+12
10,5	10	2	-325	-	+19
11,0	5	4	-324	-202	+20
12,0	2,5	8	-324	-202	+21
15,0	1	20	-324	-201	+23
20,5	20	2	-284	-	+35
30,5	30	2	-250	-	+48
1,5	1	2	-442	-	+2
3	2,5	2	-432	-	+6
3,5	1,5	4	-381	+6	+6
5,5	5	2	-414	-	+12
6,0	2,5	4	-414	+12	+12
7,5	1	10	-432	+11	+11
10,5	10	2	-381	-	+22
11,0	5	4	-381	+22	+22
12,0	2,5	8	-381	+22	+22
15,0	1	20	-394	+18	+18
20,5	20	2	-325	-	+40
30,5	30	2	-282	-	+55

* Указана суммарная толщина всех слоев. Толщина титановых слоев для всех вариантов покрытий составляет $hTi = 0{,}5$ мкм.

** Максимальная абсолютная погрешность указанных величин напряжений ±1,5 МПа.

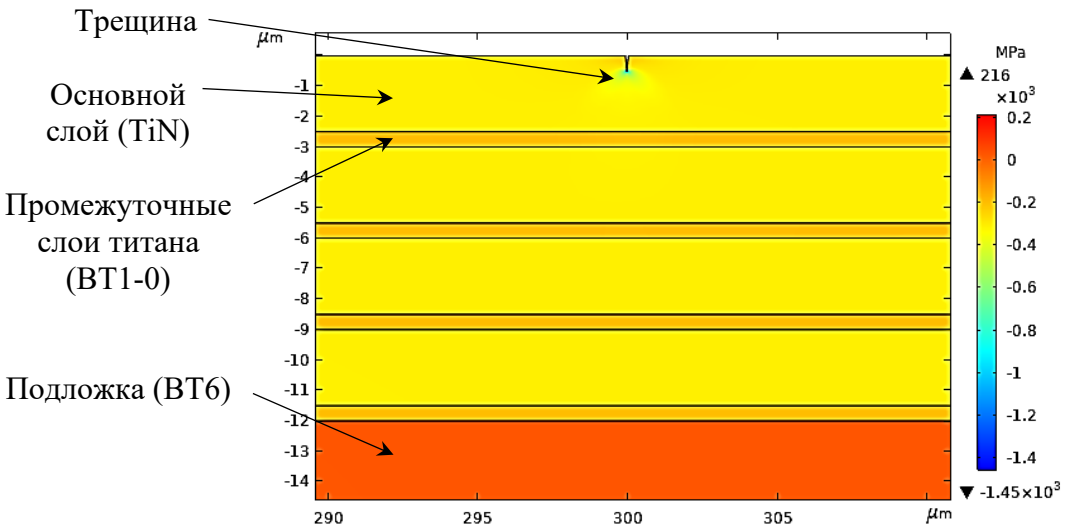
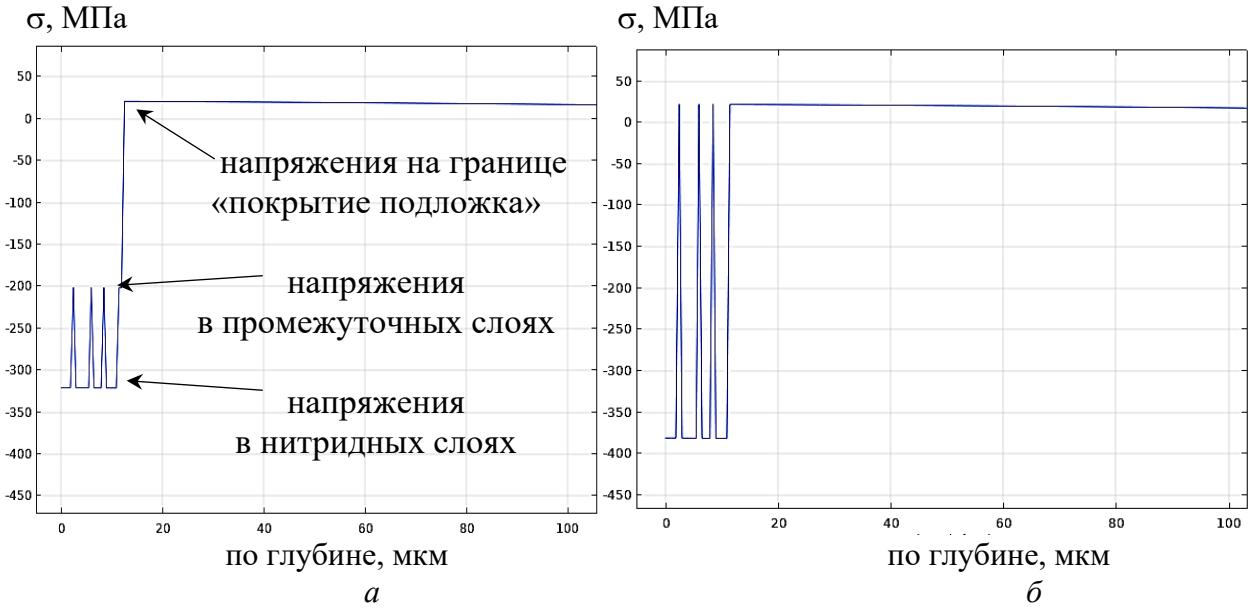


Рисунок 2.1 – Пример распределения главных напряжений в многослойном покрытии (2,5TiN+0,5Ti)x4, нанесенном на образец из сплава ВТ6 при нагреве до 500 °С и охлаждении до нормальной температуры



а – промежуточные слои из ВТ1-0; *б* – промежуточные слои из ВТ6

Рисунок 2.2 – Эпюры распределения главных остаточных напряжений по глубине поверхности образца с покрытием (2,5TiN+0,5Ti)x4 на образце из сплава ВТ6

Аналитически величина остаточных напряжений, возникающих в основном материале на границе с покрытием, может быть выражена в виде формулы:

$$\sigma_{\text{осн}} = k(\sum h_{TiN}\sigma_{TiN} + \sum h_{Ti}\sigma_{Ti})n, \text{ МПа} \quad (2.8)$$

где k = -6,08 – коэффициент, зависящий от физико-химических свойств материала покрытия, мм$^{-1}$;

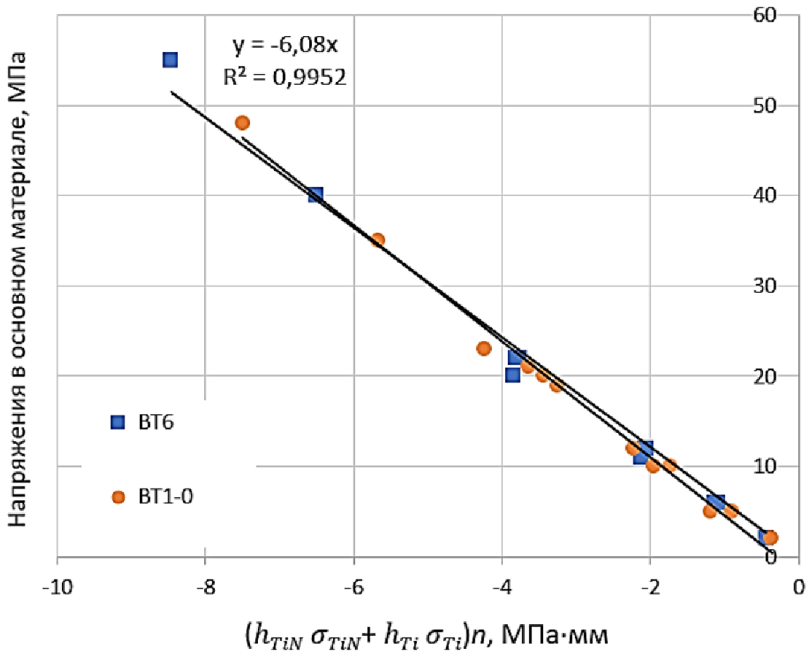
σ_{TiN} – остаточные напряжения в нитридных слоях, МПа;

σ_{Ti} – остаточные напряжения в титановых слоях, МПа;

h_{TiN}, h_{Ti} – толщины нитридных и титановых слоев (соответственно), мм;

n – количество пар слоев.

Минимальные (по модулю) остаточные термические напряжения действуют в более толстых покрытиях (Таблица 2.2), с увеличением толщины от 1,5 до 30,5 мкм, напряжения в нитридных слоях уменьшаются в 1,5 раза. При этом добавление в покрытие титановых прослоек меньшей толщины ($h_{\text{Ti}} < h_{\text{TiN}}$) количеством от 1 до 9 шт. на величину термических напряжений в нитридных слоях практически не влияет, что связано с их сравнительно меньшей величиной модуля упругости и меньшей толщиной.



σ_{TiN}, σ_{Ti} – остаточные напряжения в нитридных и титановых слоях, МПа (соответственно); h_{TiN}, h_{Ti} – толщины нитридных и титановых слоев соответственно, мм; n – количество пар слоев

Рисунок 2.3 – Зависимость величины остаточных напряжений, действующих в основном материале (сплавы ВТ6 и ВТ1-0), от напряжений сжатия в покрытии

Особую роль при формировании напряженно-деформированного состояния многослойных покрытий играет материал промежуточных слоев, подбором которого можно формировать как сжимающие, так и растягивающие остаточные напряжения, в зависимости от величины его коэффициента теплового расширения. При выборе материала промежуточных слоев с коэффициентом теплового расширения, равным основному материалу, в этих слоях будут возникать остаточные напряжения растяжения, равные по величине напряжениям, действующим на границе «покрытие-подложка» (Рисунок 2.2 б). При уменьшении коэффициента термического расширения остаточные напряжения в промежуточных слоях смещаются в сторону сжимающих, вместе с ними уменьшаются по величине остаточные напряжения в нитридных слоях (Рисунок 2.2 а). Таким образом, установлено, что подбором материала промежуточных слоев с заданными коэффициентом термического расширения и модулем Юнга можно управлять величиной остаточных температурных напряжений в многослойных нитридных покрытиях. При этом, количество промежуточных слоев (при принятых условиях: $h_{Ti} < h_{TiN}$ и $h \leq 30{,}5$ мкм) на величину остаточных напряжений, формируемых в различных слоях покрытия, влияния не оказывает.

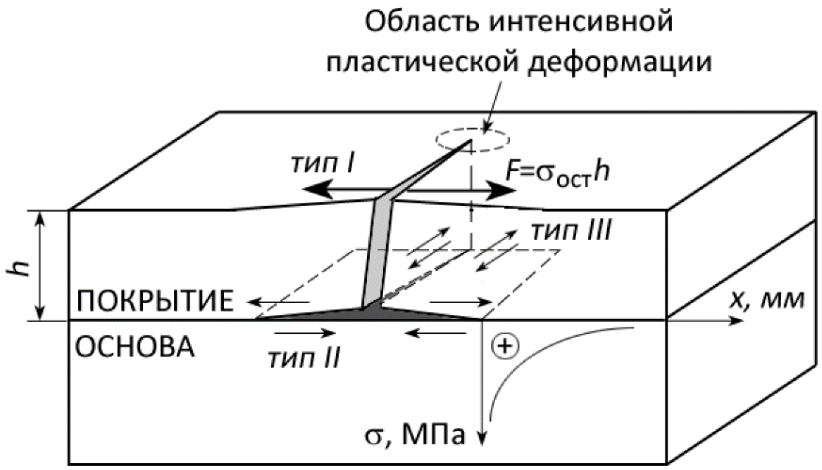
2.2 Теоретическое исследование напряженного состояния многослойных покрытий в области трещины

Формирующиеся в материале покрытия остаточные напряжения уравновешиваются в основном материале напряжениями противоположного знака и могут проявляться в области возникновении различного рода дефектов: пор, царапин, трещин и др. Со стороны материала покрытия на дефект будут действовать усилия, способные либо ускорить его развитие, например, напряжения растяжения, либо, наоборот, будут этому препятствовать. В любом случае, возникающие дефекты, особенно трещины любых форм и направлений, будут представлять собой концентраторы напряжений, значительно влияющие на напряженно-деформированное состояние материала поверхности с покрытием и, в конечном итоге, на прочность и долговечность детали.

В зависимости от свойств основных и промежуточных слоев многослойных покрытий возникающие трещины будут развиваться по-разному. Появляясь в большинстве случаев на поверхности внешнего, как правило, более твердого слоя покрытия, трещины сравнительно легко проникают в нижележащий сравнительно менее твердый и легко деформируемый промежуточный слой. При этом обратное движение из мягкого в более твердый и плотный материал, весьма затруднено. В связи с этим на границе раздела разнородных материалов может происходить изменение направления, торможение или полная остановка развития трещины [191]. В этом случае наличие в многослойных композиционных покрытиях даже значительного количества трещин

ограниченной длины не является критерием их разрушения. Разнородные материалы многослойных покрытий будут являться сдерживающим фактором развития трещин и, разрушаясь сами, эффективно защищать от разрушения основной материал детали.

По современным представлениям механики разрушения образование и развитие трещин, как при хрупком, так и при вязком разрушении, имеет сходную природу [192-195]. Принципиальной условием развития (увеличения размера) единичной трещины в твердом материале является необходимость протекания в ее устье предварительной пластической деформации, интенсивность и форма которой определяет скорость и направление развития разрушения. Наиболее типичными трещинами в слоистых композиционных покрытиях, работающих в условиях плоского напряженно состояния, являются трещины разрыва и сдвига, возникающие в местах концентрации напряжений (в области поверхностных дефектов) и распространяющиеся в материале под действием внутренних напряжений (Рисунок 2.4).



h – толщина покрытия; F – силы, действующая на единицу длины трещины;

$\sigma_{ост}$ – внутренние остаточные напряжения;

σ – напряжения, возникающие в области перед трещиной

Типы трещин: *I* – разрыва; *II* – поперечного сдвига; *III* – продольного сдвига

Рисунок 2.4 – Схема развития трещин на границе покрытия с основой

В соответствии с теорией Гриффитса и Ирвина [196, 197] трещина размера l_c будет самопроизвольно распространяться в материале при действии на нее растягивающих напряжений (σ), превышающих некоторую критическую величину σ_c:

$$\sigma > \sigma_c = \text{а}\frac{K_I}{\sqrt{\pi l_c}}, \text{ МПа} \qquad (2.9)$$

где K_I – коэффициент интенсивности напряжений первого типа, являющийся константой материала при его плоском напряженном состоянии, МПа·мм$^{1/2}$;

a – коэффициент, учитывающий влияние формы и размеров образца;

l_c – размер трещины, мм.

Формула (2.10) также справедлива для касательных напряжений, действующих при сдвиге, например, при адгезионном разрушении покрытия на границе с основой, при этом рассматривают коэффициент интенсивности напряжений второго или третьего типа, соответственно K_{II} и K_{III}.

Наряду с коэффициентом интенсивности напряжений, широко применяемом в линейной механике разрушения, используют более универсальный параметр, не зависящий от формы и размеров образца, который известен как J-интеграл с размерностью МПа·мм [198, 199]. Он характеризует скорость высвобождения потенциальной энергии при деформировании как линейно-упругих, так и нелинейно-упругих (вязких) материалов в маломасштабной области текучести у вершины трещины. Величину J-интеграла можно выразить в виде отношения [199]:

$$J = -dU_p/dl = \begin{cases} \frac{1}{E} * (K_I^2 + K_{II}^2), \text{ плоское напряженное состояние;} \\ \frac{1 - v^2}{E} * (K_I^2 + K_{II}^2), \text{ плоское деформированное состояние;} \end{cases} \quad (2.10)$$

где dU_p – изменение потенциальной энергии, Дж;

dl – приращение трещины, мм;

E – модуль Юнга, МПа;

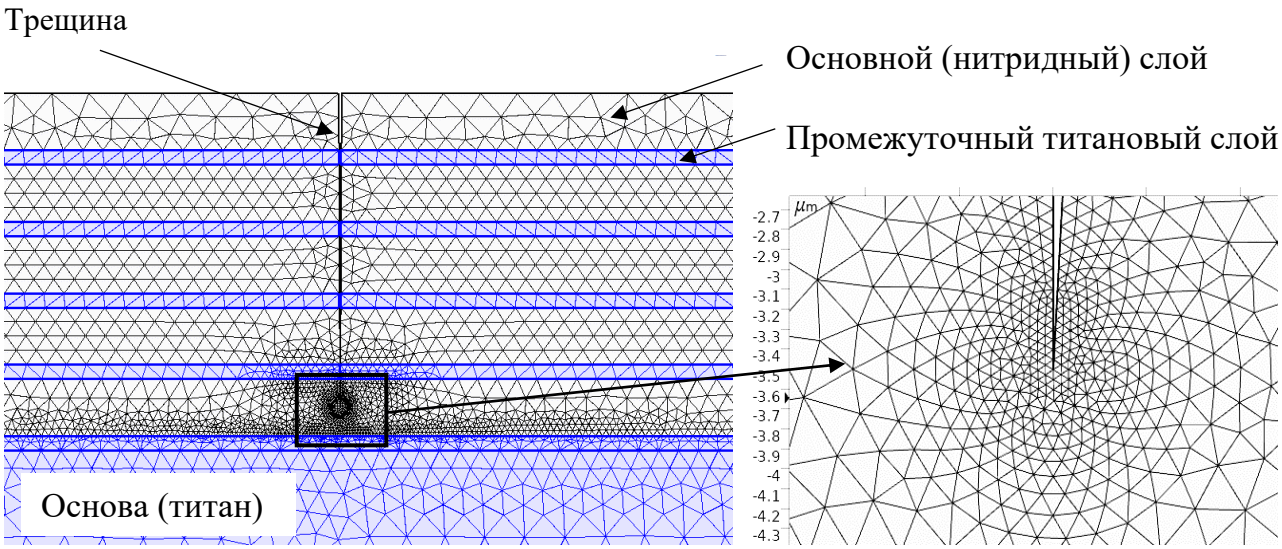
v – коэффициент Пуассона.

Из выражения (2.10) следует, что, исследуя изменение величины J-интеграла при распространении трещины в многослойном покрытии, можно определить коэффициент интенсивности напряжений на каждом его участке и, следовательно, стойкость к развитию трещин. Рассмотрим динамику развития трещины, имеющую начало на поверхности многослойного покрытия, связанные с этим изменение напряженно-деформированного состояния и величины коэффициента интенсивности напряжений.

Исследование проводили методом конечных элементов в среде Ansys и Comsol Multiphysics. Модель покрытия – многослойная слоистая конструкция с различной толщиной (h от 0,5 до 30,0 мкм), количеством слоев (от 2 до 20), сформированная на подложке из титанового сплава ВТ-6 при температуре 500 °С. Основные свойства используемых материалов приведены в Таблице 2.1. Уровень внутренних остаточных напряжений, действующий в покрытии, изменяли в

диапазоне от минус 200 до минус 2000 МПа (Таблица 2.2). Верхнее значение выбранного диапазона соответствует минимальным термическим напряжениям, действующим в исследуемых покрытиях при отсутствии структурных напряжений, например, после термической обработки. Нижнее значение выбрано на основании проведенных экспериментальных исследований и является характерной величиной остаточных напряжений, возникающих в нитридных ионно-плазменных покрытиях (пункт 5.7, глава 5).

Исследование проводили методом конечных элементов в среде Ansys и Comsol Multiphysics. Модель покрытия представляет собой многослойную слоистую конструкцию из чередующихся слоев титана и нитридов титана различной толщины, сформированную на полубесконечной подложке из титанового сплава ВТ-6. Расчеты проводили в осесимметричной постановке с использованием нелинейных упругопластических моделей материалов. Пример многослойного покрытия на массивной подложке и вид конечно-элементной сетки в области искусственной трещины приведены на Рисунке 2.5.



а *б*

а – конечно-элементная сетка покрытия; *б* – конечно-элементная сетка в области трещины

Рисунок 2.5 – Модель многослойного покрытия для исследования напряженно-деформированного состояния методом конечных элементов

Модель трещины представляет собой две плоские поверхности заданной длины, образующие в области пересечения радиус при вершине ≈ 0,025 мкм, и направленные от поверхности к границе с основным материалом. Модель многослойного покрытия с трещиной показана на Рисунке 2.5 а.

2.2.1 Развитие трещины в многослойных композиционных покрытиях

Исследование напряженно-деформированного состояния многослойных покрытий проводили в области единичной трещины, имеющей начало на поверхности покрытия и распространяющейся по направлению к основному материалу (Рисунок 2.1 и Рисунок 2.5 а). Характерный размер элемента конечно-элементной сетки в области трещины составил 0,05 мкм (Рисунок 2.5 б), что обеспечило удовлетворительную сходимость получаемых результатов с относительной погрешностью расчета менее 1,5 %. Исследование проводили при условии действия внутренних напряжений сжатия, характерных для ионно-плазменных покрытий, и условия отсутствия внешней механической нагрузки.

Установлено, что внутренние остаточные напряжения ($\sigma_{ост}$), возникающие в материале многослойных ионно-плазменных нитридных покрытий типа Ti+TiN при их осаждении в выбранном диапазоне температур (пункт 2.1), формируют на поверхностях трещины растягивающие, а перед трещиной – значительные сжимающие напряжения величиной $\approx 3\sigma_{ост}$. Пример такого напряженно-деформированного состояния, возникающего в материале двухслойного покрытия Ti+TiN в области трещины, показан на Рисунке 2.6. Поскольку трещина является двумерным дефектом, т.е. кроме глубины имеет некоторую ширину, главные напряжения в области вершины отличаются между собой по величине и, тем самым, обусловливают возникновение напряжений сдвига, показанные на Рисунке 2.6 а.

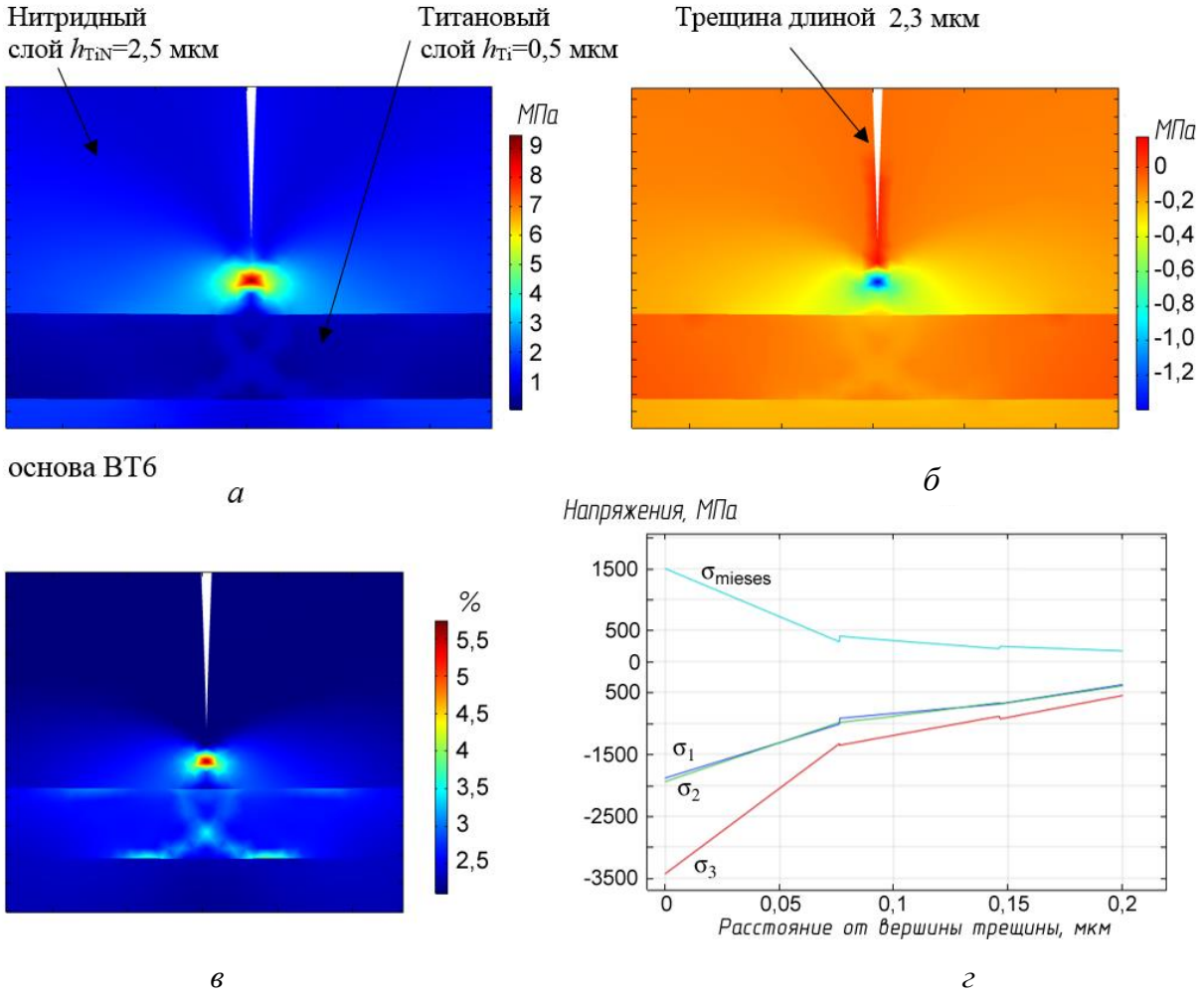
Исследовали изменение главных напряжений, эквивалентных касательных напряжений (по Мизесу), величину остаточной пластической деформации и величину *J*-интеграла в области трещины в многослойных покрытиях с различным количеством и толщиной слоев. Моделирование проводили при различной длине трещины и величине внутренних остаточных напряжений в диапазоне от минус 200 до минус 2000 МПа.

Изучено изменение напряженно-деформированного состояния во внешнем нитридном слое переменной толщины h_{TiN} многослойного ионно-плазменного покрытия типа Ti+TiN в зависимости от размера трещины. В ходе исследования изменяли величину внутренних напряжений ($\sigma_{ост}$) в установленном диапазоне и длину трещины (l_c) в диапазоне от нуля до величины нитридного слоя (h_{TiN}). В результате исследования установлены зависимости изменения эквивалентных напряжений (по Мизесу) у вершины трещины от величины отношения (l_c/h_{TiN}), показанные на Рисунке 2.7.

На приведенных графиках можно условно выделить четыре характерные области: *I* – область ускоренного роста трещины до величины $l_c \le 0{,}1h_{TiN}$; *II* – область нормального роста до

$l_c = 0{,}5h_{TiN}$, которая характеризуется монотонным увеличением эквивалентных напряжений и постоянным уровнем коэффициента концентрации напряжений K_I; *III* – область предразрушения ($0{,}5h_{TiN} < l_c \leq 0{,}9h_{TiN}$), в которой наблюдается рост коэффициента K_I (до 30%); IV – область аномального роста при $l_c > 0{,}9h$, где эквивалентные напряжения увеличиваются экспоненциально, что может приводить к самопроизвольному росту трещины и ее переходу из в титановый слой.

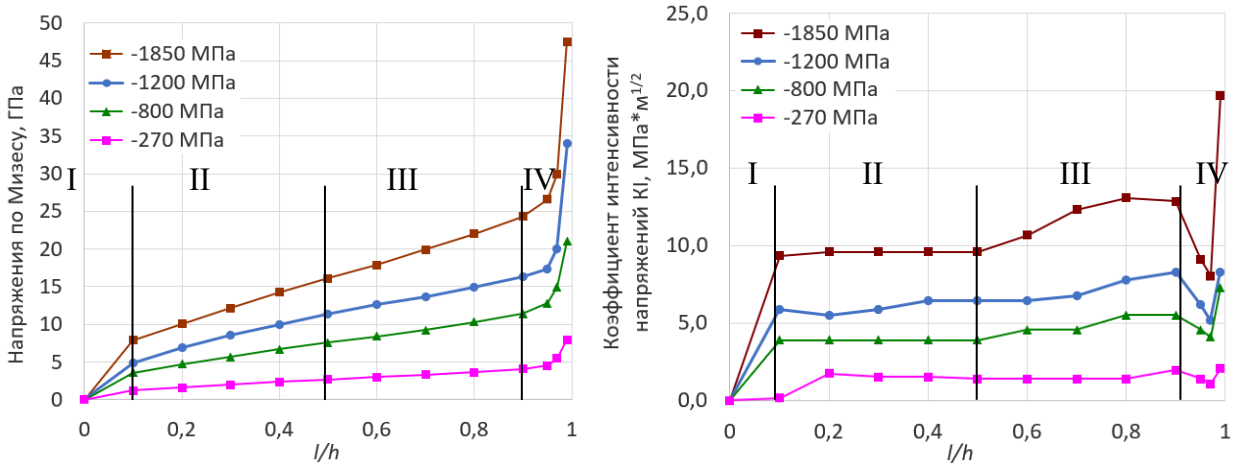
Уменьшение величины K_I в IV-й области связано с возникновением перед трещиной пластической деформации титанового слоя и уменьшением величины действующих напряжений (Рисунок 2.6).



а – эквивалентные напряжения по Мизесу (σ_{mieses}, МПа), *б* – главные нормальные напряжения (σ_1, σ_2, σ_3, МПа), *в* – деформация (ε, %), *г* – эпюры напряжений, действующих между вершиной трещины (начало координат) и титановой прослойкой

Рисунок 2.6 – Напряженно-деформированное состояние перед трещиной в нитридном слое двухслойного покрытия 0,5Ti+2,5TiN, нанесенном на сплав ВТ6, величина внутренних остаточных напряжений $\sigma_{ост} = -1200$ МПа

При увеличении внутренних (Рисунок 2.7) напряжений возникает пропорциональный рост эквивалентных напряжений и коэффициентов K_I, характер кривых при этом не меняется.



а *б*

а – эквивалентные напряжения; *б* – коэффициент интенсивности напряжений

Рисунок 2.7 – Изменение напряженного состояния материала перед трещиной в нитридном слое многослойного покрытия типа Ti+TiN при различных внутренних напряжениях

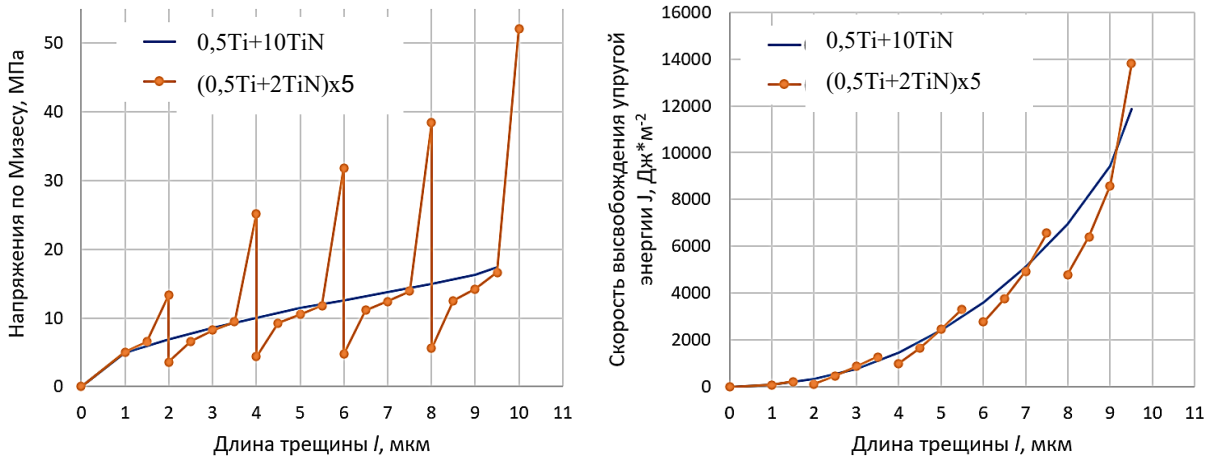
Далее проведем исследование изменения эквивалентных напряжений (по Мизесу) и скорости высвобождения упругой энергии (по величине *J*-интеграла) по мере роста трещины по всей толщине многослойного покрытия с различным количеством промежуточных титановых слоев от 0 до 5 и величиной внутренних напряжений минус 1200 МПа. Полученные результаты показаны на Рисунках 2.8-2.12. Из графиков видно, что при добавлении в покрытие промежуточных титановых слоев основные закономерности изменения эквивалентных напряжений, *J*-интеграла и коэффициента интенсивности напряжений K_I сохраняются.

При прохождении трещины через нитридные слои покрытия, в каждом из них можно выделить характерные области ускоренного, нормального и аномального роста трещины перед титановым слоем, описанные выше. При прохождении через нитридные слои эквивалентные напряжения перед трещиной монотонно увеличиваются, стремясь к уровню, характерному для однослойного покрытия, который на графиках отмечен непрерывной синей линией.

На границе с титановым слоем эквивалентные напряжения стремительно увеличиваются. Наблюдаемый аномальный рост напряжений на границе нитридного и титанового слоя связан, в первую очередь, с пластичностью титана, который не способен сдерживать возрастающие нагрузки при приближении фронта трещины и усиливает напряжения в нитридном слое. По мере роста трещины действие на нее внутренних напряжений увеличивается так, что они становятся

максимальными на границе покрытия с основным материалом, в области первого, так называемого, «*адгезионного*» слоя. Таким образом, установлено, что наиболее вероятными местами самопроизвольного распространения трещин в многослойных нитридных покрытиях являются границы между нитридными и титановыми слоями. Для сдерживания самопроизвольного роста трещин в этих местах необходимо при формировании покрытия выполнять плавный (градиентный) переход между слоями и делать такие области перехода, по возможности, более широкими, например, не менее 20...30 % от толщины нитридного слоя. Особенно это важно при нанесении первого «адгезионного» слоя с целью предотвращения самопроизвольного распространения трещины из покрытия в основной материал.

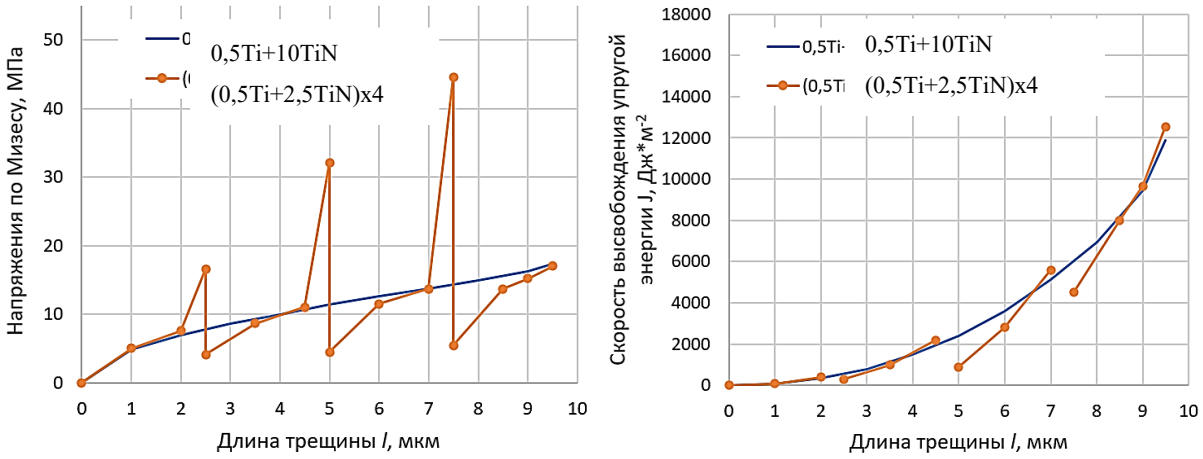
В титановых слоях интенсивность распространения трещины, пропорциональная величине *J*-интеграла, значительно уменьшается (вплоть до нуля). Это, наиболее вероятно, связано с изменением характера разрушения материала, с хрупкого на вязкий, и необходимостью затрачивать большую величину механической энергии. Дальнейшее развитие трещины осложнено необходимостью преодолеть границу перехода из титанового в более плотный нитридный слой. Кроме того, в нитридных слоях действуют значительные напряжения сжатия, кратно превышающие напряжения в титановых слоях (Рисунок 2.2), что в совокупности обусловливает необходимость дополнительной работы по высвобождению упругой энергии для роста трещины и является энергетически не выгодным. На графиках (Рисунки 2.8-2.12) видно, что торможение трещины перед нитридными слоями обусловлено меньшими по величине эквивалентными напряжениями и значительным уменьшением величины J-интеграла, на 1,5-2,0 кДж·м$^{-2}$.



а *б*

а – эквивалентные напряжения; б – величина *J*-интеграла; *x* и *y* – толщины в мкм

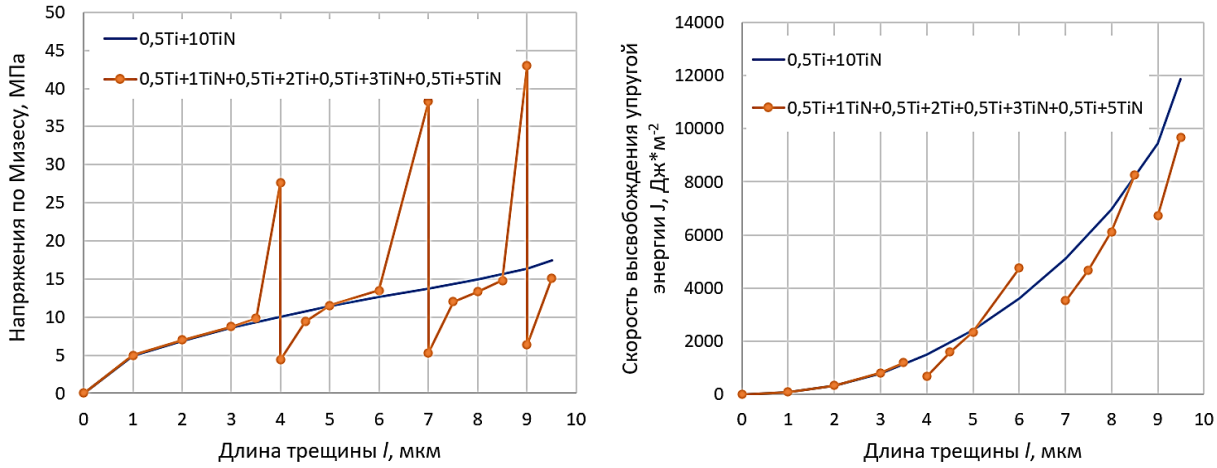
Рисунок 2.8 – Исследование многослойных покрытий (*x*TiN + *y*Ti)



а *б*

а – эквивалентные напряжения; б – величина *J*-интеграла; *x* и *y* – толщины в мкм

Рисунок 2.9 – Исследование многослойных покрытий (*x*TiN + *y*Ti)

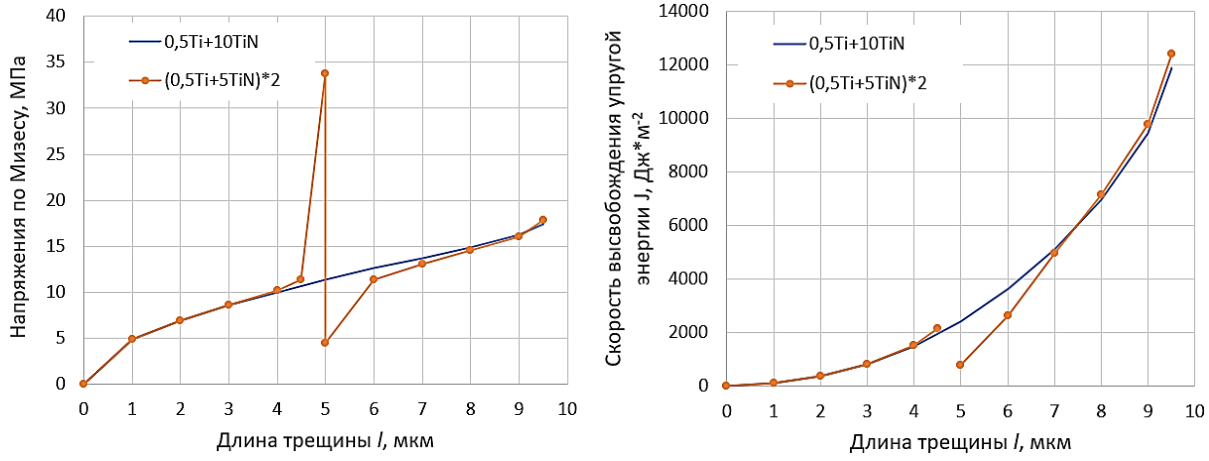


а *б*

а – эквивалентные напряжения; б – величина *J*-интеграла; *x* и *y* – толщины в мкм

Рисунок 2.10 – Исследование многослойных покрытий (*x*TiN + *y*Ti)

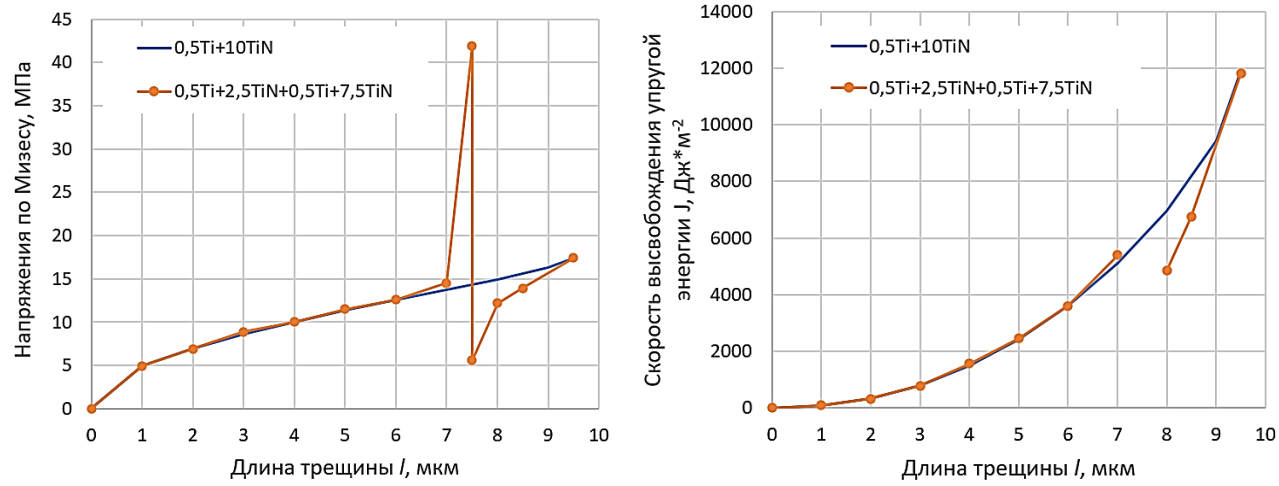
Таким образом, на границе между титановым и нитридным слоем из-за разности физико-механических и прочностных свойств этих материалов, возникает энергетический барьер, препятствующий росту трещины в этом направлении. Кроме этого, наблюдается значительное снижение (до 50%) величины эквивалентных напряжений, которые, по мере удаления от титанового слоя стремятся к уровню однослойного покрытия той же толщины, но не превышают его. Это указывает на то, что введение титановых прослоек в покрытие может являться эффективным способом торможения или блокирования развития трещин.



а *б*

а – эквивалентные напряжения; б – величина *J*-интеграла; *x* и *y* – толщины в мкм

Рисунок 2.11 – Исследование многослойных покрытий (*x*TiN + *y*Ti)



а *б*

а – эквивалентные напряжения; б – величина *J*-интеграла; *x* и *y* – толщины в мкм

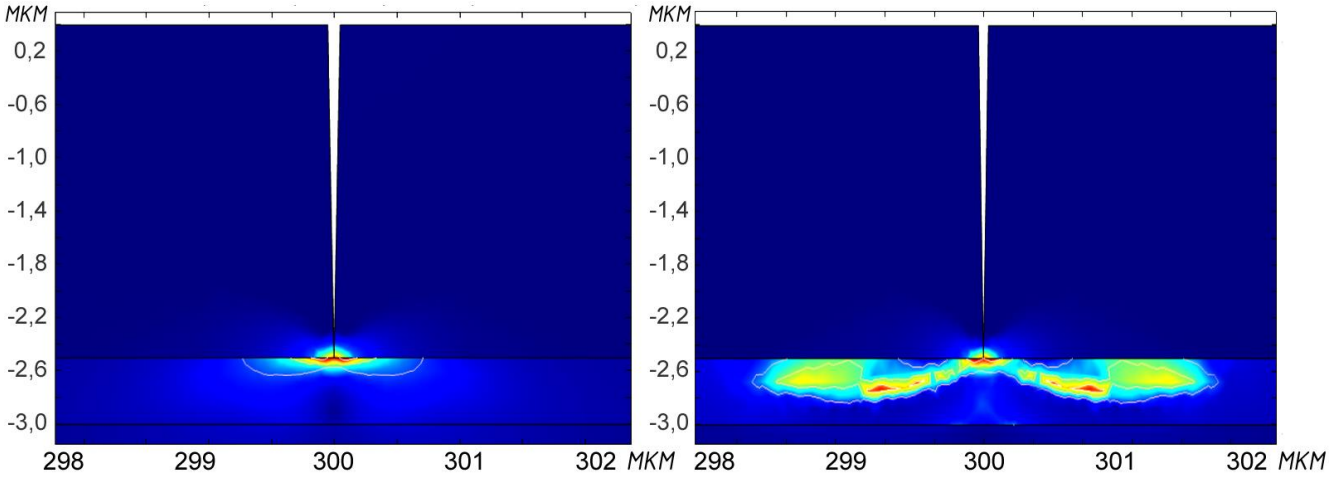
Рисунок 2.12 – Исследование многослойных покрытий (*x*TiN + *y*Ti)

Описанные закономерности напряженно-деформированного состояния не зависят от количества промежуточных титановых слоев и характерны для любых многослойных покрытий, как с одинаковыми по толщине нитридными слоями (Рисунок 2.8, 2.9, 2.11), так и со слоями различной толщины (Рисунок 2.10, 2.12).

2.2.2 Развитие трещины на границе нитридных и титановых слоев

Рассмотрим напряженно-деформированное состояние материала покрытия в области трещины, имеющей начало на поверхности внешнего нитридного слоя покрытия и достигшей границу с нижележащим титановым слоем. В этом случае в нитридных слоях будут действовать напряжения сжатия, а в титановых прослойках – незначительные напряжения растяжения (подробнее о формировании внутренних напряжениях пункт 2.1). При приближении трещины к титановому слою на расстояние приблизительно равное толщине этого слоя, в нем возникают напряжения, превышающие предел текучести, действующие в условиях стесненной деформации. В этих условиях деформация характеризуется общей затрудненностью пластических сдвигов и некристаллографическим характером пластического течения. В стесненных условиях зернограничное проскальзывание, характерное для свободной пластической деформации, вырождается в локализованные вихри и ротацию отдельных зерен. Материал в области стесненной деформации стремится расслоиться на отдельные блоки (ламели), которые относительно легко смещающиеся друг относительно друга с образованием квазиаморфных прослоек [204]. Возникающее при этом напряженно-деформированное состояние материала является определяющим для дальнейшего развития трещины, вдоль границы титанового слоя или поперек него, с возможным переходом в следующий нитридный слой и далее, в материал подложки, что в большинстве случаев является не допустимым.

Для ответа на этот вопрос проведено исследование степени деформации материала титановой прослойки у вершины трещины в зависимости от различной толщины покрытия и величины остаточных напряжений. Примеры зон пластической деформации, возникающих в области трещины на границе с титановым слоем, показаны на Рисунке 2.13. Вследствие значительной разницы напряжений, действующих в различных слоях покрытия, пластическая деформация возникает в более пластичном титановом слое. По мере увеличения остаточных напряжений сжатия зона пластической деформации увеличивается в размерах и может распространяться на всю его толщину. На Рисунке 2.14 показаны установленные зависимости величины пластической деформации, возникающие в титановом слое перед трещиной, от величины внутренних остаточных напряжений в покрытиях с толщиной нитридных слоев от 1 до 10 мкм. Необходимо отметить, что приведенные на графиках величины пластической деформации являются теоретическими, поскольку в реальных условиях они будут ограничены процессами генерации и накопления структурных повреждений, вызывающими релаксацию механических напряжений.



а *б*

а – $\sigma_{ост}$ = -1200 МПа; *б* – $\sigma_{ост}$ = -1800 МПа

Рисунок 2.13 – Зоны пластической деформации в титановой прослойке толщиной h_{Ti}=0,5 мкм при различной величине остаточных напряжений в нитридных слоях

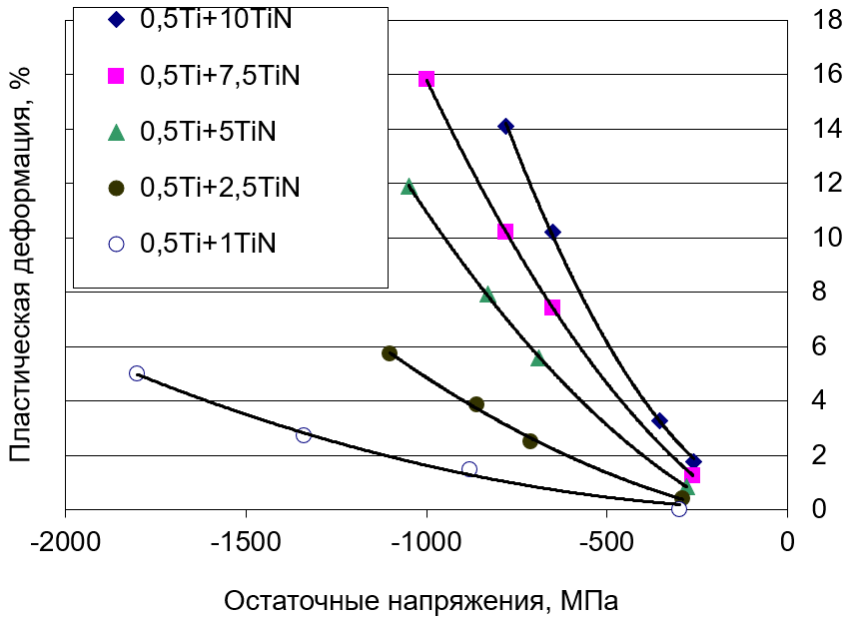


Рисунок 2.14 – Величина зоны пластической деформации в титановой прослойке толщиной 0,5 мкм при различной толщине многослойного покрытия h_d

На графиках видно, что с увеличением толщины нитридных слоев пластическая деформация может возникать даже при действии сравнительно невысоких остаточных напряжениях $\sigma_{ост}$ = -250 МПа и, далее, с их ростом увеличивается в степенной зависимости. Установлено, что снижение величины деформации в титановых слоях (на 20-30% при прочих равных условиях)

можно добиться относительным уменьшением толщины нитридных слоев, например, увеличением количества или толщины титановых слоев (Рисунок 2.15). Кроме этого, если зона пластической деформации будет меньше толщины титанового слоя, как это показано на Рисунке 2.13 б, то стоит ожидать торможение трещины и изменение направления ее развития вдоль границ слоев. Если же пластическая деформация будет действовать по всей толщине прослойки (Рисунок 2.13 б), то наиболее вероятно, что трещина скачкообразно перейдет в нижележащий нитридный слой, что является нежелательным.

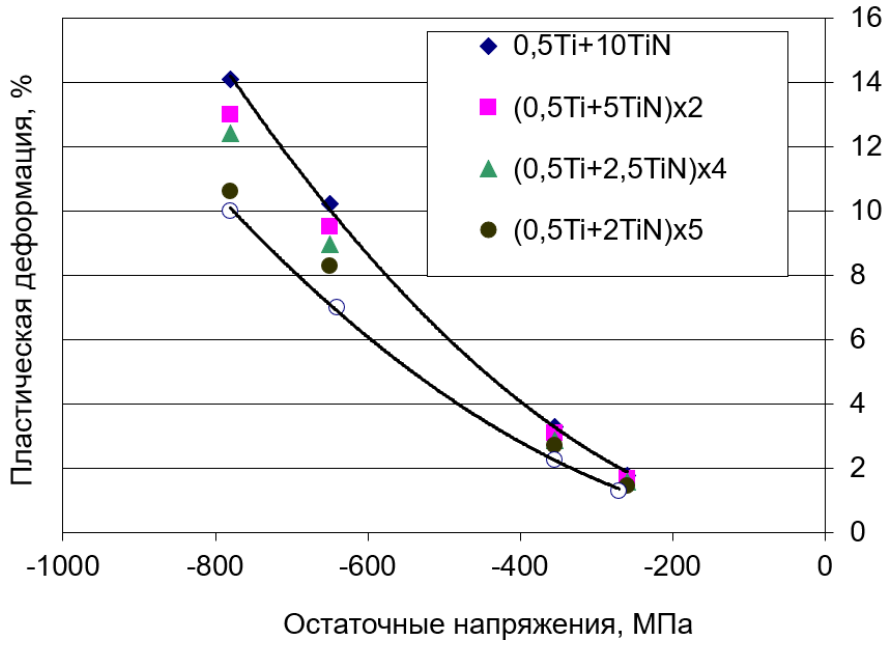
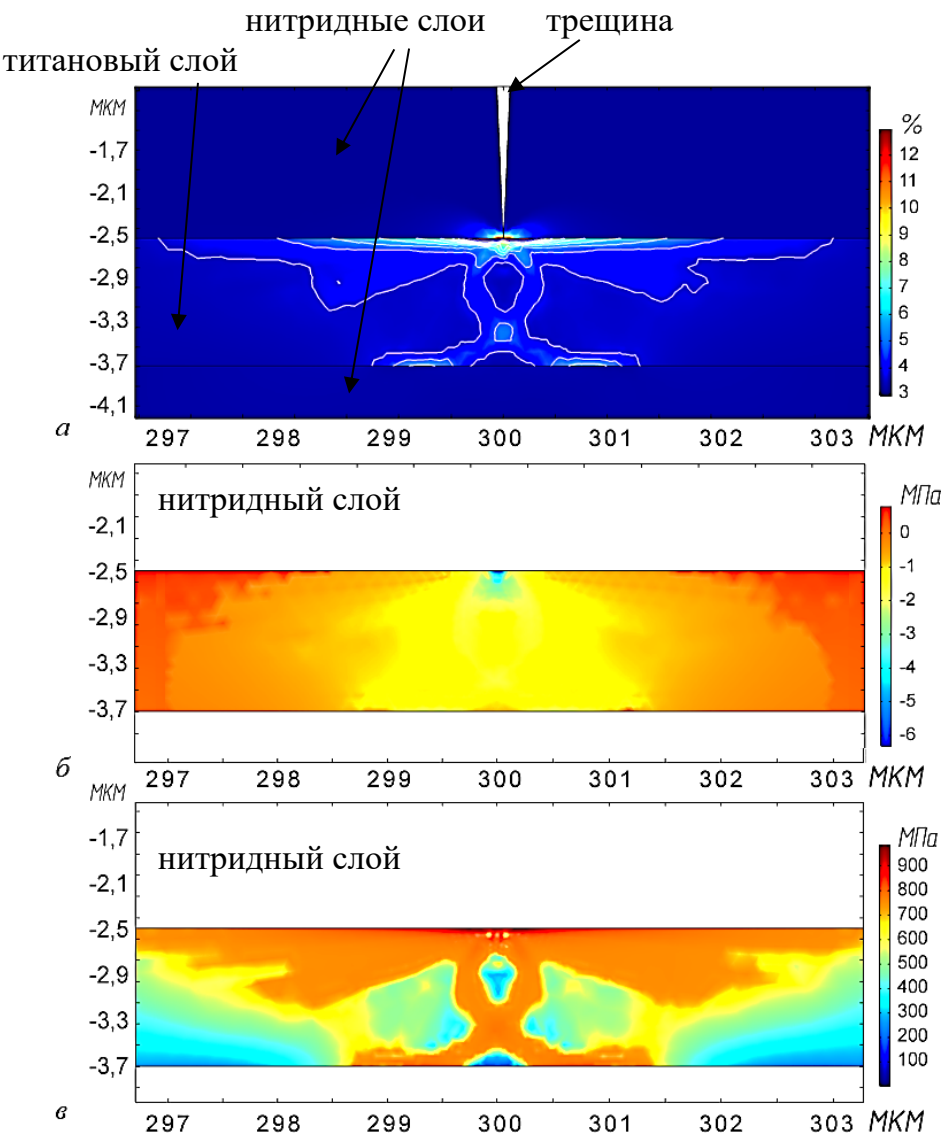


Рисунок 2.15 – Величина зоны пластической деформации при различном количестве титановых прослоек от 1 до 10 при различной толщине многослойного покрытия h_d

Проведем теоретическое исследование влияния толщины титанового слоя на характер и глубину пластической деформации в области трещины. Рассмотрим напряженно-деформированное состояние при действии остаточных напряжений сжатия минус 1800 МПа в области вершины трещины на границе с титановым слоем при изменении его толщины (h_{Ti}) от 0,2 до 2 мкм. Пример напряженно-деформированного состояния в титановом слое толщиной h_{Ti} = 1,2 мкм в области трещины показан на Рисунке 2.16. Как было сказано выше, остаточные напряжения сжатия при приближении трещины вызывают в промежуточных титановых слоях развитие пластической деформации различной интенсивности и глубины. Далее за размер зоны пластической деформации (h_{pl}) условно была принята толщина слоя с величиной пластической деформации более 1%.



а – пластическая деформация; *б* – главные нормальные напряжения;

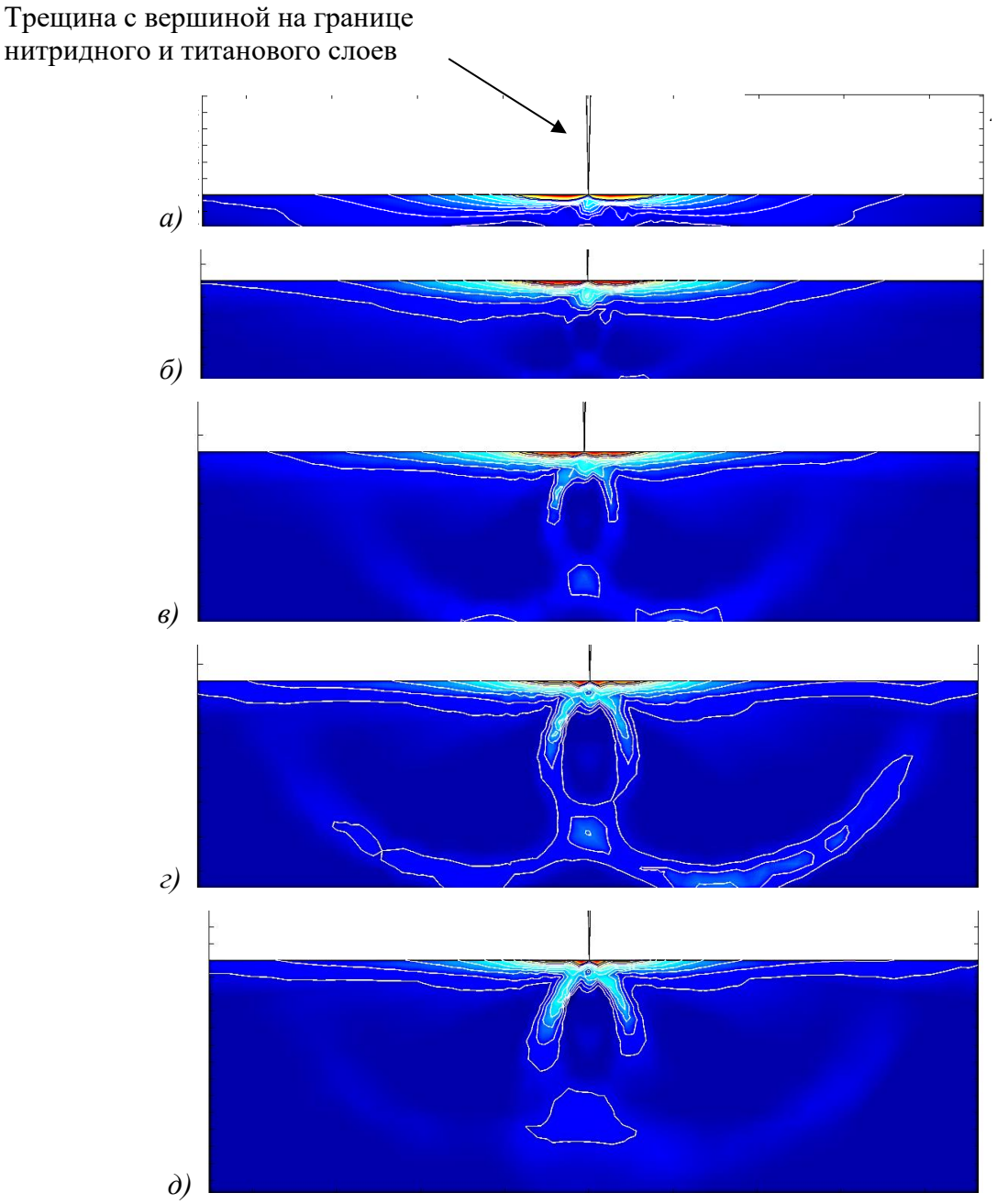
в – эквивалентные напряжения по Мизесу

Толщина нитридного слоя h_{TiN} = 2,5 мкм.

Величина внутренних остаточных напряжений $\sigma_{ост}$ = -1800 МПа

Рисунок 2.16 – Напряженно-деформированное состояние в титановой прослойке толщиной h_{Ti} = 1,2 мкм в области трещины

При изменении толщины титанового слоя h_{Ti} в диапазоне от 0,2 до 1,5 мкм при прочих равных условиях наблюдаются значительные изменения в характере и глубине пластической деформации, как это показано на Рисунке 2.17.

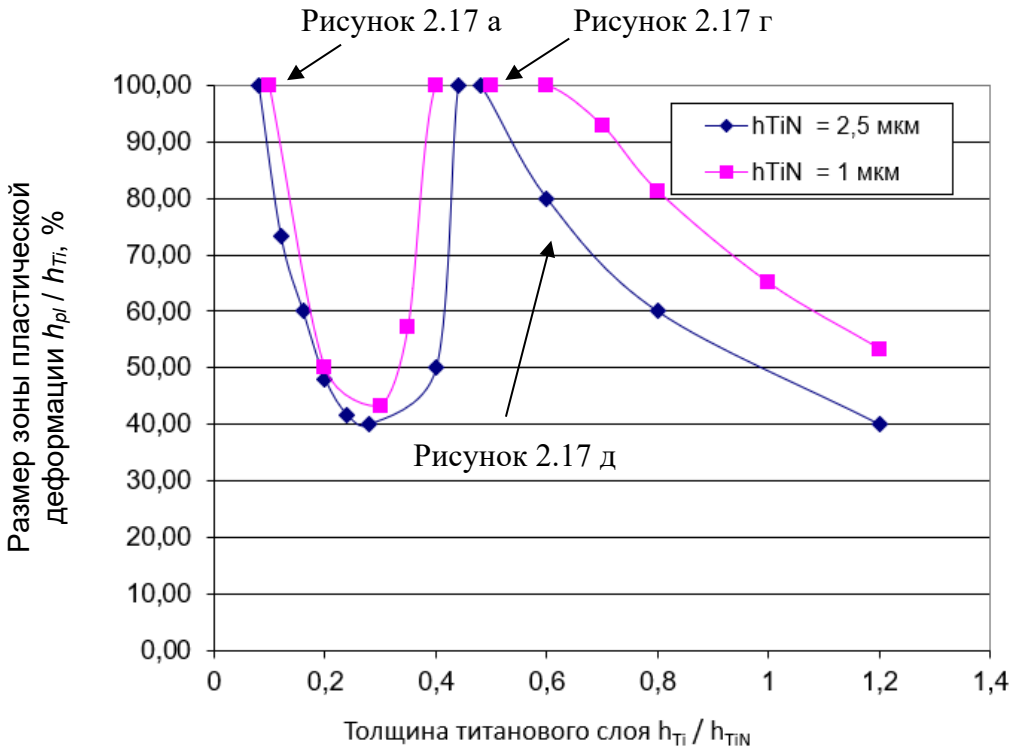


а – h_{Ti} = 0,2 мкм; *б* – h_{Ti} = 0,6 мкм; *в* – h_{Ti} = 1,0 мкм; *г* – h_{Ti} = 1,2 мкм; *д* – h_{Ti} > 1,5 мкм;

Линиями показаны уровни равных деформаций, начиная от ε = 1 %

Рисунок 2.17 – Динамика пластического деформирования титановых слоев в области трещины при действии внутренних напряжений $\sigma_{ост}$ = -1800 МПа

При толщине титанового слоя h_{Ti} = 0,2 мкм (Рисунок 2.17 а) пластическая деформация распространяется вдоль границы с нитридным слоем и охватывает всю толщину прослойки. С увеличением отношения h_{Ti} / h_{TiN} = 0,2...0,3 относительный размер зоны пластической деформации (h_{pl} / h_{Ti}) снижается и проходит через минимум (Рисунок 2.18), при этом 40-50% толщины титанового слоя деформируется менее чем на 1%, как это показано на Рисунке 2.17 б.



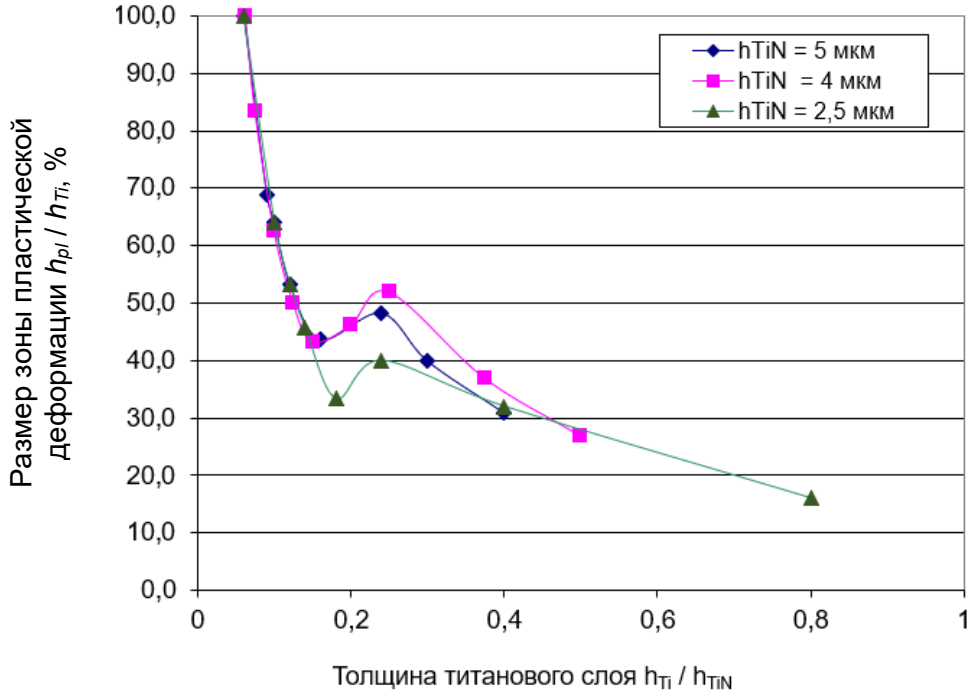
h_{Ti} , h_{TiN} – толщина титановых и нитридных слоев (соответственно)

Рисунок 2.18 – Пластическая деформация титановых слоев при различном отношении толщин h_{Ti} / h_{TiN} (Внутренние остаточные напряжения $\sigma_{ост}$ = -1800 МПа)

При дальнейшем увеличении толщины титанового слоя (h_{Ti}) картина пластической деформации заметно изменяется. Возникают две пересекающиеся «*С-образные*» или «*кольцевые*» области пластической деформации, имеющие свое начало у вершины трещины и распространяющиеся на всю толщину титанового слоя (Рисунок 2.16, Рисунок 2.17 в, Рисунок 2.17 г). Появление наблюдаемых кольцевых областей связано с тем, что нижележащий нитридный слой перестает сдерживать развитие пластической деформации в титановой прослойке, где возникают значительные напряжения сдвига (Рисунок 2.16 в). При дальнейшем увеличении толщины h_{Ti} более 1,5 мкм (h_{Ti} / h_{TiN} > 0,6), размер зоны пластической деформации (h_{pl}) и ее характер практически не меняется (Рисунок 2.17 д).

При уменьшении величины остаточных напряжений до минус 1400 МПа (Рисунок 2.19), 100% пластическая деформация в области трещины наблюдается только для сравнительно тонких титановых слоев, при соотношении толщин h_{Ti} / h_{TiN} < 0,05. С увеличением толщины (h_{Ti}) размер пластически деформированного слоя будет уменьшаться до минимального значения 35...45% от толщины титановой прослойки, как это показано на Рисунке 2.19 при h_{Ti} / h_{TiN} = 0,2.

При дальнейшем увеличении h_{Ti}, как и в рассмотренном выше случае, размер зоны пластической деформации увеличивается в связи с появлением «кольцевых» деформаций от касательных напряжений, аналогичных показанным на Рисунке 2.17 г.

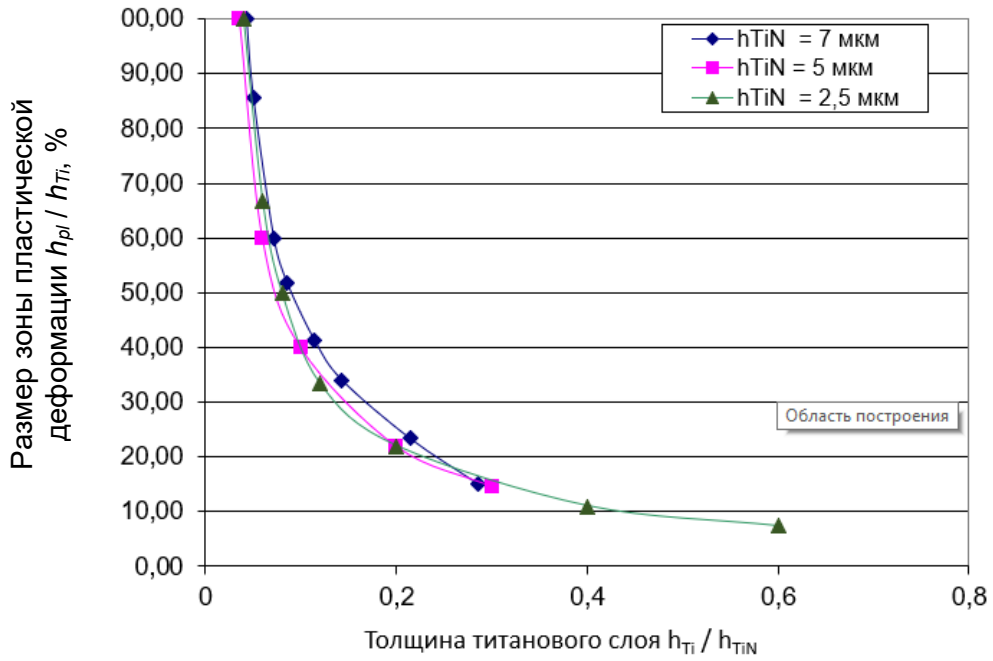


h_{Ti} , h_{TiN} – толщина титановых и нитридных слоев (соответственно)

Рисунок 2.19 – Пластическая деформация титановых слоев при различном отношении толщин h_{Ti} / h_{TiN} (Внутренние остаточные напряжения $\sigma_{ост}$ = -1400 МПа)

При дальнейшем уменьшении внутренних остаточных напряжениях, до минус 1000 МПа, пластическое деформирование титановых прослоек по всей толщине наблюдается при толщине титанового слоя $h_{Ti} \leq 0{,}05 h_{TiN}$ (Рисунок 2.20) также, как и в предыдущих случаях. Далее, при увеличении толщины h_{Ti}, относительная глубина пластической деформации монотонно снижается, без образования «кольцевых» областей деформации.

Установленные закономерности пластической деформации и вид приведенных зависимостей являются характерными для различных сочетаний твердых нитридных и более пластичных титановых слоев многослойных покрытий. Таким образом, для известной величины действующих в покрытии остаточных напряжений, по установленным зависимостям можно подобрать такое отношение толщин слоев (h_{Ti} / h_{TiN}), которое обеспечит заданную прочность покрытия за счет минимизации глубины пластической деформации в области трещины.



h_{Ti} , h_{TiN} – толщина титановых и нитридных слоев (соответственно)

Рисунок 2.20 – Пластическая деформация титановых слоев при различном отношении толщин h_{Ti} / h_{TiN} (Внутренние остаточные напряжения $\sigma_{ост}$ = -1000 МПа)

2.3 Теоретическое исследование многослойных покрытий при каплеударной эрозии

Одним из основных видов износа рабочих лопаток последних ступеней паровых турбин является капельная эрозия, возникающая в результате ударного воздействия капель жидкости по входным кромкам рабочих лопаток. При длительной работе капельная эрозия приводит к значительному износу материала, особенно в периферийных сечениях лопаток, где действует максимальная скорость соударения, на различных типах турбин от 200 до 600 м/с, при этом характер разрушения материала лопаток остается одинаковым [4, 16, 30, 31, 33, 37, 211, 220]. Разрушения представляют собой различную степень усталостного износа на локальных участках поверхности в виде, так называемой, «горной» структуры, Рисунок 2.21. Таким образом, в результате капельной эрозии происходит износ периферийных сечений лопатки, что при длительной наработке приводит к изменению собственных частот колебаний лопаток, ускоренному развитию усталостных дефектов, разрушению бандажных связей или обрыву части пера. Механизм капельной эрозии деталей паровых турбин в настоящее время является до конца не исследованным [220]. По общепринятым представлениям причиной износа является многочисленные удары капель, при которых возникает импульс давления:

$$p = \rho_ж c_ж w_н (1 + \rho_ж c_ж / \rho_п c_п), \text{ Па;} \quad (2.11)$$

где $\rho_ж$ – плотность воды капель, кг/м^3;

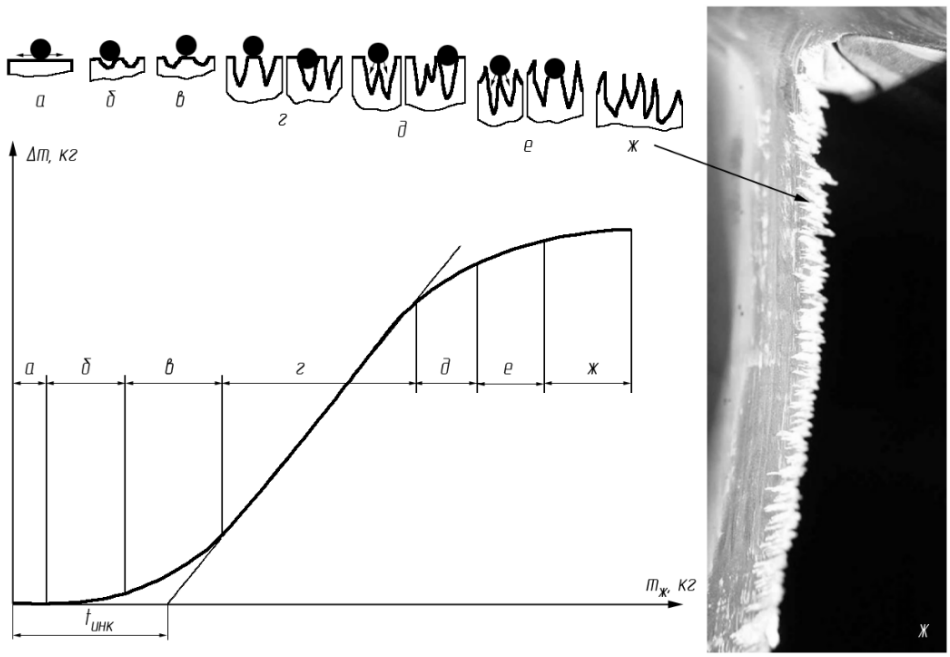
$c_ж$ – скорость звука в воде, м/с;

$\rho_п$ – плотность материала поверхности, кг/м^3;

$c_п$ – скорость распространения упругих волн в материале поверхности, м/с;

$w_н$ – скорость нормального удара капли по поверхности, м/с.

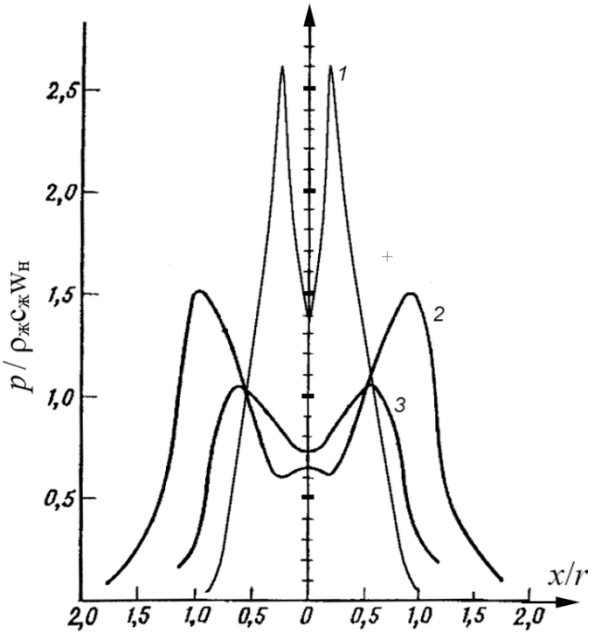
В результате множественных ударов в материале поверхности возникают упругие волны деформаций, взаимодействующие между собой в объеме детали и материале поверхности. По прошествии некоторого времени, называемого «инкубационным периодом» ($t_{инк}$), в материале накапливаются усталостные дефекты в виде поверхностных микротрещин различного направления и размера (сопоставимого с размерами капель). На следующей стадии, называемой «ускоренным износом», усталостные дефекты, объединяясь, приводят к локальному выкрошиванию материала, появлению характерного «горного» поверхностного рельефа (Рисунки 2.21 б, 2.21 в, 2.21 г). Формирующийся рельеф в виде зубьев способен разбивать отдельные капли и удерживать на поверхности водяную пленку так, что ударная нагрузка на материал лопатки снижается и, соответственно, уменьшается скорость эрозии (Рисунки 2.21 д, 2.21 е, 2.21 ж).



а…*ж* – стадии формирования износа; *з* – вид эрозионно-изношенной входной кромки рабочей лопатки паровой турбины из титанового сплава после 21 тыс. часов наработки

Рисунок 2.21 – Схема формирования «горного» рельефа изнашиваемой поверхности [211]

Ударное взаимодействие капли воды и твердой поверхности принято рассматривать с позиции квазистатического давления на плоскость водяной капли в течение короткого периода времени и волнового воздействия, вызванного этим ударным давлением [31, 211]. Начальный момент контакта капли с поверхностью может быть описан с помощью классической теории механического удара [208, 209]. В точке контакта возникает начальное давление $p_0 = 1{,}5p$, затем образуется ударная волна, действующая по периметру расширяющегося пятна контакта, капли и поверхности. В центре удара давление постепенно падает, увеличиваясь по периметру до максимальной величины, достигающей $p_{max} = 2{,}6p$ (Рисунок 2.22).



1 – экспериментальные данные ИПМ СССР и МАИ удара сферической капели диаметром $2r = 3$ мм со скоростью $w_н = 300$ м/с [211]; *2* – экспериментальные данные удара капель диаметром $2r = 5$ мм со скоростью $w_н = 100$ м/с [211]; *3* – расчет методом конечных элементов удара сферической капли со скоростью $w_н = 300$ м/с [213]

Обозначение переменных приведено в тексте

Рисунок 2.22 – Эпюры напряжений в области удара капли по плоской поверхности

Такое повышение давления объясняется следующим образом. В начальный момент времени удара в капле и поверхности материала возникают упругие волны. Поверхностный слой материала под каплей находится в условиях всестороннего сжатия при минимальных деформациях. В этот момент возникшая в капле волна гидроудара деформирует ее, и капля начинает растекаться, опережая упругую волну в материале поверхности. Через некоторое время упругая

волна в поверхности достигает периметр растекающейся капли. В этот момент давление гидроудара в жидкости и величина упругой волны в поверхности складывается и по периметру контакта возникает повышенное давление. После отрыва упругой волны от границы контакта ее давление уменьшается. Вследствие уменьшения давления по периметру капли возникают поверхностные волны, известные как волны Релея или *R*-волны, представляющие собой комбинацию продольных и поперечных волн. Соотношение скоростей *R*-волны в нормальном (C_R) и тангенциальном (C_t) направлениях описывается уравнением [214]:

$$C_R = \left(\frac{0{,}87+1{,}12\nu}{1+\nu}\right)\sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \approx 0{,}93C_t, \text{ м/с} \qquad (2.12)$$

где ν – коэффициент Пуассона;

E – модуль Юнга, Па;

ρ – плотность среды, кг/м^3.

Максимальные напряжения, возникающие на фронте *R*-волны после ее отрыва от границы контакта, по оценке [211] равны $\sigma_R = 0{,}75p$ (МПа). Вторая фаза *R*-волны имеет ту же величину амплитуды напряжений, но с обратным знаком. Таким образом, формируется амплитуда Релеевских волн, распространяющихся воль поверхности и уменьшающихся по глубине с квадратом расстояния. Общепринято считать, что на глубине порядка длины волны амплитуда *R*-волны затухает.

Возникновение волн в результате множественных ударов капель по поверхности сопровождается сложным динамическим напряженным состоянием, приводящим к необратимым повреждениям материала, в том числе за границами каплеударного воздействия. Особенностью распространения упругих волн в поверхности с нанесенным покрытием является сложность описания напряженно-деформационной картины, возникающей при прохождении продольных и поперечных волн через границы сред различных материалов. Так, при прохождении упругой волны через многослойное покрытие на каждой границе между соседними слоями в общем случае возникает четыре новые волны: две преломленные (продольная и поперечная) и две отраженные. При прохождении очередного слоя, достигая следующей границы, каждая из волн в свою очередь разделится еще на четыре волны, но с меньшей амплитудой. Процесс отражения и преломления волн на каждой границе слоя может повторяться многократно до их полного затухания.

При решении задач отражения и преломления волн при прохождении слоистых материалов последние условно подразделяют на толстые и тонкие [214, 217]. Если отношение толщины слоя *h* к длине волны λ, распространяющейся этого слоя, меньше двух ($h < 2\lambda$), то слой считается

условно «тонким», а в противоположном случае – «толстым». В толстом слое падение и отражение упругих волн от границ слоя рассматривают аналогично прохождению волны через границу двух изотропных полупространств. При известных допущениях эта задача достаточно хорошо описана в работах, посвященных теории упругих колебаний в твердых средах. В случае нанесения на поверхность многослойных ионно-плазменных покрытий с толщиной отдельных слоев от 1 до 10 мкм, волновая картина значительно усложняется. Это связано с тем, что падающие, преломленные и отраженные волны складываются в различных фазах, создавая сложную интерференционную картину, которая с учетом анизотропии свойств и наследованной от подложки шероховатости является в большой степени случайной. В связи с этим, для решения задачи конструирования многослойных эрозионностойких ионно-плазменных покрытий, подробно остановимся на рассмотрении процессов рассеяния и затухания упругих волн, возникающих и распространяющиеся в поверхности рабочих лопаток последних ступеней паровых турбин.

2.3.1 Рассеяние плоских волн при прохождении многослойных покрытий

При распространении упругих волн в любой физической среде наблюдается их ослабление и затухание, выражаемое в постепенном уменьшении амплитуды. На скорость затухания упругих волн главным образом влияют:

а) вязкость среды распространения;

б) способность материала покрытия поглощать энергию упругих волн, т.е. необратимо превращать механическую энергию в тепловую;

в) процессы рассеяние волновой энергии на элементах микроструктуры;

г) отражение волны от границ различных сред и другие.

Все эти факторы могут быть эффективно использованы при разработке специальной конструкции ионно-плазменных многослойных покрытий с целью защиты рабочих лопаток паровых турбин от каплеударной эрозии. На основе общей теории колебаний и волн [215, 216] рассмотрим закономерности прохождения упругих механических волн через многослойные покрытия.

Поверхностные волны (волны Релея), распространяясь в поверхностном слое толщиной порядка длины волны, претерпевают постепенное ослабление и затухание по экспоненциальному закону:

$$A(\mathrm{x}) = A_0 \mathrm{e}^{-\delta \mathrm{x}}, \qquad (2.13)$$

где $A(\mathrm{x})$ – амплитуда на расстоянии x от точки возникновения волны с амплитудой A_0;

δ – декремент затухания, который можно представить в виде суммы:

$$\delta = \delta_п + \delta_р \text{ , м}^{-1} \quad (2.14)$$

где $\delta_п$ – коэффициент поглощения, м$^{-1}$;

$\delta_р$ – коэффициент рассеяния, м$^{-1}$.

Физический смысл декремента затухания заключается в том, что величина $1/\delta$ – это расстояние, на котором амплитуда волны уменьшается в *e* раз. При этом процессы затухания связаны с переходом части механической энергии волны в другие виды энергии, в основном в тепловую и внутреннюю энергию структурных элементов материала. В результате рассеяния происходит перераспределение механической энергии в среде в результате многократных отражений и преломлений, например, на границе среды, что проявляется в виде уменьшения первоначальной величины амплитуды.

Многослойные покрытия могут рассматриваться, как поликристаллические тела с регулярной повторяющейся структурой, характеризующиеся различным количеством и толщиной чередующихся слоев. При прохождении границы слоев волна испытывает частичное отражение и преломление. В результате этого происходит изменение ее направления, уменьшение величины амплитуды и, в конечном итоге, рассеяние. В общем виде долю рассеянной упругой энергии можно представить в виде суммы:

$$\delta_p = \delta_д + \delta_\eta + \delta_{расс}, \text{ м}^{-1} \quad (2.15)$$

где $\delta_д$ – коэффициент ослабления в результате дифракционного расхождения фронта волны (в металлическом теле можно принять: $\delta_д$ = 0,11 м$^{-1}$ – для продольной и $\delta_д$ = 0,89 м$^{-1}$ – для поперечной компоненты волны [217]);

δ_η – коэффициент, зависящий от вязкости η и плотности ρ среды:

$$\delta_\eta = \frac{16\pi^2\eta}{3u\rho\lambda^2}, \text{ м}^{-1} \quad (2.16)$$

где $\delta_{расс}$ – коэффициент рассеяния, зависящий от отношения длины волны к среднему размеру структурного элемента *D* следующим образом [218]:

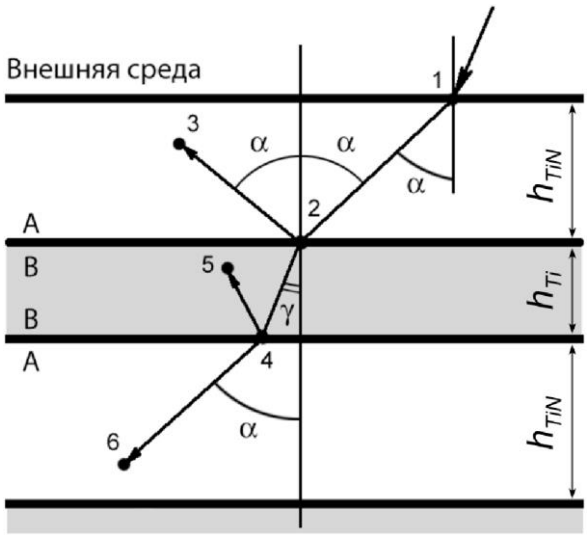
$$\delta_{расс} = \begin{cases} \delta_1 \overline{D^3} f^4 & \lambda \gg \overline{D} - \text{ релеевское рассеяние;} \\ \delta_2 \overline{D} f^2 & \lambda \sim \overline{D} - \text{стохастическое рассеяние;} \\ \delta_3 / \overline{D} & \lambda \ll \overline{D} - \text{диффузное рассеяние.} \end{cases} \quad (2.17)$$

где δ_1, δ_2, δ_3 – структурно чувствительные коэффициенты, $м^{-1}$;

f – частота волны, Гц;

λ – длина волны, м.

Рассмотрим прохождение упругой гармонической волны с амплитудой A_0 через границу двух сред: A и B (Рисунок 2.23). Из общей теории колебаний и волн известно, что если из некоторой среды A нормально к границе раздела падает продольная плоская волна, то часть ее энергии проходит во вторую среду B также в виде плоской волны, а часть отражается от границы раздела и идет в обратную сторону. При этом в соответствии с принципом сплошности на границе двух сред будет выполнятся условие непрерывности скорости и давления волны, которая будет переходить из одной среды в другую без изменения этих параметров.



Обозначения приведены в тексте

Рисунок 2.23 – Схема прохождения упругой волны через многослойное покрытие

Таким образом, при движении упругой продольной волны под углом падения α из среды A (нитридный слой покрытия толщиной h_{TiN}) через среду B (титановый слой покрытия толщиной h_{Ti}) на границах титанового слоя возникают отраженные и преломленные волны (Рисунок 2.23). Выполнение условий непрерывности давления и скорости волн на границах этого слоя дает возможность составить четыре уравнения для определения относительных потенциалов скоростей:

1 волна (2-3), отраженная от границы сред A-B;

2 волна (2-4), преломленная в среде B;

3 волна (4-5), отраженная в среде B;

4 преломленная волна (4-6), выходящая из среды B в среду A.

Давления и нормальные компоненты скорости быть одинаковы с обеих сторон на каждой границе, поэтому граничные условия можно записать через потенциалы скоростей, соответственно Φ_A и Φ_B, действующие по обе стороны от границы *A*-*B*:

$$\begin{cases} \rho_A \left.\frac{\partial \Phi_A}{\partial t}\right|_{x=0} = \rho_B \left.\frac{\partial \Phi_B}{\partial t}\right|_{x=0} \\ \left.\frac{\partial \Phi_A}{\partial x}\right|_{x=0} = \left.\frac{\partial \Phi_B}{\partial x}\right|_{x=0} \end{cases}; \quad (2.18)$$

$$\begin{cases} \Phi_A = A_a e^{j(\omega t - a_a x + b_a y)} + A_a e^{j(\omega t + a_a x + b_a y)} \\ \Phi_B = A_b e^{j(\omega t - a_b x + b_b y)} + A_b e^{j(\omega t + a_b x + b_b y)} \end{cases}; \quad (2.19)$$

где $a_a = k\cos\alpha$; $a_b = k\cos\gamma$; $b_a = k\sin\alpha$; $b_b = k\sin\gamma$; $k = \omega/c$ – коэффициенты уравнения гармонической волны в соответствующих средах [215, 217];

ω – циклическая частота, $с^{-1}$;

c – скорость волны в изотропной среде, м/с:

$$c = \sqrt{E/\rho}, \text{ м/с} \quad (2.20)$$

где E – модуль Юнга, Па;

ρ – плотность среды, $кг/м^3$.

Решая эти уравнения, можно найти коэффициент проникновения (β_{ab}) волны через границу слоев *A*-*B*, как отношение ее амплитуд A_b/A_a в слоях *B* и *A* соответственно:

$$\beta_{ab} = \frac{A_b}{A_a} = \frac{2}{\sqrt{4cos^2(a_b h_b) + (\delta^{-1} + \delta)^2 sin^2(a_b h_b)}}, \quad (2.21)$$

где ρ – плотность среды, $кг/м^3$;

R – волновое сопротивление (импеданс) среды, $Нс/м^3$:

$$R = \rho c, \text{ Нс/м}^3 \quad (2.22)$$

где δ – коэффициент:

$$\delta = \frac{a_a \rho_b}{a_b \rho_a} = \frac{R_b cos\alpha}{R_a cos\gamma} \quad (2.23)$$

где α, γ – углы преломления волны в различных средах в соответствии с Рисунком 2.23.

Зная условия ударного воздействия капель влаги на поверхность и рассчитав коэффициенты проникновения (β_p) для каждого слоя покрытия, по аналогии со звуковым давлением можно определить коэффициент изоляции многослойного покрытия, характеризующий способность рассеивать механическую энергию упругой волны:

$$D = C \lg(A_0/A), \tag{2.24}$$

где C – константа, условно принимаемая равной 20 дБ;

A_0 – начальная амплитуда давления на поверхности, МПа;

A – амплитуда давления после прохождения покрытия, МПа:

$$A = A_0 \Pi_{i=1,n}(\beta_p)_i \tag{2.25}$$

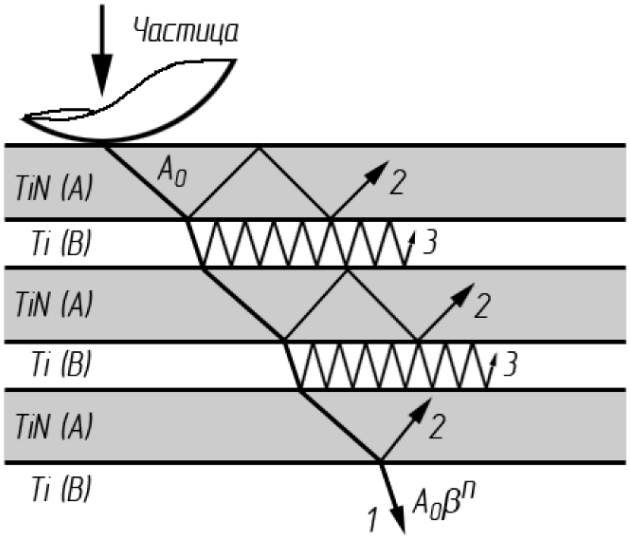
где n – количество слоев;

$(\beta_p)_i$ – коэффициент проникновения i-го слоя.

Окончательно получаем формулу для расчета коэффициента изоляции многослойного покрытия:

$$D = 20\lg (\Pi_{i=1,n}(\beta_p)_i)^{-1} \text{ дБ} . \tag{2.26}$$

Анализ выражений (2.24) и (2.26) показывает, что при переходе упругой волны из более плотных нитридных (A) в менее плотные титановые слои (B), полного внутреннего отражения не происходит даже при углах падения больших критического. Волны в среде B, бегущие параллельно границе слоя A-B (Рисунки 2.23, 2.24), на второй границе этого слоя (B-A) будут также иметь некоторую интенсивность, величина которой при толщинах h, сопоставимых с длиной волны λ, может достигать достаточно больших значений. Таким образом, вдоль второй границы (B-A) будут двигаться волны сжатия и разрежения, что неизбежно вызовет возмущения в следующем, нижележащем, нитридном слое и приведет к возникновению проходящей волны (4-6) в следующий слой A.



Поверхностные волны: *1* – первичная; *2*, *3* – вторичные

Обозначение переменных приведено в тексте

Рисунок 2.24 – Схема рассеивания поверхностных волн в многослойном покрытии

Отраженные волны, распространяются внутри слоя в обратном направлении, и, достигнув противоположной границы, взаимодействуют с волной соседнего слоя (Рисунок 2.24). При этом в области взаимодействия волн они могут, как усиливать (при совпадении фаз давлений), так и ослаблять друг друга. Рассмотрим условия, при которых вторичные отраженные волны будут взаимно ослабляться и таким образом рассеиваться.

2.3.2 Рассеяние вторичных отраженных волн на границах слоев в многослойных покрытиях

Если на поверхности твердого тела имеется две или более границы слоев покрытия, то в материале может возникать специфическая волновая картина, как результат появления и взаимодействия вторичных отраженных волн, распространяющихся вдоль слоев. В теории звука такие волны известны как волны Лэмба [215, 218, 219]. Эти волны являются поверхностными нормальными волнами, которые в плоскости распространения совершают сложные колебательные движения: «*бегущие*» вдоль границы сред и «*стоящие*» в перпендикулярном направлении к поверхности. Рассмотрим пример прохождения плоской волны через границу двух сред в многослойном покрытии. Волна имеет начало в области удара на поверхности и распространяется под углом к границе раздела (Рисунок 2.25).

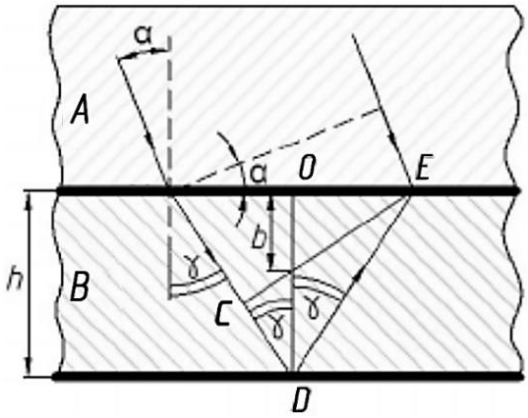
Из среды А под углом падения α к поверхности слоя толщиной *h* (среда *B*), падает плоская волна. Скорости волн в средах соответственно равны c_A и c_B. В случае, когда на пути *CDE* будет укладываться целое число волн, т.е. разность фаз на этом участке будет кратна 2π, в точку *E* падающая и отраженная волна придут в фазе и произойдет их усиление или резонанс. Угол, при котором будет наблюдаться явление резонанса находится из выражения, соответствующего условию образования волн Лэмба:

$$h \cdot \cos\gamma = n \cdot \lambda/2, \text{ м} \qquad (2.27)$$

где n – целое число;

λ – длина волны в слое, м;

γ – угол преломления волны (Рисунок 2.25).



Обозначения переменных приведено в тексте

Рисунок 2.25 – Схема прохождения плоской волной раздела двух сред

Необходимо отметить, что в твердых телах из-за действия сдвиговой упругости материала, явление резонанса при взаимодействии поверхностных волн не наблюдается. Тем не менее, многослойные покрытия могут быть использованы для обеспечения эффективности рассеяния энергии упругих волн и снижения вызванного ими напряженного состояния материала. Для этого необходимо подбирать такое сочетание толщины *h`* и упругих свойств материала промежуточных слоев, которое обеспечит взаимное смещение фаз падающих и отраженных волн на величину 3/4 длины волны. С учетом того, что при отражении волны от более плотной среды ее амплитуда меняет знак, такая величина фазового сдвига обеспечивает максимальное взаимное рассеивание отраженных волн при их прохождении через границы сред. Из уравнения (2.17) следует:

$$h` = \frac{3}{4} n \frac{\lambda}{2cos\gamma}, \text{ м} \quad (2.28)$$

где, сделав подстановку:

$$cos\gamma = \sqrt{1 - sin^2\gamma};\ \sin\gamma = sin\,\alpha \frac{c_b}{c_a} = sin\,\alpha_0 \frac{c_a}{c_ж} \frac{c_b}{c_a} = sin\,\alpha_0 \sqrt{\frac{E_b}{\rho_b c_ж^2}}; \quad (2.29)$$

окончательно получаем:

$$h` = n \frac{0{,}38\lambda}{\sqrt{1 - sin^2\,\alpha_0 \frac{E_b}{\rho_b c_ж^2}}}, \text{ м} \quad (2.30)$$

где α_0 – угол падения капли;

$c_{ж}$ – скорость звука в воде, м/с.

Максимальное рассеивание вторичных волн при их прохождении через многослойное покрытие будет наблюдаться при условии кратности толщин слоев коэффициенту n, найденному из уравнения (2.27). Отсюда можно определить следующее требование к соотношению толщин этих слоев:

$$h_{TiN} = n \cdot h_{Ti,} \text{ м} \quad (2.31)$$

где h_{Ti} – толщина титановых слоев, м;

h_{TiN} – толщина нитридных слоев, м.

2.3.3 Численное моделирование рассеивания упругих волн в многослойных покрытиях

Рассчитаем эффективность рассеяния упругих волн многослойными ионно-плазменными покрытиями при ударе по их поверхности единичной капли воды при различных условиях ударного взаимодействия (Таблица 2.3). При выборе конструкции многослойных покрытий изменяемыми параметрами являлись толщина (h_{TiN}) и количество нитридных слоев. Толщину промежуточных титановых слоев рассчитывали из условия максимального рассеивания вторичных волн, по формулам (2.30) и (2.31).

Минимальную толщину нитридных слоев определим из условия прочности для указанных в Таблице 2.3. условий каплеударного воздействия. Максимальные напряжения сжатия (p_{max}) в соответствии с данными, приведенными на Рисунке 2.22, примем равными:

$$p_{max} = 2{,}6p, \text{ Па}, \tag{2.32}$$

где p – средняя величина давления единичного удара капли (формула 2.11), Па.

Таблица 2.3 – Условия каплеударного воздействия на рабочие лопатки последних ступеней паровых турбин

Тип турбины	Расчетный диаметр капли, D_k, мм	Максимальная скорость удара капли, $w_н$, м/с	Примечание
К-1200-6,8/50 АЭС «Руппур» К-1000-60/3000 АЭС «Бушер» К-800-130/3000 АЭС «Белоярская»	1,00	600	Предельные значения [4]
К-255-162 ТЭС «Альхольма»	0,82	250	Испытания по методике МЭИ
К-300-240 Т-100-130	0,30	400	Испытания по методике МЭИ

Примечание – Угол падения при расчетах принимали в диапазоне 0±10˚, что соответствует максимальному ударному воздействию капель [4, 220]

Максимальные напряжения растяжения, возникающие на фронте R-волны после ее отрыва от границы контакта, по оценке [211] равны $\sigma_R = 0{,}75p$, МПа. Таким образом, подставляя $w_н$ из Таблицы 2.3 в формулу (2.11), найдем, что внешний нитридный слой покрытия должен выдерживать максимальные напряжения сжатия (p_{max}) от минус 980 до минус 2300 МПа не разрушаясь.

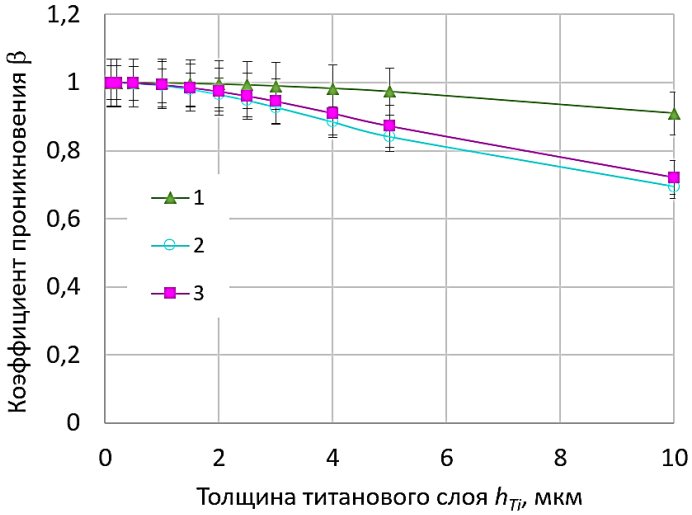
Рассматривая ударное воздействие капли воды с точки зрения квазистатического удара с известным эквивалентной нагрузкой и принимая во внимание распределение напряжений в многослойных покрытиях с нитридными и титановыми слоями различной толщины (эпюры, приведенные в пункте 2.4) примем для исследований минимальную толщину нитридного слоя $h_{TiN} = 1$ мкм. При меньшей толщине h_{TiN} поверхностный нитридный слой будет деформироваться таким образом, что внешняя нагрузка почти полностью будет передаваться в нижележащие слои и ини-

циировать на их границах значительные напряжения сдвига, снижающие адгезионную и когезионную прочность слоев покрытия. Физико-механические свойства, принятые при расчете параметров каплеударного взаимодействия, указаны в Таблице 2.4.

Зависимости коэффициентов проводимости для нитридных и титановых слоев различной толщины, рассчитанные по формуле (2.13), приведены на Рисунках 2.26-2.29. Анализ полученных зависимостей позволяет заключить, что характер преломления упругих волн, проходящих через нитридные и титановые слои многослойного покрытия, имеет принципиальные отличия. Установлено, что при всех исследованных вариантах ударного взаимодействия (Таблица 2.3) упругие волны, проходя через промежуточные титановые слои, практически не отражаются от них. Об этом свидетельствует величина коэффициента $\beta=0{,}95\pm0{,}05$ для толщин h_{Ti} от 0,1 до 2 мкм во всем исследованным диапазоне углов падения капель ($\pm10^{o}$). В первую очередь это связано с их сравнительно небольшой толщиной и величиной волнового сопротивления R_{Ti} (Таблица 2.4 и формула (2.22)). Более эффективное рассеивание упругих волн можно добиться увеличением толщины титанового слоя до 20 мкм, при этом коэффициент проникновения β уменьшается примерно в 1,3 раза, от 0,95 до 0,7 (Рисунок 2.26).

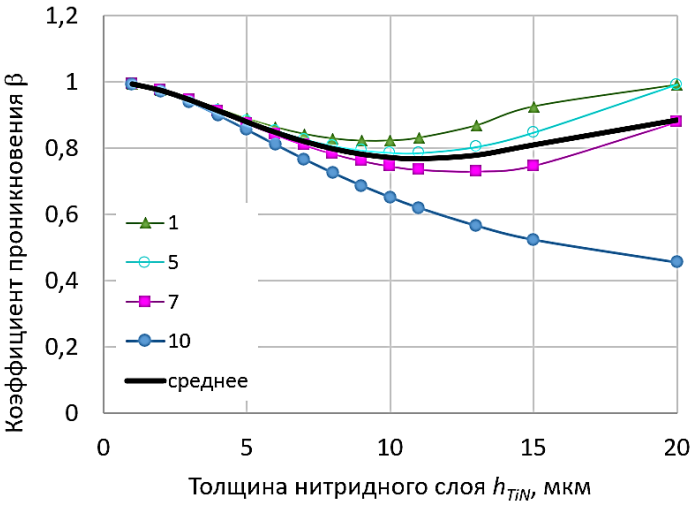
Таблица 2.4 – Физико-механические свойства, принятые при расчете параметров каплеударного взаимодействия

Характеристика	Величина
Модуль Юнга нитрида титана	$3{,}50\cdot10^{11}$ Па
Модуль Юнга титана	$1{,}15\cdot10^{11}$ Па
Плотность капли воды	$1{,}00\cdot10^{3}$ кг/м^3
Плотность нитрида титана	$5{,}44\cdot10^{3}$ кг/м^3
Плотность титана	$4{,}54\cdot10^{3}$ кг/м^3
Скорость звука на воздухе	340 м/с
Скорость звука в воде	1482 м/с
Скорость гидроудара	2271 м/с
Скорость звука в нитриде титане	8021 м/с
Скорость звука в титане	5033 м/с
Волновое сопротивление нитрида титана (R_{TiN})	$4{,}36\cdot10^{7}$ Нс/м^3
Волновое сопротивление титана (R_{Ti})	$2{,}28\cdot10^{7}$ Нс/м^3



Типы турбин: *1* – К-1200, К-1000, К-800; *2* – К-255-162; *3* – К-300-240 и Т-100-130. Отклонения учитывают различные углы падения капли от 1° до 10°

Рисунок 2.26 – Коэффициенты проникновения титановых слоев многослойных покрытий рабочих лопаток последних ступеней различных типов паровых турбин

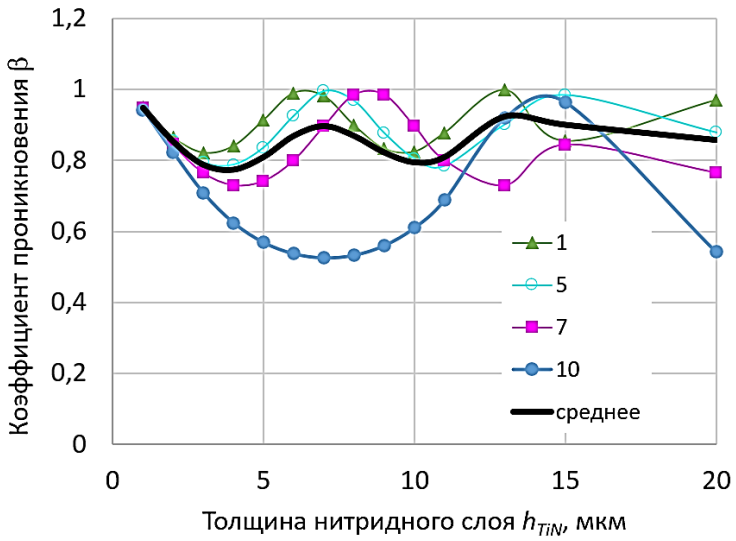


1, 5, 7, 10 – углы падения капли в диапазоне от 1° до 10°

Рисунок 2.27 – Коэффициенты проникновения нитридных слоев многослойных покрытий лопаток последних ступеней паровых турбин типа К-1200, К-1000 и К-800

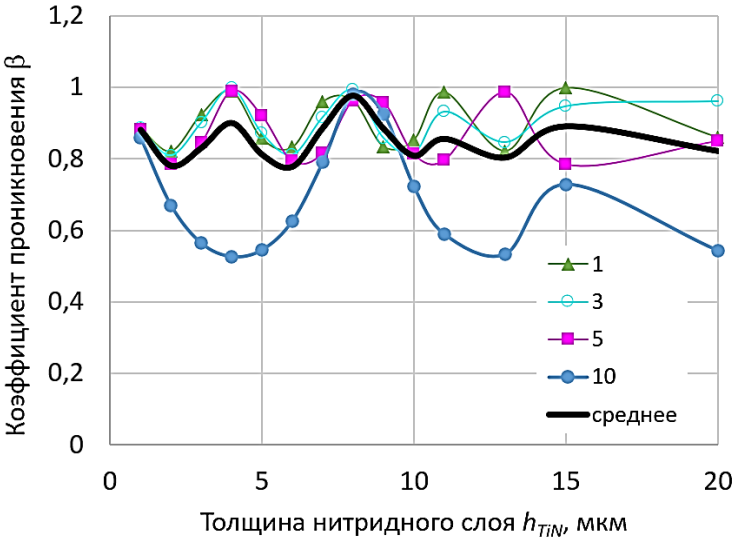
Отличительной особенностью прохождении упругой волны через более плотные нитридные слои, характеризующиеся сравнительно большим волновым сопротивлением R_{TiN}, является циклическая закономерность изменения коэффициента β от их толщины h_{TiN}. Установлено, что с увеличением толщины нитридного слоя от 1 до 20 мкм коэффициент проникновения β может

иметь от 1 до 4 минимумов, как это видно на Рисунках 2.27-2.29, при этом их количество увеличивается с уменьшением радиуса капли.



1, 5, 7, 10 – углы падения капли в диапазоне от 1° до 10°

Рисунок 2.28 – Коэффициенты проникновения нитридных слоев многослойных покрытий лопаток последних ступеней паровых турбин типа К-255-162



1, 5, 7, 10 – углы падения капли в диапазоне от 1° до 10°

Рисунок 2.29 – Коэффициенты проникновения нитридных слоев многослойных покрытий лопаток последних ступеней паровых турбин типа К-300-240 и Т-100-130

Такая закономерность объясняется различным количеством полуволн, укладывающихся в длину пути через слой, который увеличивается с ростом угла падения капли. С увеличением угла падения от 0^o до 10^o, увеличивается и угол преломления в слое, т.е. увеличивается его отражающая способность, что проявляется на графиках в виде минимумов коэффициента проникновения до $\beta = 0{,}5 \pm 0{,}05$ (Рисунки 2.27-2.29). При этих условиях до 50% амплитуды упругой волны при прохождении нитридного слоя будет рассеиваться. При разработке конструкции многослойного покрытия необходимо учитывать, что угол падения капель при различных режимах работы турбины является случайной величиной. В этой связи для каждого из условий каплеударной эрозии (Таблица 2.3) выделим те толщины нитридных слоев, которые обеспечивают локальные минимумы коэффициента проникновения β во всем исследуемом диапазоне углов падения, от 0^o до 10^o. На графиках (Рисунки 2.27-2.29) эти локальные минимумы β показаны вертикальными линиями. Таким образом получаем набор оптимальных толщин нитридных покрытий, обеспечивающих минимальный коэффициент проникновения $\beta=0{,}8\pm0{,}05$ для многослойных покрытий Ti+TiN, нанесенных на рабочие лопатки последних ступеней паровых турбин:

а) h_{TiN} = 11 мкм – для турбин: К-1200, К-1000, К-800 (Рисунок 2.27);

б) h_{TiN} = 4; 10 мкм – для турбины К-255-162 (Рисунок 2.28);

в) h_{TiN} = 2; 7; 10; 13 мкм – для турбин: К-300-240, Т-100-130 (Рисунок 2.29).

Оптимальную толщину титановых слоев определяли из условия максимального рассеивания вторичных волн по Формуле (2.31). Полученные таким образом варианты многослойных покрытий общей толщиной до 25 мкм приведены в Таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Варианты многослойных покрытий для защиты от каплеударной эрозии

Вариант покрытия	Общая толщина покрытия *h*, мкм	Коэфф-т проникновения покрытия всех слоев покрытия Пβi	Коэфф-т изоляции покрытия D, дБ	Тип турбин
1	*2*	*3*	*4*	*5*
1 0,5Ti+10TiN	10,5	0,76	2,4	К-255, К-300, К-800, К-1000, К-1200, Т-100-130
2 (0,5Ti+10TiN)x2	21,0	0,58	4,7	
3 (0,3Ti+4TiN)x2	8,6	0,58	4,7	К-255-162
4 (0,3Ti+4TiN)x5	21,5	0,26	11,8	

Окончание таблицы 2.5

1	*2*	*3*	*4*	*5*
5 (0,2Ti+2TiN)x5	11,0	0,27	11,2	К-300-240, Т-100-130
6 (0,2Ti+2TiN)x10	22,0	0,08	22,5	
7 0,2Ti+2TiN+0,4Ti+7TiN	9,6	0,67	3,4	
8 (0,4Ti+7TiN)x3	22,2	0,66	3,6	
9 (0,2Ti+2TiN)x3+ +(0,4Ti+7TiN)x2	21,4	0,35	9,1	
10 0,6Ti+7TiN+0,4Ti+13TiN	21,0	0,69	3,2	

Эффективность рассеивания упругих волн по всей толщине покрытия оценим по величине коэффициента изоляции *D* (Формула 2.26). Результаты расчетов, показывающие на сколько эффективно исследуемые многослойные покрытия рассеивают упругие ударные волны, показан на Рисунке 2.30. Оптимальным покрытием по критерию максимальной изоляции является двадцатислойное покрытие (0,2Ti-2TiN)x10, которое обеспечивает почти полное рассеяние упругой волны, до 92% от первоначальной амплитуды (Пβi = 0,08), и может быть рекомендовано для защиты рабочих лопаток последних ступеней паровых турбин типа К-300-240, Т-100-130. Наиболее универсальным по условиям эксплуатации большинства рассмотренных типов турбин является двуслойное покрытие (0,5Ti-10TiN)x2, состоящее из титанового слоя толщиной 0,5 мкм и нитридного слоя толщиной 10 мкм.

Варианты покрытий приведены в Таблице 2.5

Рисунок 2.30 – Коэффициенты изоляции упругой волны различных вариантов многослойных покрытий на основе нитрида титана Ti+TiN

Установленные закономерности позволяют для заданных условий каплеударного воздействия рассчитать оптимальные толщины слоев многослойного покрытия (по критерию минимального коэффициента проникновения β каждого слоя) и подобрать материал с заданными физико-механическими свойствами (плотность, модуль упругости, внутренние остаточные напряжения), обеспечивающие минимальное механическое воздействие ударной волны и, как результат, повысить долговечность рабочих лопаток паровых турбин. Результаты экспериментальных исследований образцов с многослойными эрозионно-стойкими покрытиями, подтверждающих сделанные теоретические выводы, приведены в п. 5.2, глава 5.

2.4 Теоретическое исследование многослойных покрытий при газоабразивном износе

Процесс газоабразивного изнашивания лопаток паровых и газовых турбин, как и рассмотренный выше процесс каплеударной эрозии, характеризуется циклически повторяющимся многократным ударом материальных частиц, присутствующих в рабочей среде, о рабочие поверхности детали. Особенностью процесса газоабразивного изнашивания является многократно повторяющееся кратковременное механическое воздействие твердыми частицами незначительной массы (масса абразивных частиц – менее $5 \cdot 10^{-3}$ г, для сравнения, масса водяных капель – менее 2 г). Скорость абразивного потока при работе газовых и паровых турбин может достигать значений порядка 100 м/с. Длительность такого взаимодействия, как правило, не превышает 10^{-4} ... 10^{-6} с. За это время нагрузка в точке удара может значительно превышать предел текучести материала из-за ограниченных во времени процессов пластической деформации. В результате удара в материале поверхности возникают неуравновешенные области механических напряжений, сопровождающиеся упругими колебаниями, абразивным воздействием (царапанием), пластическими деформациями, накоплением усталостных повреждений и локальным нагревом.

При рассмотрении упругопластического удара принято различать две фазы взаимодействия твердых тел [209, 216, 221]. Первая фаза – сближение контактирующих тел после их соприкосновения, когда кинетическая энергия удара частично переходит в потенциальную энергию упругой деформации. Вторая фаза, когда запасенная упругая энергия переходит в кинетическую энергию отскока ударяющей частицы.

Наиболее проработанной и широко применяемой на практике является контактная теория Г. Герца [208, 209, 223], которая предполагает, что деформация за время удара изменяется линейно и в точке контакта не возникает остаточных деформаций. В случае возникновения пластических деформаций, для описания вязкоупругого ударного деформирования применяют обобщенную модель Герца-Ханта-Кросли [222, 223].

Возникающие при ударе механические напряжения распространяются в теле в виде упругих волн со скоростью, зависящей от физических свойств материала. Если время удара много больше времени затухания этих волн, то влиянием упругих колебаний можно пренебречь и рассматривать удар как квазистатический [208]. В случае, если временем прохождения упругих волн через тело пренебречь нельзя, то пользуются волновой теорией удара Сен-Венана [209, 216, 221, 224].

На основании вышесказанного рассмотрим напряженно-деформированное состояние, возникающее в упругопластическом материале поверхности, при ударе единичной жесткой сферической частицы с известным размером и начальным вектором скорости. Применительно к газоабразивному изнашиванию материала поверхности с нанесенным многослойным защитным покрытием введем следующие допущения:

1) результирующие механические напряжения σ_{res}, возникающие в некоторой точке поверхности можно представить в виде суммы:

$$\sigma_{res} = \sigma_{вн} + \sigma_{ст} + \sigma_{дин}, \text{ МПа}, \tag{2.33}$$

где $\sigma_{вн}$ – внутренние остаточные напряжения, МПа;

$\sigma_{ст}$ – напряжения, соответствующие квазистатическому контакту, МПа;

$\sigma_{дин}$ – динамические напряжения, соответствующие волновому воздействию, МПа;

2) шероховатость и коэффициент трения контактирующих поверхностей не оказывает значительного влияния на их взаимодействие;

3) абразивные частицы и материал покрытия являются твердыми телами, имеющими некоторый предел упругой деформации, выше которого наступает хрупкое разрушение.

Принятые допущения позволяют применить для анализа напряженного состояния материала поверхности теорию Герца [208]. Удар частицы при этом рассматривается, как квазистатическое упругое взаимодействие с эквивалентной нормальной силой:

$$F_n = \frac{4}{3} R^{1/2} E^* d^{3/2}, \text{ Н}; \tag{2.34}$$

$$1/E^* = (1-\nu_p^2)/E_p + (1-\nu_s^2)/E_s, \text{ МПа}^{-1}, \tag{2.35}$$

где R – радиус абразивной частицы, мм;

E^* – эквивалентный модуль упругости, МПа;

E – модуль Юнга, МПа;

ν – коэффициент Пуассона (*p, s* – индексы, относящиеся соответственно к материалу частицы и поверхности);

d – величина сближения контактных поверхностей в момент их максимальной деформации, мм:

$$d = \left(\frac{15}{16} \frac{m V_n^2}{R^{1/2} E^*} \right)^{2/5}, \text{ мм}, \tag{2.36}$$

где *m* – масса абразивной частицы, кг;

V_n – ее скорость по нормали к поверхности, м/с.

В момент максимального сближения радиус круговой площадки контакта будет равен: $a = \sqrt{d \cdot R}$, при этом максимальное нормальное давление, действующее в центральной точке контакта, может быть рассчитано по формуле [208]:

$$p_{\max} = \frac{3}{2} \frac{F_n}{\pi a^2} = \frac{1}{\pi} \left(30 \frac{m}{R^3} V_n^2 E^{*4} \right)^{1/5}, \text{ МПа} \tag{2.37}$$

Выражая массу частицы через ее плотность: $m = \rho \frac{4}{3} \pi R^3$ и подставляя в формулу (2.37), получим более удобную зависимость:

$$p_{\max} = \left(40 \rho V_n^2 \left(\frac{E^*}{\pi} \right)^4 \right)^{1/5}, \text{ МПа} \tag{2.38}$$

Полное время взаимодействия ударяемой частицы с поверхностью при принятых допущениях составит [208]:

$$t_в = 2{,}94 \frac{d}{V_n}, \text{ с.} \tag{2.39}$$

Время прохождения продольных упругих волн через покрытие можно определить из отношения:

$$t_{\parallel} = h / V_{\parallel} = h \sqrt{\frac{\rho}{E}}, \text{ с}, \tag{2.40}$$

где h – толщина покрытия, м;

E – модуль Юнга, Па;

ρ – плотность материала кг/м^3.

Рассчитаем по формулам (2.34) - (2.40) ударное воздействие твердых абразивных частиц на поверхность рабочих лопаток газовых и паровых турбин из титановых сплавов с нанесенным многослойным ионно-плазменным покрытием.

Параметры ударного взаимодействия, материал и размеры частиц, воздействующих на поверхность, были приняты с учетом ГОСТ 23.201-78 «Метод испытания материалов и покрытий на газоабразивное изнашивание с помощью центробежного ускорителя». Выбранные условия воздействия являются предельными и используются при проведении ускоренных сравнительных испытаний новых материалов и защитных покрытий рабочих лопаток турбин. Результаты расчетов приведены в Таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Параметры ударного воздействия на титановый сплав ВТ6 с защитным покрытием Ti+TiN при газоабаразивном износе

Параметр частицы	Электрокорунд марки F280	Кварцевый песок ГОСТ 6139-2003
Диаметр, мм	0,04	0,3
Плотность ρ, кг/м^3	3850	2600
модуль Юнга E, ГПа	320	73
Прочность на сжатие σ_c, МПа	2500-3000	300-400
Скорость по направлению к поверхности V_n, м/с	76	76
Величина сближения d, мм	$0{,}57\cdot10^{-3}$	$5{,}79\cdot10^{-3}$
Эквивалентная нормальная сила F_n, Н	0,52	14,49
Максимальное нормальное давление p_{max}, МПа	6871,40	2519,55
Скорость продольных волн $V_{\parallel}$, м/с	2971,73	1675,62
Скорость поперечных волн $V_{\perp}$, м/с	1879,49	1059,75
Время взаимодействия $t_в$, с	$2{,}20\cdot10^{-8}$	$2{,}24\cdot10^{-7}$
Время прохождения поперечных волн $t_{\parallel}$, с	$8{,}41\cdot10^{-9}$	$1{,}49\cdot10^{-8}$

Примечание – Характеристики ионно-плазменного покрытия, используемого для расчета: нитрид титана толщиной h = 0,025 мм; модуль Юнга E = 500 ГПа; твердость 3100 $HV_{0,1.}$

Заметим, что рассчитанное время удара частиц по поверхности с покрытием ($t_в$) превышает время распространения в нем упругих волн ($t_{||}$), т.е. выполняется условие $t_{||} < t_в$ (Таблица 2.6). В связи с этим, механическое воздействие абразивных частиц при выбранных условиях газоабразивного изнашивания будем рассматривать как квазиупругое, что позволяет нам при рассмотрении этого процесса применить формулы классической механики.

Для теоретического исследования прочности многослойных покрытий при ударном воздействии твердыми частицами применяли широко используемый метод конечных элементов. Целью исследования являлся анализ влияния материала, толщины и количества слоев многослойных ионно-плазменных покрытий на изменение напряженно-деформированного состояния при газоабразивном изнашивании титановых лопаток газовых и паровых турбин. Граничным условием при разработке и анализе вариантов многослойных покрытий являлся принцип их «*послойного изнашивания*», который можно сформулировать следующим образом. При прочих равных условиях напряженно-деформированного состояния наиболее износостойким будет то покрытие, в котором область действия максимальных растягивающих и максимальных касательных напряжений ограничено внешним слоем.

2.4.1 Моделирование ударного взаимодействия многослойных покрытий с кварцевыми частицами при газоабразивном изнашивании

Исследовали изменение напряженно-деформированного состояния многослойных покрытий нитрида титана толщиной 10 мкм, нанесенных на титановый сплав ВТ6 (основной материал) при различном количестве (от 2 до 4) нитридных слоев толщиной h_{TiN} от 1 до 5 мкм. Толщина титановых прослоек выбиралась постоянной 0,5 мкм в соответствие с теоретическими выводами по обеспечению минимальной пластической деформации (пункт 2.2.2). Численное моделирование проводили методом конечных элементов в программном продукте Comsol Multiphysics с использование упругопластической модели деформации материалов. Свойства материалов покрытий и свойства абразивного песка, предусмотренные ГОСТ 23.201-78 для проведения испытаний материалов на газоабразивное изнашивание, приведены в Таблице 2.6.

Исследовали напряженно-деформированное состояние нитридных и титановых слоев покрытия при ударе единичной частицей кварцевого песка со скоростью V = 76 м/с и углом атаки 60°. Критерием разрушения абразивной частицы было выбрано условие превышения возникающих в материале частицы эквивалентных напряжений (по Мизесу) прочности на сжатие. Результаты расчетов, проведенные для различных вариантов покрытий, показаны в Таблице 2.7 и на Рисунках А.1-А.6 Приложения А.

Напряженно деформированное состояние основного материала детали (титанового сплава ВТ6), возникающее при ударе единичной частицей кварцевого песка с заданными параметрами взаимодействия, показано на Рисунке А.1 б Приложения А. На рисунке видно, что максимальные эквивалентные напряжения возникают под поверхностью на глубине от 5 до 8 мкм. В этом месте наблюдается пластическая деформация материала $\varepsilon \approx 0{,}5\%$, которая при многократном ударе может приводить к накоплению дефектов и ускоренному разрушению материала.

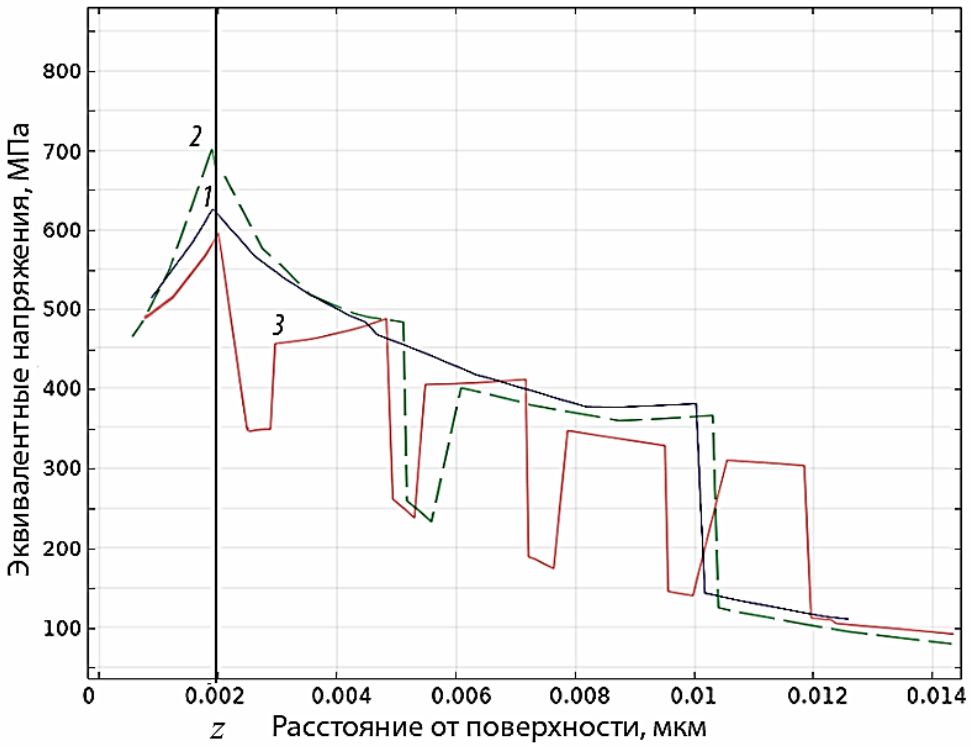
Таблица 2.7 – Результаты расчета напряженно-деформированного состояния многослойных покрытий при ударном воздействии частицы кварцевого песка диаметром 0,3 мм

Материал	Напряжения в покрытии[2] σ_{mises}, МПа	Максимальная деформация в основном материале[2] ε, %	Максимальная деформация в TiN-слоях ε_{TiN}, %	Время взаимодействия $t_в \cdot 10^{-7}$, с
Основной материал Ti, титановый сплав ВТ6	–	-0,490	–	1,50
Однослойное покрытие 0,5Ti-10TiN	594	-0,084	+0,23	1,16
Многослойное покрытие (0,5Ti-5TiN)x2	688	-0,068	+0,29	1,16
Многослойное покрытие (0,5Ti-2,5TiN)x4	713	-0,057	+0,30	1,16
Многослойное покрытие (0,5Ti-2TiN)x5	552	-0,028	+0,14	1,16
Многослойное покрытие (0,5Ti-1TiN)x10	736	-0,031	+0,31	1,16

Примечания – 1) Параметры взаимодействия приведены в Таблице 2.6; 2) Приводятся максимальные по модулю напряжения, вызванные ударом; 3) Время до разрушения или отскока абразивной частицы, что наступит раньше; 4) Характеристики нитридных слоев покрытия: модуль Юнга E = 300 ГПа, внутренние остаточные напряжения минус 250 МПа.

Нанесение на поверхность однослойного покрытия из нитрида титана толщиной 10 мкм меняет механизм деформирования материала с упругопластического на упругий, протекающий в нитридных слоях. Установлено, что в момент разрушения абразивной частицы (при выполнении условия $\sigma_{mises} > \sigma_c$) максимальная деформация в материале покрытия и в основным материале

детали составляет соответственно минус 0,085% и 0,23%. При этом, максимальные растягивающие напряжения величиной 805 МПа действуют на поверхности покрытия, по периметру контакта, а максимальные касательные напряжения величиной 594 МПа – на глубине 2 мкм от поверхности (Рисунок А.2 Приложения А и Рисунок 2.31).



Варианты многослойных покрытий: *1* – 0,5Ti+10TiN;
2 – (0,5Ti+5TiN)x2; *3* – (0,5Ti+2TiN)x5
z – глубина действия наибольших касательных напряжений
Рисунок 2.31 – Изменение эквивалентных напряжений по глубине поверхности

При этом возникающие напряжения во много раз меньше прочности нитрида титана на сжатие (экспериментально установленная максимальная контактная нагрузка до разрушения p_{max} = 6…20 ГПа, Таблица 5.23, пункт 5.8, глава 5), что при многократном ударе обеспечивает необходимы запас прочности и обусловливает появление, так называемого, «*инкубационного периода*» накопления структурных дефектов материала без его видимого разрушения, вплоть до появления первых трещин [31-33]. После завершения инкубационного периода, развитие трещин в однослойном покрытии будет происходить беспрепятственно под воздействием внешних механических и внутренних остаточных напряжений. Подробнее о развитии трещин в многослойных покрытиях изложено в пункте 2.2.

Эффективным способом повышения прочности защитного покрытия является увеличение количества слоев пластичного материала. Например, добавление четырех титановых слоев толщиной 0,5 мкм позволило уменьшить величину максимальной деформации в нитрид-титановом покрытии в 4 раза, от минус 0,084 % до минус 0,028 % (Таблица 2.7, Рисунки А.5, А.7 Приложения А).

Установлено, что для принятых условий ударного взаимодействия минимальные величины главных растягивающих (σ = 490 МПа) и касательных напряжений (τ = 736 МПа) достигаются при отношении толщин нитридных и титановых слоев $h_{TiN} / h_{Ti} = 4$. Это связано с тем, что при таком соотношении толщин область максимальных касательных напряжений увеличивается в объеме и смещается от поверхности к нижележащему титановому слою (Рисунок А.5 а Приложения А), что в целом снижает уровень действующих напряжений.

При дальнейшем увеличении количества промежуточных титановых слоев отношение толщин в покрытии (h_{TiN} / h_{Ti}) будет уменьшаться. При отношении $h_{TiN} / h_{Ti} \leq 2$ (Рисунок А.6 Приложения А) происходит изгиб всего верхнего (крайнего) нитридного слоя с возникновением в нем значительных растягивающих (σ = 1085 МПа) и касательных напряжений (τ = 736 МПа). Область максимальных касательных напряжений смещается из внешнего в следующий, нижележащий, нитридный слой. Очевидно, что такой вариант напряженно-деформированного состояния покрытия является наименее предпочтительным, поскольку возникает вероятность одновременного появления трещин растяжения на поверхности покрытия, по границе удара, и сдвиговых трещин в промежуточных нитридных слоях.

Обобщая вышесказанное, можно утверждать, что для каждого определенного напряженно-деформационного состояния многослойного покрытия, вызванного ударом единичной абразивной частицы (в диапазоне принятых условий взаимодействия), можно найти оптимальное отношение толщин нитридных и титановых слоев (h_{TiN}/h_{Ti}), обеспечивающее минимальный уровень механических напряжений, ограниченных в объеме внешнего слоя покрытия.

При этом, в соответствии с классической теорией контактного взаимодействия [208, 209], область наибольших касательных напряжений будет располагаться на глубине $z = 0{,}48a$, где $a = 0{,}48\sqrt{Rd}$ – радиус площадки контакта, R – радиус абразивной частицы, d – величина сближения, принимаемая по формуле (2.36). Отсюда, для выбранных условий абразивного воздействия глубина максимальных касательных напряжений в рассматриваемых многослойных покрытиях составит $z = 2 \pm 0{,}5$ мкм. При этом глубина z не зависит от величины остаточных внутренних напряжений, действующих только вдоль покрытия, $\sigma_{ост}(z) = 0$ МПа. Таким образом, исходя из условия равномерного послойного изнашивания покрытия при минимальных механических напряжениях, толщина нитридных слоев должна быть равна $h_{TiN} \geq 2z$, а толщина титановых

слоев с учетом условия минимальной глубины пластической деформации в титановых слоях (пункт 2.2.2) должна составлять $h_{Ti} = (0{,}25…0{,}3)\cdot h_{TiN} \approx 0{,}5z$.

Обобщая вышесказанное, можно утверждать, что для обеспечения износостойкости титанового сплава ВТ6 при принятых условиях газоабразивного износа частицами из кварцевого песка, рекомендуемыми толщинами многослойного покрытия будут: h_{TiN} = 2±0,8 мкм и h_{Ti} = 0,5±0,2 мкм, обеспечивающие установленное выше оптимальное отношение толщин (h_{TiN}/h_{Ti}) = 4. Количество пар слоев следует выбирать максимально возможным, поскольку промежуточные титановые слои являются эффективными барьерами, препятствующими росту трещин. Граничным условием при выборе количества слоев и, следовательно, толщины покрытия является величина напряжений растяжения, возникающих на границе с основным материалом, зависящая от величины остаточных напряжений в нитридных слоях и их суммарной толщины. Подробнее в пункте 2.1 (Рисунок 2.3).

2.4.2 Моделирование ударного взаимодействия многослойных покрытий с электрокорундовыми частицами при газоабразивном изнашивании

Исследовали изменение напряженно-деформированного состояния многослойных покрытий нитрида титана толщиной 10 мкм, нанесенных на титановый сплав ВТ6 (далее – основной материал) при различном количестве (n) от 2 до 4 и толщине нитридных слоев h_{TiN} от 1 до 5 мкм. Толщина титановых прослоек выбиралась постоянной 0,5 мкм в соответствие с рекомендациями по обеспечению минимальной глубины пластической деформации титановых слоев (пункт 2.2.2). Численное моделирование проводили методом конечных элементов в программном продукте Comsol Multyphisics с использование упругопластической модели деформации материалов. Свойства материалов покрытий и свойства абразивного песка, предусмотренные ГОСТ 23.201-78 для проведения испытаний материалов на газоабразивное изнашивание, приведены в Таблицах 2.6 и 2.8.

Исследовали напряженно-деформированное состояние нитридных и титановых слоев покрытия при ударе единичной частицей электрокорунда марки F280 диаметром 0,04 мм со скоростью v = 76 м/с и углом атаки 60°. Критерием разрушения абразивной частицы было выбрано условие превышения возникающих в материале частицы эквивалентных напряжений (по Мизесу) прочности на сжатие. Результаты расчетов, проведенные для различных вариантов покрытий, приведены в Таблице 2.8 и на Рисунках А.7-А.12 Приложения А.

В результате численного моделирования установлено, что при воздействии на основной материал образца абразивных частиц из электрокорунда, последние не разрушаются, т.к. эквива-

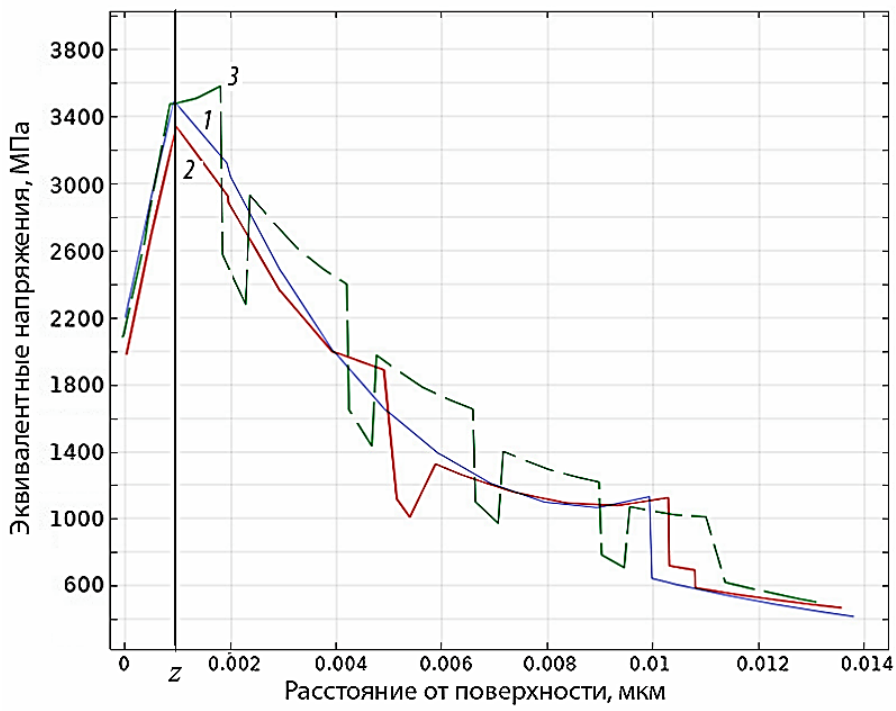
лентные напряжения, возникающие, в абразивных частицах в течение всего цикла взаимодействия ($t_в \approx 3{,}2 \cdot 10^{-7}$ с), не превышают их предела прочности. При этом основной материал претерпевает значительную пластическую деформацию, которая при натурных испытаниях (пункт 5.1, глава 5) проявляется в виде лунок, отпечатков абразивных частиц и пластического оттеснения материала из зоны контакта. Установлено, что в исследуемом диапазоне ударных нагрузок максимальные касательные напряжения, равные условному пределу текучести основного материала $\sigma_{0,2} \approx 900$ МПа, возникают на глубине около 2 мкм. На этой глубине действует максимальная величина пластических деформаций ≈ 5 %, которая распространяется вглубь поверхности, примерно до 32 мкм (Рисунок А.7 б).

Таблица 2.8 – Результаты расчета напряженно-деформированного состояния многослойных покрытий при ударном воздействии частицы электрокорунда диаметром 0,04 мм

Покрытие	Напряжения в покрытии[2] σ_{mises}, МПа	Максимальная деформация в основном материале[2] ε, %	Максимальная деформация в TiN-слоях ε_{TiN}, %	Время взаимо-действия[3] $t_в \cdot 10^{-7}$, с
Основной материал Ti, титановый сплав ВТ6	–	-5,75	–	1,300
Однослойное покрытие 10TiN	3480	-0,32	+0,97	1,106
Четырехслойное покрытие (0,5Ti-5TiN)x2	3300	-0,25	+0,91	1,106
Шестислойное покрытие (0,5Ti-3TiN)x3	3470	-0,28	+0,90	1,106
Восьмислойное покрытие (0,5Ti-2,5TiN)x4	3510	-0,30	+1,0	1,106
Десятислойное покрытие (0,5Ti-2TiN)x5	3700	-0,29	+0,22	1,106
Двадцатислойное покрытие (0,5Ti-1TiN)x10	4310	-0,02	+0,48	1,106
Двадцатислойное покрытие (0,5Ti-0,5TiN)x10	4190	-0,5	+0,3	1,112

Примечания – 1) Параметры взаимодействия приведены в Таблице 2.6; 2) Приводятся максимальные по модулю напряжения, возникающие при ударе в основном материале под покрытием; 3) Время до разрушения или отскока абразивной частицы, что наступит раньше; 4) Характеристики нитридных слоев покрытия: модуль Юнга E = 300 ГПа, внутренние остаточные напряжения минус 250 МПа.

Нанесение на основной материал однослойного покрытия нитрида титана толщиной 10 мкм меняет характер ударного взаимодействия, с упругопластического на преимущественно упругий. Возникающие в абразивной частице контактные напряжения начинают превышать ее прочность, что приводит к разрушению частицы и сокращению времени взаимодействия в 3 раза, до $t_в = 1{,}1 \cdot 10^{-7}$ с. В результате этого достигается уменьшение деформации основного материала более, чем в 18 раз, до $\varepsilon \leq -0{,}32\%$. Максимальные касательные напряжения величиной $\tau \approx 3500$ МПа возникают в покрытии на глубине от 1 до 1,5 мкм от поверхности, а максимальные растягивающие $\sigma \approx 2900$ МПа – на поверхности покрытия, вдоль границы удара. Эпюра распределения эквивалентных напряжений (по Мизесу) по глубине однослойного покрытия показана на Рисунке 2.32



Варианты многослойных покрытий: *1* – 0,5Ti+10TiN; 2 – (0,5Ti+5TiN)x2;
3 – (0,5Ti+2TiN)x5, где цифры обозначают толщину слоя в мкм
z – глубина действия наибольших касательных напряжений

Рисунок 2.32 – Изменение эквивалентных напряжений по глубине поверхности

При добавлении в покрытие промежуточного слоя титана (Таблица 2.8, Рисунок 2.32 и Рисунок А.8 Приложения А) наблюдается незначительное по сравнению с однослойным покрытием снижение уровня растягивающих деформаций на поверхности (ε_{TiN}), от 0,97 до 0,91%. При

этом величина и область действия максимальных касательных напряжений остаются практически неизменными. При дальнейшем увеличении количества слоев от 4 от 20 и соответствующем уменьшении (h_{TiN} / h_{Ti}) от 10 до 2, наблюдается монотонное увеличение эквивалентных напряжений до σ_{mises} = 4310 МПа при различных величинах деформации (ε_{TiN}) от 0,91 до 0,48 %, имеющих нелинейную зависимость.

По мере увеличения количества слоев покрытия и соответствующем уменьшении отношения (h_{TiN} / h_{Ti}) происходит утонение внешнего поверхностного слоя нитрида титана, который постепенно теряет свою жесткость и начинает испытывать изгиб по всей толщине, приводящий к росту растягивающих напряжений. Оптимальным отношением толщин нитридных и титановых слоев для принятых условий ударного взаимодействия является величина (h_{TiN} / h_{Ti}) = 4, при которой на поверхности наблюдаются минимальные растягивающие напряжения σ = 660 МПа, соответствующие деформации ε_1 = 0,22 % (Рисунок А.10 б Приложения А и Рисунок 2.33).

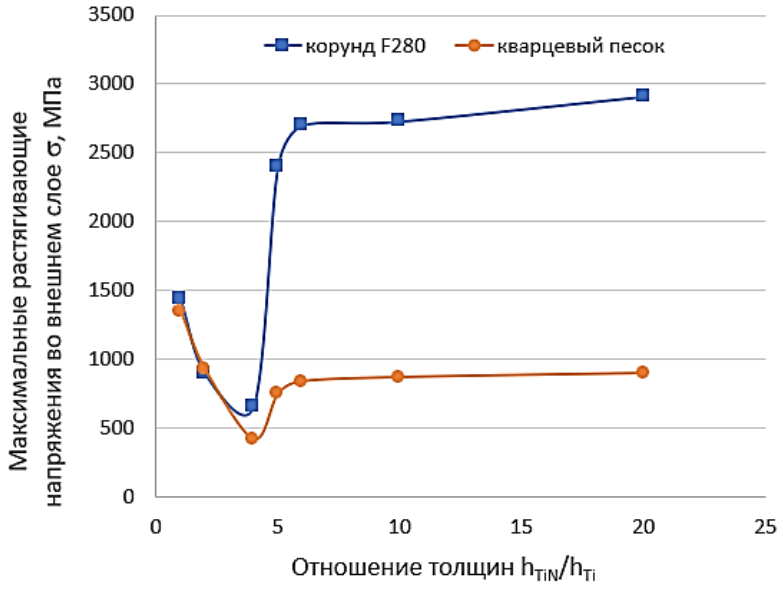


Рисунок 2.33 – Зависимость величины растягивающих напряжений во внешнем слое многослойного покрытия Ti+TiN от толщины нитридных (h_{TiN}) и титановых слоев (h_{Ti}) при ударном воздействии различными абразивными частицами

При дальнейшем уменьшении отношения до величины (h_{TiN} / h_{Ti}) = 1, растягивающие напряжения в поверхностном нитридном слой увеличиваются, что связано с увеличением его деформации (ε_{TiN}) и распространением области ударной нагрузки в нижележащие нитридные слои, где наблюдается рост касательных напряжений. Этот вариант взаимодействия является

наименее предпочтительным, поскольку возникает вероятность одновременного появления трещин растяжения на поверхности покрытия, по границе удара, и сдвиговых трещин в нижележащих нитридных слоях.

Установлено, что при добавлении в нитридное покрытие промежуточных слоев титана, эпюра эквивалентных напряжений (по Мизесу), действующих в нитридных слоях, практически не изменяется. Максимум напряжений в соответствии с классической теорией контактного взаимодействия Г.Герца при ударе абразивной частицей по упругому полупространству будет располагаться в объеме внешнего нитридного слоя на глубине $z \approx 0{,}48\sqrt{Rd}$, где R – радиус абразивной частицы, d – величина сближения, принимаемая по формуле (2.24). Отсюда, для выбранных условий абразивного воздействия глубина максимальных касательных напряжений в рассматриваемых нитридных покрытиях составит $z = 1 \pm 0{,}5$ мкм, не зависимо от величины остаточных напряжений, поскольку их величина в нормальном направлении к поверхности равна нулю: $\sigma_{ост}(z) = 0$ МПа. Исходя из принятого условия равномерного послойного изнашивания покрытия при минимальных механических напряжениях, толщина нитридных слоев должна быть равна $h_{\mathrm{TiN}} = 2z \approx 3$ мкм, а толщина титановых слоев с учетом условия минимальной глубины пластической деформации (пункт 2.2.2) должна составлять $h_{\mathrm{Ti}} = (0{,}25\ldots0{,}3)\cdot h_{\mathrm{TiN}} \approx 0{,}7\ldots0{,}9$ мкм.

Установлено, что по глубине покрытия величина эквивалентных напряжений от ударного воздействия абразивной частицей во всем исследованном диапазоне нагрузок уменьшается пропорционально квадрату расстояния от поверхности (Рисунок 2.31 и Рисунок 2.32). Таким образом, основную механическую нагрузку при контактном взаимодействии испытывают крайние нитридные слои покрытия, толщина которых (h_{TiN}) определяет область действия максимальных касательных напряжений:

а) $h_{TiN} > 2z$ – внутри нитридного слоя;

б) $h_{TiN} \approx z$ – на границе между внешним нитридным и титановым слоем;

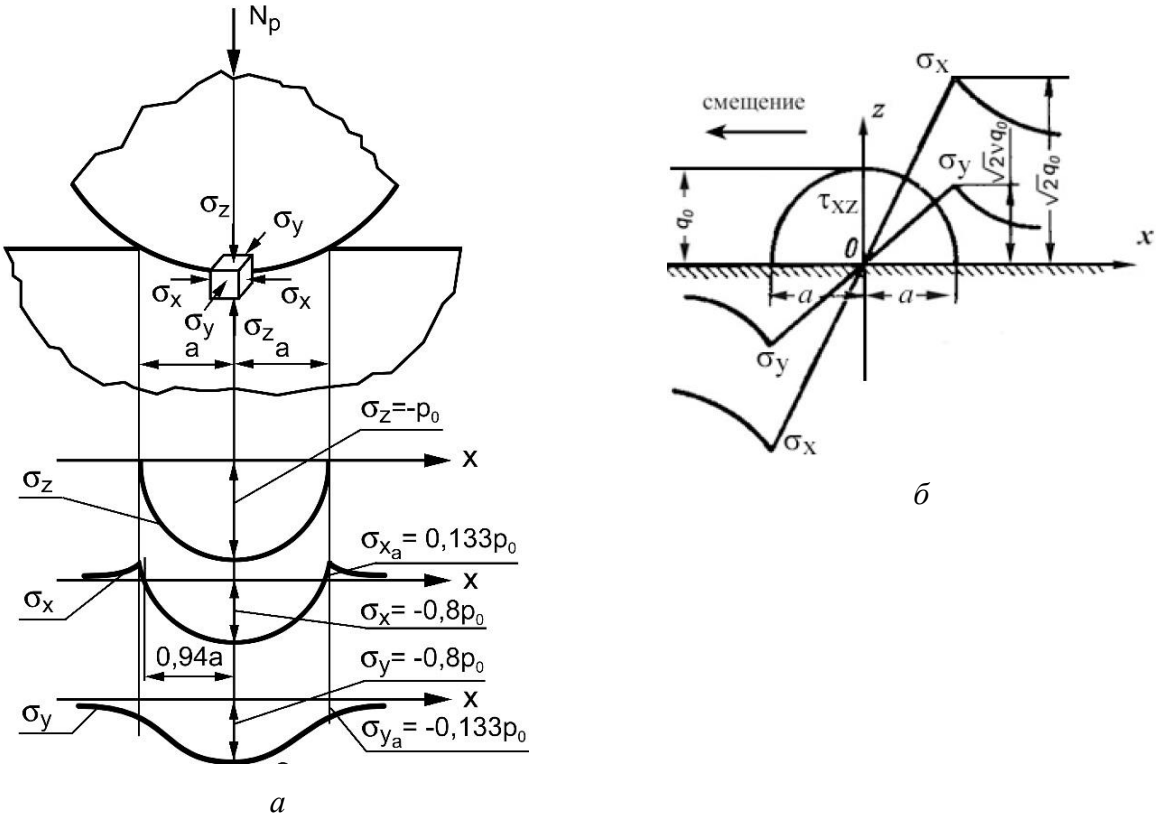
в) $h_{TiN} < z$ – на границе между нижележащим нитридным и титановым слоем.

Во всех случаях максимальные растягивающие напряжения действует на поверхности покрытия по периметру площади контакта.

2.4.3 Моделирование напряженно-деформированного состояния поверхности при трении абразивной частицей

В процессе газоабразивного износа рабочих лопаток абразивные частицы воздушного потока ударяют по детали и, далее, скользят вдоль нее, изнашивая материал поверхности. В рамках

молекулярно-механической теории трения [205] рассмотрим напряженно-деформированное состояние (НДС) материала, возникающее при скольжении жесткой полусферы по упругому полупространству с монотонно увеличивающейся нагрузкой. На Рисунке 2.34а представлены эпюры напряжений [205-207], показывающие, что при нормальной нагрузке в центре круговой площадки действует НДС, близкое к всестороннему сжатию, по контуру поверхности контакта, в плоскости *XY* – двухосное напряженное состояние, называемое чистым сдвигом, а в остальной области – трехстороннее неравномерное сжатие.



а – распределение радиальных и окружных напряжений при нормальной нагрузке, без смещения; *б* – при тангенциальном смещении с коэффициентом трения μ (численные значения даны для коэффициента Пуассона ν=0,3)

Рисунок 2.34 – Распределение напряжений в зоне контакта жесткой полусферы с упругим полупространством [205–207]

Максимальное давление p_0, действующее в центре круговой площадки контакта, равно [207-209]:

$$\sigma_z \equiv p_0 = \frac{3}{2} p = \frac{3}{2} \frac{P_N}{\pi a^2} \text{, МПа} \qquad (2.41)$$

где p – среднее давление в контакте, МПа;

P_N – нормальная сила, действующая на сферу, Н;

a – радиус невосстановленного пятна контакта (лунки), мм [206]:

$$a = \sqrt{h_c (2R - h_c)} = \sqrt{R h_d} \text{, мм} \qquad (2.42)$$

где R – радиус сферы, мм;

h_c – глубина вдавливания, мм;

h_d – величина упругого сближения частицы и поверхности $h_d \approx 0{,}5 h_c$, мм.

При приложении к сфере касательного усилия, например, действующего при трении скольжения, на площадке контакта дополнительно возникают напряжения сжатия перед сферой и растяжения позади нее [207,208]. Максимальные значения возникающих напряжений действуют на границе контакта (Рисунок 2.34 б). Рассчитывая соответствующие величины напряжений из условия пропорциональности касательных сил нормальным: $q_0 = \mu \cdot p_0$, где μ – коэффициент трения скольжения, исследуем эффект от их совместного действия с компонентами напряжений, соответствующими, нормальному вдавливанию:

а) На границе контакта перед частицей:

$$\begin{cases} \sigma_{1,2} \equiv \sigma_x = p_0 \dfrac{1-2\nu}{3} - \sqrt{2} q_0 = p_0 \left(\dfrac{1-2\nu}{3} - \sqrt{2}\mu \right); \\ \sigma_3 \equiv \sigma_y = -p_0 \dfrac{1-2\nu}{3} - \sqrt{2}\nu q_0 = -p_0 \left(\dfrac{1-2\nu}{3} + \sqrt{2}\nu\mu \right); \\ \sigma_{2,1} \equiv \sigma_z = 0; \end{cases} \qquad (2.43)$$

Заметим, что в зависимости от величины μ максимальные напряжения σ_1 могут менять направление действия вдоль оси x или z.

б) На границе контакта позади частицы:

$$\begin{cases} \sigma_1 \equiv \sigma_x = p_0 \dfrac{1-2\nu}{3} + \sqrt{2} q_0 = p_0 \left(\dfrac{1-2\nu}{3} + \sqrt{2}\mu \right); \\ \sigma_{3,2} \equiv \sigma_y = -p_0 \dfrac{1-2\nu}{3} + \sqrt{2}\nu q_0 = -p_0 \left(\dfrac{1-2\nu}{3} - \sqrt{2}\nu\mu \right); \\ \sigma_{2,3} \equiv \sigma_z = 0. \end{cases} \quad (2.44)$$

в) На границе контакта по обоим краям царапины:

$$\begin{cases} \sigma_1 \equiv \sigma_x = p_0 \dfrac{1-2\nu}{3}; \\ \sigma_3 \equiv \sigma_y = -p_0 \dfrac{1-2\nu}{3}; \\ \sigma_2 \equiv \sigma_z = 0. \end{cases} \quad (2.45)$$

г) В центре контакта:

$$\begin{cases} \sigma_x = \sigma_y = -p_0 \dfrac{1+2\nu}{2}; \\ \sigma_z = -p_0; \\ \tau_{xz} = -\mu \cdot p_0; \\ \tau_{xy} = \tau_{yz} = 0; \end{cases} \quad (2.46)$$

д) В области максимальных касательных напряжений главные напряжения на некоторой глубине z при условии $\mu < 0{,}3$ находят по формулам [6]:

$$\begin{cases} \sigma_{1,2} \equiv \sigma_x = \sigma_y = -p_0 \left[(1+\nu) - \dfrac{1}{2} \dfrac{1}{1+\dfrac{z^2}{a^2}} - (1+\nu) \dfrac{z}{a} \arctan \dfrac{a}{z} \right]; \\ \sigma_3 \equiv \sigma_z = -p_0 \dfrac{1}{1+\dfrac{z^2}{a^2}}. \end{cases} \quad (2.47)$$

Заметим, что величины главных напряжений на границе контакта (2.8) и (2.9) при увеличении коэффициента трения могут перейти через ноль и изменить направление своего действия.

В этой связи эквивалентные напряжения для каждой области контакта будем рассчитывать по Мизесу (четвертая теория прочности), учитывая действие всех главных компонент:

$$\sigma_{экв}^{IV} = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}\ ; \qquad (2.48)$$

или напряжений, действующих по осям:

$$\sigma_{экв}^{IV} = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2 + \tau_{yx}^2)}\ . \qquad (2.49)$$

Результаты расчетов эквивалентных напряжений, проведенные по четвертой ($\sigma^{IV}_{экв}$) и третьей теории прочности ($\sigma^{III}_{экв} = 2\tau_{max} = |\sigma_1 - \sigma_3|$) в диапазоне изменения коэффициента трения $\mu = [0; 0{,}5]$, расходятся не более чем на 13%.

Таким образом, при действии максимального нормального давления p_0 в области трения единичного сферического контакта будем рассматривать следующие эквивалентные напряжения, показанные схематически на Рисунке 2.35.

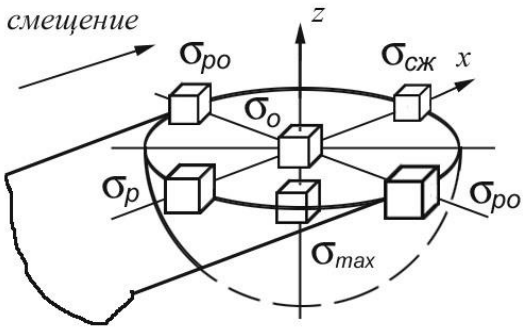


Рисунок 2.35 – Схема действия эквивалентных напряжений в зоне контакта полусферы с упругим полупространством при трении

Подставляя формулы (2.31)–(2.35) в (2.36) после преобразования, пренебрегая малыми величинами четвертого порядка[1], получим эквивалентные напряжения, действующие:

[1] Расчеты показывают, что погрешность при этом составляет менее 9%, что сопоставимо с точностью расчетов эквивалентных напряжений по третьей и четвертой теориям прочности.

а) на границе площадки контакта позади индентора:

$$\sigma_p = p_0\sqrt{3\beta^2 + 2\mu(1-\nu)(2\mu + 3\sqrt{2}\beta)}\ ; \tag{2.50}$$

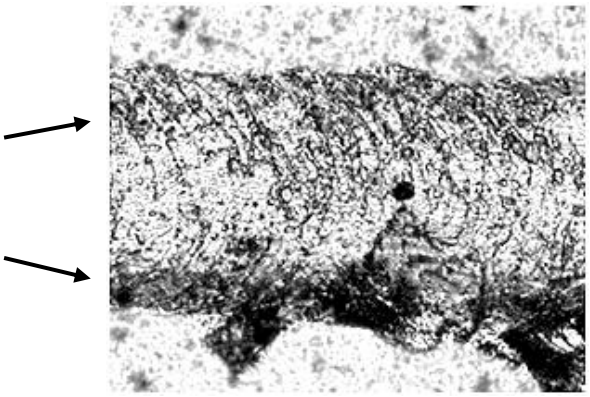
где β – коэффициент, равный:

$$\beta = (1\text{-}2\nu)/3. \tag{2.51}$$

Заметим, что в области позади движущегося индентора действуют максимальные растягивающие напряжения, которые могут быть причиной образования кольцевых трещин, наблюдаемые при индентировании хрупких тел сферическими наконечниками, например, как это показано на Рисунке 2.36, что также подтверждается работами [205, 208].

б) На границе контакта перед индентором:

$$\sigma_{сж} = p_0\sqrt{3\beta^2 + 2\mu(1-\nu)(2\mu - 3\sqrt{2}\beta)}\ . \tag{2.52}$$



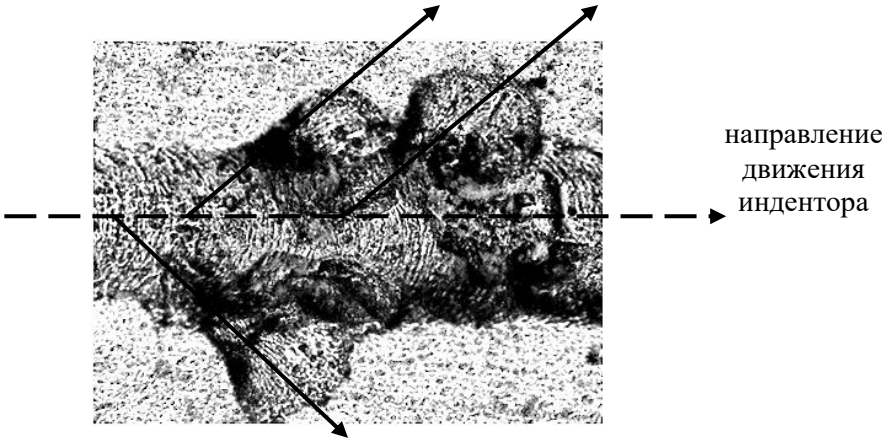
Стрелками указаны кольцевые микротрещины по краям царапины

Рисунок 2.36 – Пример кольцевых микротрещин в покрытии при его царапании алмазным наконечником типа Роквелл

в) На границе контакта по обоим краям царапины:

$$\sigma_{p0} = p_0\sqrt{\frac{(1-2\nu)^2}{3}}\ . \tag{2.53}$$

При наличии покрытия на поверхности это напряжение обусловливает его отслоение при превышении им величины адгезионной прочности на срез. Пример отслоения покрытия показан на Рисунке 2.37. Очевидно, что разрушение происходит вдоль направления действия главных касательных напряжений, а именно под углом 45° к направлению движения частицы по поверхности. Отметим, что эквивалентные напряжения в этой области не зависят от коэффициента трения ввиду отсутствия действия нормальных напряжений ($\sigma_z = 0$).



Стрелками указаны кольцевые микротрещины по краям царапины

Рисунок 2.37 – Пример отслоения покрытия при его царапании сферическим алмазным наконечником типа Роквелл

г) В центральной области площадки контакта, подставляя (2.45) в (2.13):

$$\sigma_0 = p_0\sqrt{\left(\frac{1-2\nu}{2}\right)^2 + 3\mu^2}. \qquad (2.54)$$

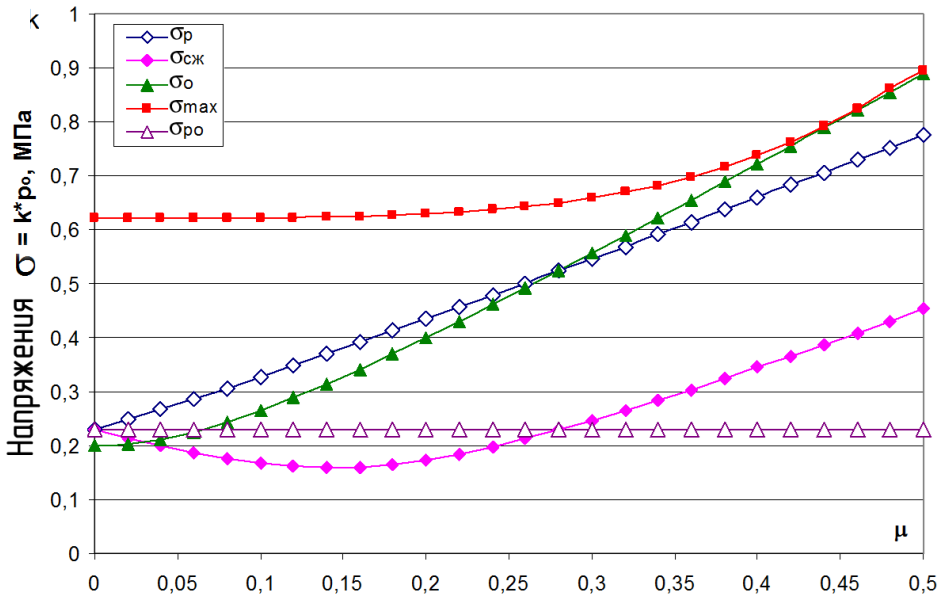
д) в области максимальных касательных напряжений (на некоторой глубине поверхности при условии $\mu < 0{,}25$) [207]:

$$\sigma_{max} = 2\tau_1 = p_0\left[\frac{3}{2}\frac{1}{1+\left(\frac{z}{a}\right)^2} + (1+\upsilon)\left(\frac{z}{a}\arctan\frac{z}{a} - 1\right)\right] . \qquad (2.55)$$

По формуле (2.55), можно рассчитать максимальные касательные напряжения, действующие на глубине $z = 0{,}48a$ [184]:

$$(2\tau_1)_{max} = p_0(1{,}22 - 0{,}46(1 + \upsilon)). \qquad (2.56)$$

Что касается влияния коэффициента трения на величину максимального касательного напряжения τ_1, то в диапазоне μ от 0 до 0,3 его изменения не значительны, приблизительно от $0{,}30p_0$ до $0{,}32p_0$ [208]. При увеличении коэффициента трения $\mu > 0{,}3$ по критерию Мизеса (или $\mu > 0{,}25$ по критерию текучести Треска) ожидается увеличение области действия максимальных касательных напряжений и ее постепенное смещение к поверхности, а при достижении $\mu \geq 0{,}44$ начало пластического течения происходит уже на самой поверхности. При этом напряжения в центральной области контакта (σ_0) становятся равными по величине напряжениям (σ_{max}): $\sigma_0 \equiv \sigma_{max} \approx 2\mu p_0$, как это показано на Рисунке 2.38.



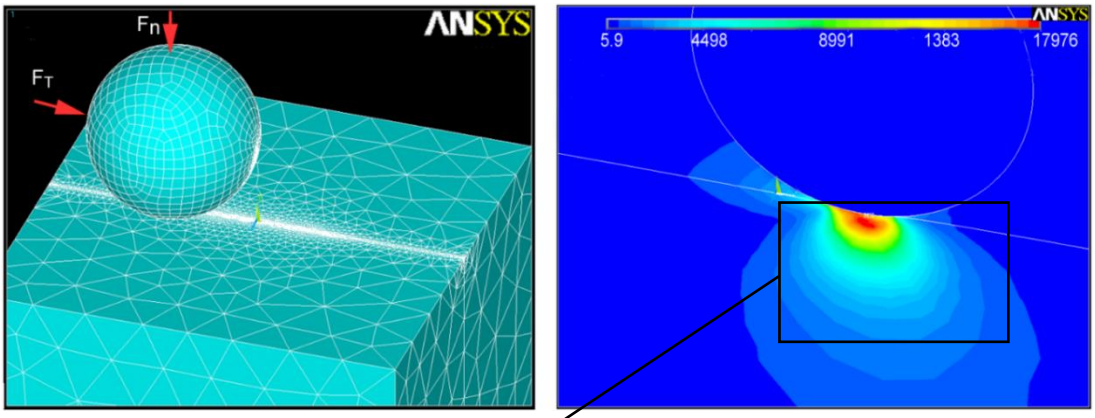
$\sigma_р$, $\sigma_{ро}$ – растягивающие напряжения позади индентора и по краям царапины (соответственно); $\sigma_{сж}$, σ_0, σ_{max} – сжимающие напряжения на передней границе контакта, в центральной области и под поверхностью (соответственно); μ – коэффициент трения

Рисунок 2.38 – Эквивалентные напряжения в зоне трения скольжения жесткой сферы по упругому материалу с коэффициентом Пуассона υ=0,3

Результаты расчетов эквивалентных напряжений при различных значениях коэффициента трения приведены на Рисунке 2.38. Для сравнения полученных результатов с работами [205–208, 209] коэффициент Пуассона принимали постоянным, соответствующим металлической поверхности $\upsilon = 0{,}3$ [184]. Анализ полученных зависимостей показывает, что в некотором идеальном случае, когда коэффициентом трения можно пренебречь, эквивалентные напряжения совпадают между собой и находятся в диапазоне $\sigma_{экв} = (0{,}20...0{,}37)p_0$, определенным в работе [205] для разных групп материалов при оценке условного предела текучести.

С увеличением коэффициента трения до $\mu = 0{,}15$ происходит монотонный рост напряжений растяжения в материале позади частицы. Одновременно с этим увеличиваются напряжения сжатия перед ней. В этих условиях максимальными эквивалентными напряжениями в области контакта являются напряжения сжатия $\sigma_{max} = 0{,}62p_0$ на глубине $z \approx 0{,}49a$, величина которых практически остается постоянной в диапазоне $0 < \mu < 0{,}2$. При дальнейшем росте коэффициента трения, напряжения в центральной части пятна контакта (σ_0) увеличиваются и при величине $\mu > 0{,}45$ совпадают по величине с максимальными напряжениями ($\sigma_0 \approx \sigma_{max}$), Рисунок 2.38.

Верификацию формул расчета эквивалентных напряжений (2.50)–(2.55), действующих в области контакта, проводили методом конечных элементов в системе Ansys. Твердотельная трехмерная модель и сетка конечных элементов показана на Рисунках 2.39 и 2.40.



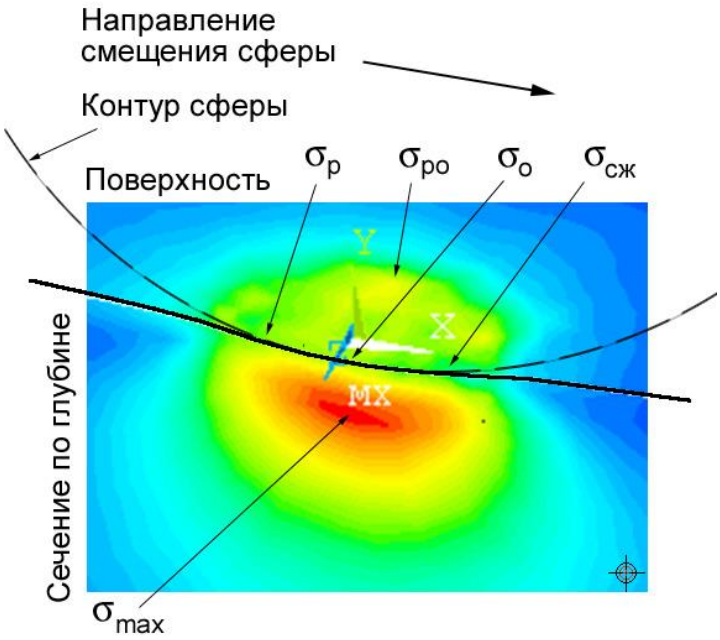
а *б*

Рисунок 2.40

а – сетка конечных элементов ANSYS: SOLID45, TARGE170, CONTA174;
б – пример результатов расчета эквивалентных напряжений на площадке контакта в вертикальном сечении, коэффициент трения $\mu = 0{,}3$

Рисунок 2.39 – Твердотельная 3D-модель контакта жесткой сферы радиусом 0,2 мм и упругого полупространства ($E = 2{,}18 \cdot 10^5$ МПа, $\upsilon = 0{,}28$)

Исследовали эквивалентные напряжения по критерию Мизеса при постоянно действующей нормальной нагрузке и различных значениях коэффициента трения μ от 0,1 до 0,5. Численные значения напряжений приведены в Таблице 2.9. Относительная погрешность результатов расчета, проведенного по предлагаемым формулам, составила не более 10,7 %, что расчетов можно принять удовлетворительным для инженерных.



Обозначения напряжений приведены в тексте

Рисунок 2.40 – Схема действия эквивалентных напряжений в области контакта жесткой сферы при ее трении по металлической поверхности (к Рисунку 2.39)

Таблица 2.9 – Сравнительные результаты расчетов эквивалентных напряжений

Эквивалентные напряжения	$\sigma_р$, МПа	$\sigma_{сж}$, МПа	$\sigma_{ро}$, МПа	σ_0, МПа	σ_{max}, МПа
Коэффициент трения μ = 0,1					
Расчет	11,19	5,88	8,0	8,9	20,0
Численное моделирование	10,5	5,5	7,9	9,0	19,2
Относительная погрешность, %	6,2	6,5	1,3	1,1	4,0
Коэффициент трения μ = 0,3					
Расчет	17,9	7,6	7,9	17,6	19,7
Численное моделирование	16,9	7,8	7,6	18,0	20,2
Относительная погрешность, %	5,6	2,6	3,8	2,3	2,5
Коэффициент трения μ = 0,5					
Расчет	24,3	13,5	7,6	27,0	27,0
Численное моделирование	22,5	12,1	7,2	28,5	28,5
Относительная погрешность, %	7,4	10,4	5,3	5,6	5,6

Примечание – Схема эквивалентных напряжений показана на Рисунках 2.34 и 2.40

2.5 Выводы по главе 2

1 Теоретически установлено, что уменьшение величины внутренних остаточных напряжений в материале покрытия уменьшает величину растягивающих деформаций в области удара абразивными частицами, а также снижает концентрацию напряжений и скорость распространения трещин в его нитридных слоях.

2 Теоретически установлена линейная зависимость между напряжениями сжатия, действующими в ионно-плазменных покрытиях, и уравновешивающими их напряжениями растяжения, возникающими в материале поверхности подложки.

3 Установлено, что для кратного уменьшения области максимальных напряжений, возникающих при ударе абразивной частицей в многослойном покрытии, толщина нитридных слоев покрытия h_{TiN} должна минимум в два раза превышать глубину действия максимальных касательных напряжений $z = 0{,}48a$, где a – радиус площадки контакта, определяемый в соответствии с классической теорией контактного взаимодействия. Условие ($h_{TiN} > 2z$) ограничивает область действия максимальных касательных напряжений в объеме внешнего нитридного слоя, что является необходимым для равномерного послойного изнашивания покрытия.

4 Установлено, что для известных условий газоабразивного изнашивания (материал частиц, их твердость, размер и скорость) существует оптимальное отношение толщины нитридных и титановых слоев (h_{TiN}/h_{Ti}), обеспечивающее минимальный уровень механических напряжений, возникающих при ударе, за счет ограничения области действия максимальных касательных напряжений. Например, при газоабразивном изнашивания частицами кварцевого песка (диаметр частиц 0,3 мм, $\sigma_в = 300...400$ МПа) или электрокорунда (диаметр частиц 0,04 мм, $\sigma_в = 2500...3000$ МПа), ударяющих по поверхности со скоростью V_n, = 76 м/с, оптимальным отношением толщин титановых (h_{Ti}) и нитридных слоев (h_{TiN}) по критерию минимальных касательных напряжений является: $h_{TiN} / h_{Ti} = 4$; $h_{TiN} = 2 \pm 0{,}8$ мкм; $h_{Ti} = 0{,}5 \pm 0{,}2$ мкм.

5 Теоретически показано, что при переходе трещины из нитридных слоев многослойного покрытия в титановые скорость ее развития скачкообразно уменьшается за счет увеличения области пластической деформации, уменьшения величины действующих напряжений и изменения механизма разрушения, с хрупкого на вязкий. Таким образом, на границе между титановым и нижележащим нитридным слоем из-за разности физико-механических и прочностных свойств этих материалов, возникает энергетический барьер, препятствующий дальнейшему росту трещины в поперечном направлении. Это указывает на то, что введение титановых прослоек в нитридное покрытие может являться эффективным способом торможения или блокирования развития трещин.

6 Для повышения износостойкости покрытия количество пар нитридных и титановых слоев должно быть максимальным при условии ограничения глубины действия пластической деформации в титановых слоях (менее 50% от толщины h_{Ti}): $h_{Ti} >> 0{,}05h_{TiN}$, где h_{Ti} – толщина титанового слоя; h_{TiN} – толщина основного нитридного слоя.

7 Теоретически показано, что границы нитридных и титановых слоев могут являться эффективными барьерами, рассеивающими до 92% амплитуды упругих волн, возникающих при капельной эрозии лопаток паровых турбин. Для этого установленные аналитические зависимости позволяют рассчитать оптимальное отношение толщин основных и промежуточных слоев, подобрать для них материалы с заданными физико-механическими свойствами (плотность, модуль упругости, внутренние остаточные напряжения), обеспечивающие минимальное напряженно-деформационное воздействие ударной волны на основной материал за счет ее рассеивания при прохождении через многослойное покрытие.

ГЛАВА 3
ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ

3.1 Модель формирования ионно-плазменного покрытия при его осаждении с нескольких протяженных ионных источников

Многообразие технологических схем и компоновок вакуумных установок, сочетающих в себе несколько ионных источников, а также особенности обработки поверхностей сложной формы (например, при планетарном движении деталей в вакуумной камере), обусловливает необходимость и актуальность исследований и разработки новых способов создания многослойных композитных покрытий. Сочетанием нескольких ионных источников с различными сортами ионов и скоростями их испарения можно обеспечить получение покрытий с заданными структурами и свойствами [225-227]. Большинство предлагаемых в литературе моделей нанесения покрытий посвящены либо частным, либо упрощенным вариантам обработки. Общим для большинства известных моделей [226, 228] является следующее:

а) эмиссия ионов происходит из точечного источника;

б) распределение ионного потока в пространстве соответствует косинусоидальному закону (при токах дуги менее 100 А и отсутствии напряжения смещения на детали);

в) средняя скорость потока ионов в некоторой точке *A* на поверхности детали пропорциональна произведению косинуса угла вылета ионов из источника в направлении точки *A* (α) и косинуса угла падения на поверхность детали (β), как это показано на Рисунке 3.1:

$$dN_A/dt = dN_0/dt \cdot \cos\alpha \cdot \cos\beta \text{ , ион/с} \qquad (3.1)$$

где dN_0/dt – средняя скорость потока ионов в направлении детали от неподвижного ионного источника, м/с;

Из-за различия энергий ионов при нанесении ионно-плазменных покрытий на поверхности детали протекают одновременно несколько процессов: распыление материала, конденсация, упругое столкновение и рассеивание. При расчете скорости нанесения покрытия ($v_к$) эти процессы учитывают с помощью соответствующих коэффициентов [119,128]:

$$v_к = \frac{m_i}{Ze\rho} j_s(\alpha_к - s_p), \text{ м/с}, \qquad (3.2)$$

где m_i – масса конденсированного иона, кг;

Z – кратность заряда ионов;

e – заряд электрона;

j_s – плотность ионного тока, действующего на поверхность, А/м^2;

ρ – удельная плотность конденсируемого вещества, кг/м^3;

$\alpha_к$ – коэффициент конденсации;

s_p – коэффициент, учитывающий процессы распыления и рассеивания.

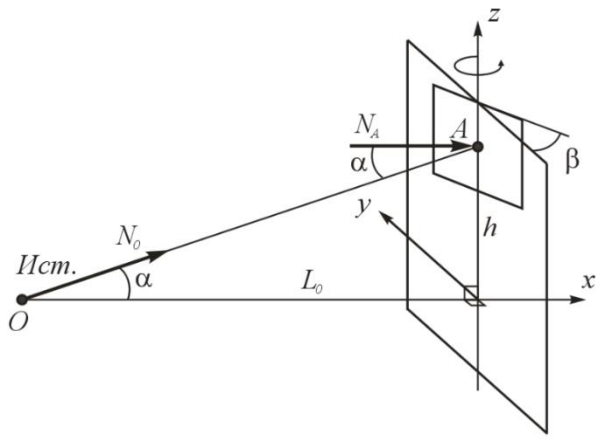


Рисунок 3.1 – Схема неподвижного точечного источника, эмитирующего ионы в направлении вращающейся плоскости (пояснения в тексте)

При моделировании процессов осаждения и роста покрытий примем допущение, что все ионы, достигшие поверхности осаждаются на нее в виде тонких пленок без рассеивания материала поверхности ($\alpha_к >> s_р$). В этом случае максимальная скорость конденсации покрытия в точке A будет равна:

$$v_A = v_к cos\alpha \cos\beta = \frac{m_i}{Ze\rho} j_s cos\alpha \cos\beta, \text{ м/с.} \quad (3.3)$$

При этом толщина покрытия может быть определена интегрированием скорости конденсации ионов (v_A) по времени [128, 229]:

$$H(t) = \int_0^t v_A \, dt = \frac{m_i}{Ze\rho} \int_0^t j_s \, cos\alpha \cdot cos\beta dt, \text{ м.} \quad (3.4)$$

Для схемы центрального вращения детали с неподвижным точечным источником ионов (Рисунок 3.1) скорость конденсации ионов в точке A будет равна:

$$v_A = \frac{m_i}{Ze\rho} j_s \frac{L_0}{\sqrt{L_0^2+h^2}} cos\,\beta,\ \text{м/с}. \quad (3.5)$$

Зная угловую скорость вращения детали $\omega_д = d\beta/dt$ и с учетом формулы (3.3), получаем зависимость толщины покрытия в точке *A* от времени напыления:

$$\mathrm{H_A}(t) = \int_0^t v_\mathrm{A}\, dt = \frac{m_i}{Ze\rho} \frac{L_0}{\sqrt{L_0^2+h^2}} \int_0^t j_s \cos\left(\omega_д t\right) dt, \text{м}, \quad (3.6)$$

где j_s – плотность ионного тока, действующего на поверхность, А/м^2.

Подробно об особенностях формирования ионного тока при нанесении ионно-плазменных покрытий на поверхности лопаток изложено в Приложении Б.

Рассмотрим наиболее общую технологическую схему нанесения покрытия с одного протяженного электродугового испарителя на поверхность вращающейся детали. При этом деталь совершает сложное кинематическое движение, совмещающее вращение вокруг собственной оси и вокруг центральной оси камеры, Рисунок 3.2.

Постоянными (конструкторско-технологическими) параметрами схемы являются: $L_к$ – длина катода электродугового испарителя; $B_{эди}$ – ширина катода; $2r$ – диаметр катодного пятна; L_0 – расстояние между рабочей поверхности катода и центральной осью вращения; R – радиус вращения детали вокруг центральной оси; $\omega_0 = d\delta/dt$ – угловая скорость вращения детали вокруг центральной оси; $\omega_д = d\gamma/dt$ – угловая скорость вращения детали вокруг собственной оси; h – высота исследуемой точки на поверхности детали над осью ионного источника.

Интегрируемыми переменными являются: углы вращения δ и γ, смещение катодного пятна dy. Отметим, что в случае использования планетарного механизма вращения деталей, указанные углы вращения будут взаимосвязаны через передаточное отношение u по известной формуле:

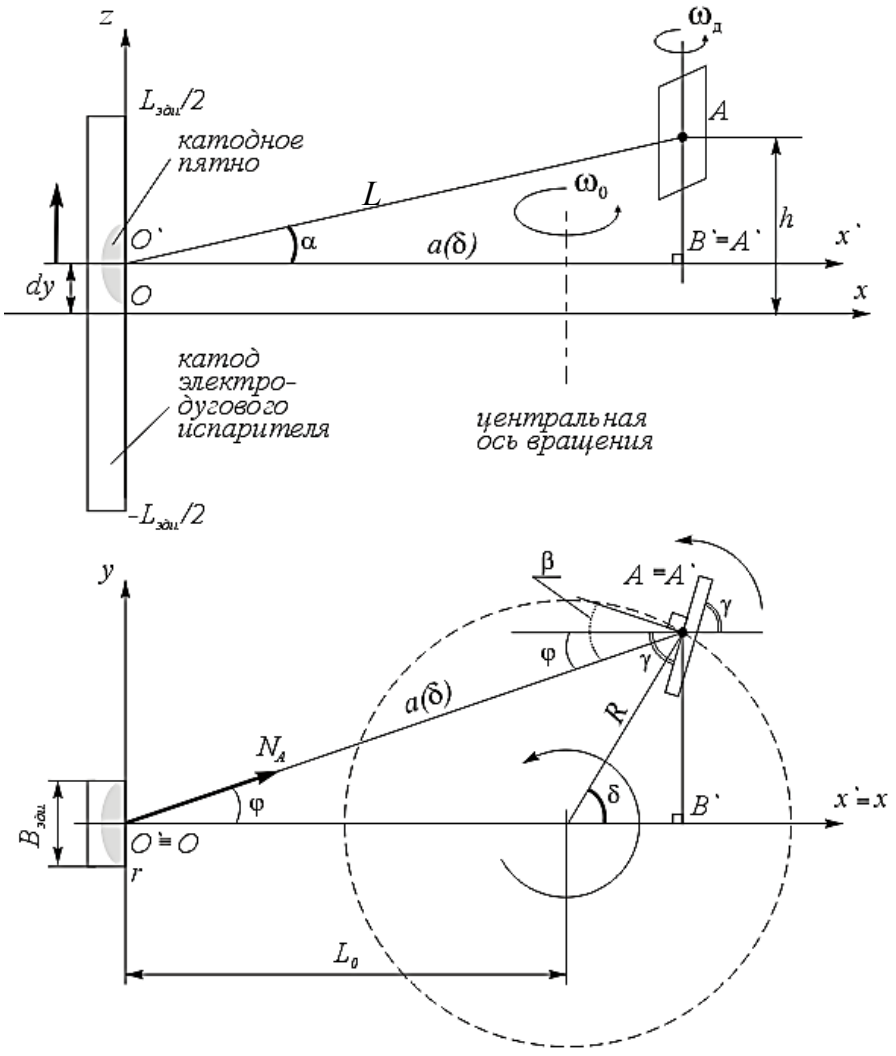
$$u = \omega_0/\omega_д = d\delta / d\gamma = Z_д / Z_0 = const, \quad (3.7)$$

где $Z_д$ – количество зубьев сателлита с закрепленной на нем деталью;

Z_0 – количество зубьев коронной шестерни.

Найдем скорость потока ионов, эмитированных катодным пятном в направлении произвольной точки *A*, размещенной на поверхности детали на расстоянии h от оси Ox (Рисунок 3.2). Катодное пятно перемещается по поверхности катода с известной скоростью dy/dt, а точка А со-

вершает одновременное движение вокруг оси детали и центральной оси камеры с соответствующими угловыми скоростями вращения: $\omega_д$ и ω_0. Центр неподвижной системы координат *xyz*, связанный с протяженным ионным электродуговым испарителем, находится в центральной точке *O* протяженного катода длиной $L_{эди}$, а центр подвижной системы координат *x`y`z`*, связанный с движущимся катодным пятном – в центре катодного пятна, в точке O`. Расстояние между поверхностью катода и центральной осью камеры постоянное, равное L_0. Деталь вращается вокруг центральной оси по известному радиусу *R*.



Обозначения приведены в тексте

Рисунок 3.2 – Схема протяженного ионного источника, эмитирующего ионы из подвижного катодного пятна в направлении плоскости, вращающейся вокруг двух осей (пояснения в тексте)

В качестве допущения примем, что поток ионов, направленный в точку *A*, не испытывает рассеяния при движении к детали, а также не зависит от геометрических размеров детали и ширины поверхностного электрического слоя в соответствующем сечении. Сделанное допущение справедливо при длине свободного пробега заряженных частиц, сравнимое с размерами вакуумной камеры. Подробнее о явлениях ионного рассеяния рассмотрено в Приложении Б.

Положение точки *A* в любой момент времени можно описать тремя координатами: высотой *h* и углами: δ и γ. Тогда, для определения потока в соответствии с формулой (3.3), необходимо через известные величины выразить косинусы углов α и β. Из геометрических построений (Рисунок 3.2) имеем следующие отношения. По теореме косинусов:

$$(O`A`)^2 = a(\delta)^2 = L_0^2 + R^2 + 2L_0 R\cos(2\pi\text{-}\delta), \text{ м.} \tag{3.8}$$

Расстояние от центра катодного пятна до точки *A* равно $O`A = L$, где

$$L = \sqrt{a(\delta)^2 + (h - dy)^2}\ , \text{ м.} \tag{3.9}$$

Из треугольника ΔAO`A` получаем:

$$\cos\alpha = \frac{a(\delta)}{L} = \frac{a(\delta)}{\sqrt{a(\delta)^2 + (h-dy)^2}} = \sqrt{\frac{1}{1+\left(\frac{h-dy}{a(\delta)}\right)^2}}, \tag{3.10}$$

$$\cos\beta = \cos(\pi/2 - (\gamma\text{-}\varphi)) = \sin(\gamma\text{-}\varphi) = \sin(\gamma\text{-}\varphi), \tag{3.11}$$

где из треугольника ΔA`O`B` находим:

$$tg\varphi = \frac{R\sin\delta}{L_0 + R\cos\delta}. \tag{3.12}$$

Подставляя найденные отношения в формулу (3.5), получаем систему уравнений:

$$\begin{cases} v_A = \frac{m_i}{Ze\rho} j_s \left[1 + \left(\frac{h-dy}{a(\delta)}\right)^2\right]^{-\frac{1}{2}} sin(\gamma - \phi(\delta)) \\ \phi(\delta) = arctg\left(\frac{R\ sin\ \delta}{L_0 + R\ cos\ \delta}\right) \\ a(\delta) = \sqrt{L_0^2 + R^2 + 2L_0 R\ cos(-\delta)} \end{cases}; \tag{3.13}$$

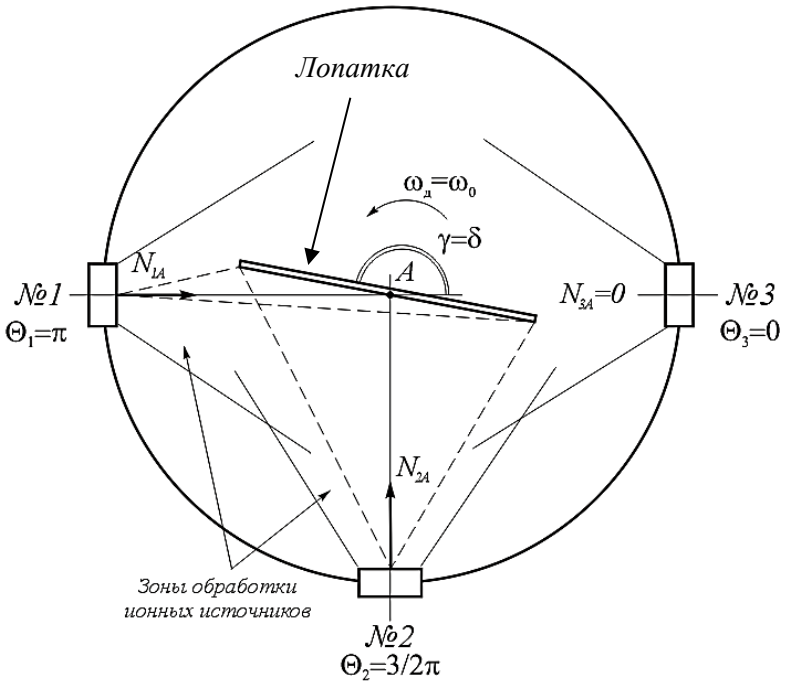
с граничными условиями, при которых ионный поток будет достигать точку *A*:

$$\begin{cases} \pi > \gamma - \varphi > 0; \\ dy \in [-L_k / 2; +L_k / 2]. \end{cases} \tag{3.14}$$

где $L_к$ – длина катода, м.

Для схемы центрального вращения детали с неподвижным точечным источником переменные: $R = 0$; $a(\delta) = L_0$; $\varphi = 0$; $\delta = 0$; $dy = 0$. Подставив их в формулу скорости конденсации ионов в точке *A* (3.13), получаем исходное выражение (3.5).

Скорости ионных потоков являются аддитивными величинами, поэтому, при использовании нескольких ионных источником их ионные потоки будут суммироваться. Таким образом, комбинируя различные сочетания геометрических размеров камеры и планетарной системы вращения деталей, можно получать частные случаи технологических схем создания многослойных композитных покрытий, основные из которых показаны на Рисунке 3.3 и Рисунке 3.4.



Номерами *1*, *2*, *3* обозначены источники ионов, остальные обозначения приведены в тексте

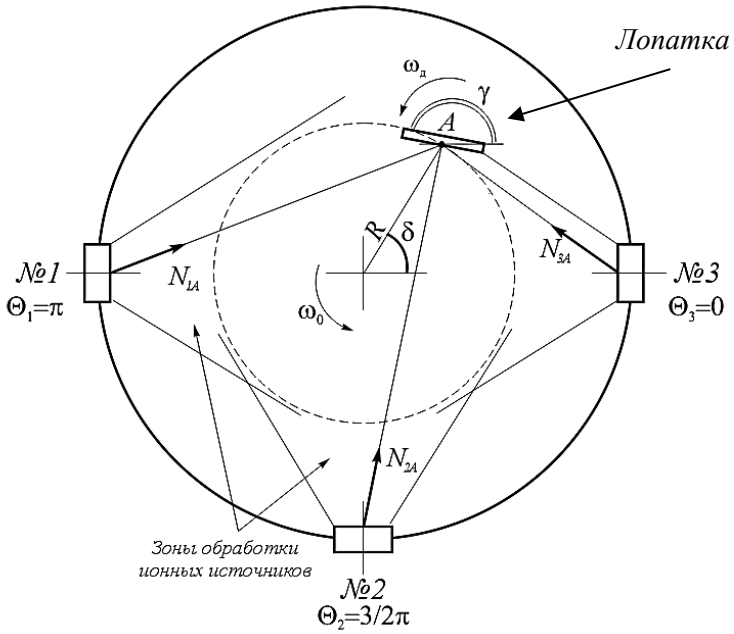
Рисунок 3.3 – Пример схемы напыления рабочей лопатки паровой турбины на установке «Ватт-900-3Д» с трех ионных источников с использованием центрального механизма вращения

Допустим, что в формировании покрытия участвуют все ионы, достигшие поверхности детали в течение некоторого времени *t*. В этом случае, для того чтобы найти суммарную толщину покрытия $H_{\Sigma A}(t)$ в заданной точке *A*, нужно проинтегрировать функцию $dv_A = f(\delta,\gamma,dy)dt$ в диапазоне от 0 до *t* для каждого ионного источника. Выразив в формуле (3.56) интегрируемые переменные через соответствующие им скорости ($d\delta = \omega_0 dt$; $d\gamma = \omega_д dt$; $dy = v_п dt$, где $v_п$ – скорость перемещения катодного пятна), получим следующую зависимость:

$$H_A(t) = \sum_{i=1}^{K} \int_0^t \langle v_a \rangle_i (\delta_i) dt, \text{ м}, \qquad (3.15)$$

где *K* – количество работающих ионных источников;

$\langle v_a \rangle_i$ – скорость конденсации потока ионов с *i*-го источника, ион/с.



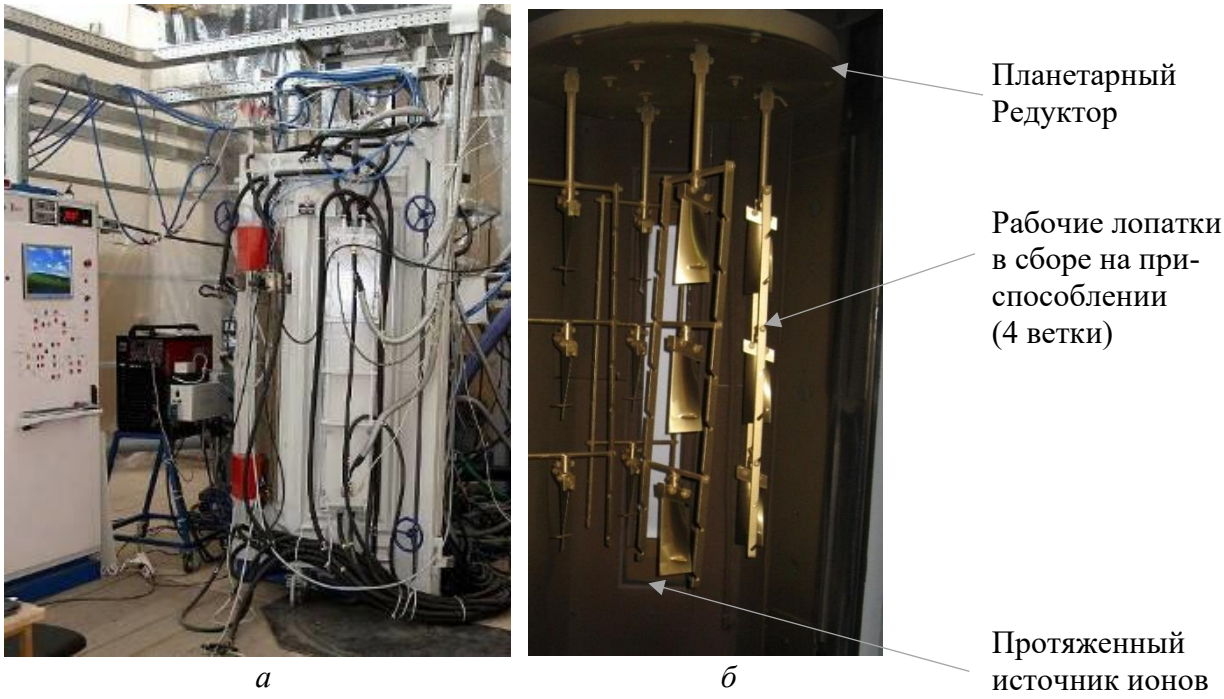
Номерами *1*, *2*, *3* обозначены источники ионов, остальные обозначения приведены в тексте

Рисунок 3.4 – Пример схемы напыления компрессорных лопаток на установке «Ватт-900-3Д» с трех ионных источников с использованием планетарного механизма вращения

Заметим, что угол поворота δ в формуле (3.13) задается относительно центральной оси камеры, поэтому при расчете скорости конденсации покрытия с произвольного *i*-го источника ионов угол δ должен быть пересчитан: $\delta_i = \pi - \theta_i + \delta$, где θ_i – угол расположения источника относительно центра камеры Рисунок 3.3 и Рисунок 3.4. Зная скорости различных ионных потоков в некоторой точке на поверхности, можно определить в каждый момент времени количественное

соотношение конденсируемых веществ и, таким образом, по известным диаграммам состояния материалов прогнозировать фазовый состав осаждаемого материала покрытия.

Рассмотрим два различных способа нанесения многослойных покрытий на рабочие лопатки компрессора и паровой турбины на вакуумной установке «Ватт-900-3Д» с тремя протяженными электродуговыми источниками ионов.



а – внешний вид установки; *б* – рабочие лопатки компрессора ГТД АЛ-31СТ, установленные на приспособлении в вакуумной камере

Рисунок 3.5 – Промышленная установка «Ватт-900-3Д» для ионно-плазменной обработки лопаток и нанесения многослойных износостойких покрытий

Для моделирования процесса нанесения покрытия приняты следующие параметры:

а) Конструкторские параметры вакуумной камеры:

– ширина катода ионного испарителя $B_{эди}$, мм 100;
– длина катода ионного испарителя $L_к$, мм 1200;
– расстояние до оси вращения L_0, мм 450;
– радиус вращения детали R, мм 300;
– передаточное отношение планетарного редуктора, u ..... от 1 до 7;

б) Технологические режимы:

– сила тока дуги $I_д$, А 40;
– частота движения катодного пятна $f_п$, мс$^{-1}$ 25;

– скорость вращения детали вокруг центральной оси ω_0, мин$^{-1}$ ... 5;

– скорость вращения детали $\omega_д = u \cdot \omega_0$, мин$^{-1}$ ..... от 5 до 35;

– напряжение смещение $U_{см}$, В 20;

– давление газов в вакуумной камере ……. от 10^{-1} до 10^{-2} Па.

В расчетах толщины покрытия и его распределения по поверхности обрабатываемой детали (рабочие лопатки компрессора и паровой турбины из титановых сплавов) приняты следующие допущения:

а) в точке соударения с поверхностью конденсируются 100% частиц без учета эффектов рассеивания и распыления материала поверхности, что справедливо для выбранных режимов напыления;

б) распыленные частицы материала катода движутся по направлению к поверхности детали прямолинейно без взаимодействия с другими частицами, т.е. при выбранном диапазоне давлений газов длина свободного пробега частицы сопоставима или больше размера вакуумной камеры, что подтверждается соответствующими расчетами по формулам Приложения Б;

в) количество капельной фазы (нейтральных микрочастиц распыленного материала размерами порядка $10^{-5}…10^{-6}$ м) не оказывает значимого влияния на процесс конденсации покрытия, что достигается применением фильтрующих и специальных элементов в конструкции ионных испарителей и подтверждается экспериментально.

г) Поверхность катода протяженного ионного источника при работе представляет собой совокупность точечных источников с одинаковыми условиями эмиссии заряженных частиц в границах катодного пятна[2].

Размер катодных пятен находится в пределах от 10^{-4} до 10^{-6} м, а времени их жизни – порядка 10^{-6} с [230]. В связи с этим можно предположить, что испарение материала происходит одновременно со всей площади катодного пятна и средняя скорость потока ионов dN_0/dt, эмитируемых неподвижным источником в пространство камеры равна:

$$\frac{dN_0}{dt} = 2\pi \int_0^{R_к} \psi(r, I_д) dr, \text{ ион/с}, \qquad (3.16)$$

где $R_к$ – радиус катодного пятна, м;

$\psi(r, I_д)$ – функция скорости эмиссии ионного источника в его произвольной точке на расстоянии r от центра катодного пятна при заданном токе дуги $I_д$, ион/с.

[2] *Катодное пятно* – область поверхности катода с равновероятностными условиями эрозии (распыления) материала, которое быстро перемещается вдоль распыляемой поверхности со скоростью порядка 10^{-8} м/с

Скорость эмиссии ионного источника может быть определена экспериментально: измерением толщины покрытия на образцах или изменения потери массы катода за известный промежуток времени. Подробнее об ионной эмиссии описано в Приложении Б.

Плотность ионного тока в области лопатки без учета влияния напряжения смещения и двойного электрического слоя будет равна:

$$j_0(L) = \frac{dN_0}{dt}\frac{eZ}{2\theta_к L^2} = 2\pi\frac{eZ}{2\theta_к L^2}\int_0^{R_к}\psi(r, I_д)dr, \text{ А/м}^2, \quad (3.17)$$

где N_0 – количество ионов, эмитируемых ионным источником в единицу времени;

e – заряд электрона, эВ;

Z – кратность заряда ионов;

$\Theta_к$ – угол разлета ионов, (определяется конструкцией ионного источника), рад.

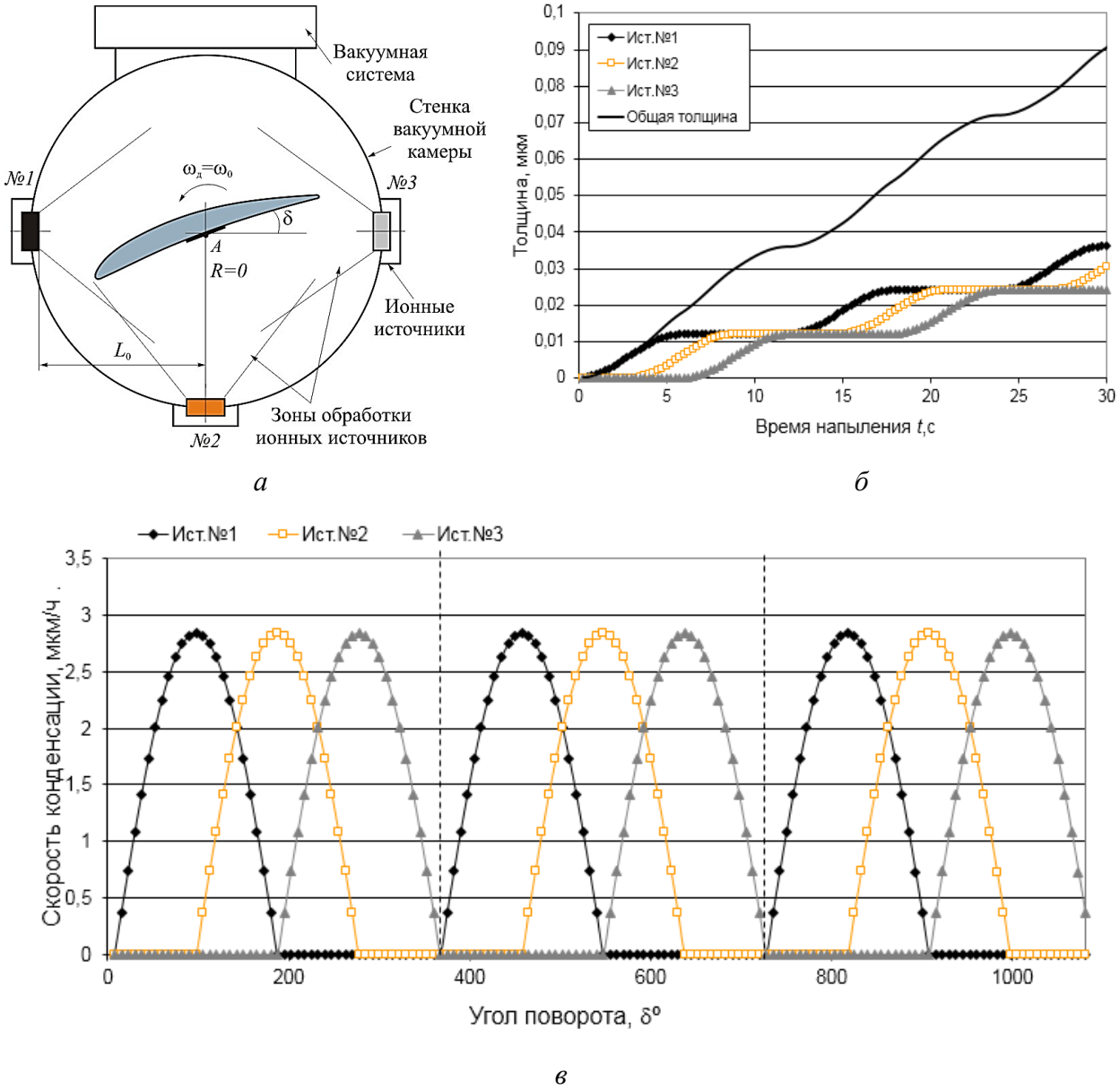
Формулы для расчета плотности ионного тока, учитывающие величину ускоряющего напряжения смещения, прикладываемого к деталям, а также процессы рассеяния и искажения электрического поля у поверхности лопаток, приведены в Приложении Б.

3.1.1 Нанесение многослойного покрытия на рабочие лопатки паровой турбины

На Рисунке 3.3 и Рисунке 3.6 а показаны схемы нанесения покрытия на поверхность пера и кромки большеразмерных рабочих лопаток последних ступеней паровой турбины типа К-1000, К-1200 производства АО «Силовые машины» (г. Санкт-Петербург). Высота лопатки составляет 1315 мм, ширина хорды по высоте пера лопатки от 250 до 200 мм. Лопатка размещена в центре камеры и вращается с постоянной скоростью так, что в точке A, расположенной в центральной части ее пера, осаждается материал одновременно с трех ионных источников (Рисунок 3.6 а). Интенсивность осаждения меняется в зависимости от угла поворота лопатки и расстояния до соответствующего источника. Конструкция установки «Ватт-900-3Д» предполагает неравномерное расположение ионных источников по периметру вакуумной камеры, вследствие этого, при каждом повороте лопатки на угол $n{\cdot}2\pi$ (где n = 0, 1, 2… и т.д.), процесс напыления кратковременно прерывается, что можно видеть на Рисунке 3.6 в.

С учетом принятых выше начальных условий и допущений, интегрируя по времени выражение скорости конденсации материалов в формуле (3.15) при одновременной работе всех трех ионных источников (K = 3), получим следующую зависимость толщины наносимого покрытия в точке А (H_A) от времени обработки, показанную на Рисунке 3.6 б. Здесь и далее для построения зависимостей толщины и скорости конденсации была разработана специальная программа для

ЭВМ, приведенная в Приложении В. Схема расчета скорости нанесения покрытия на кромки пера лопатки показана на Рисунке 3.7 а.



а *б*

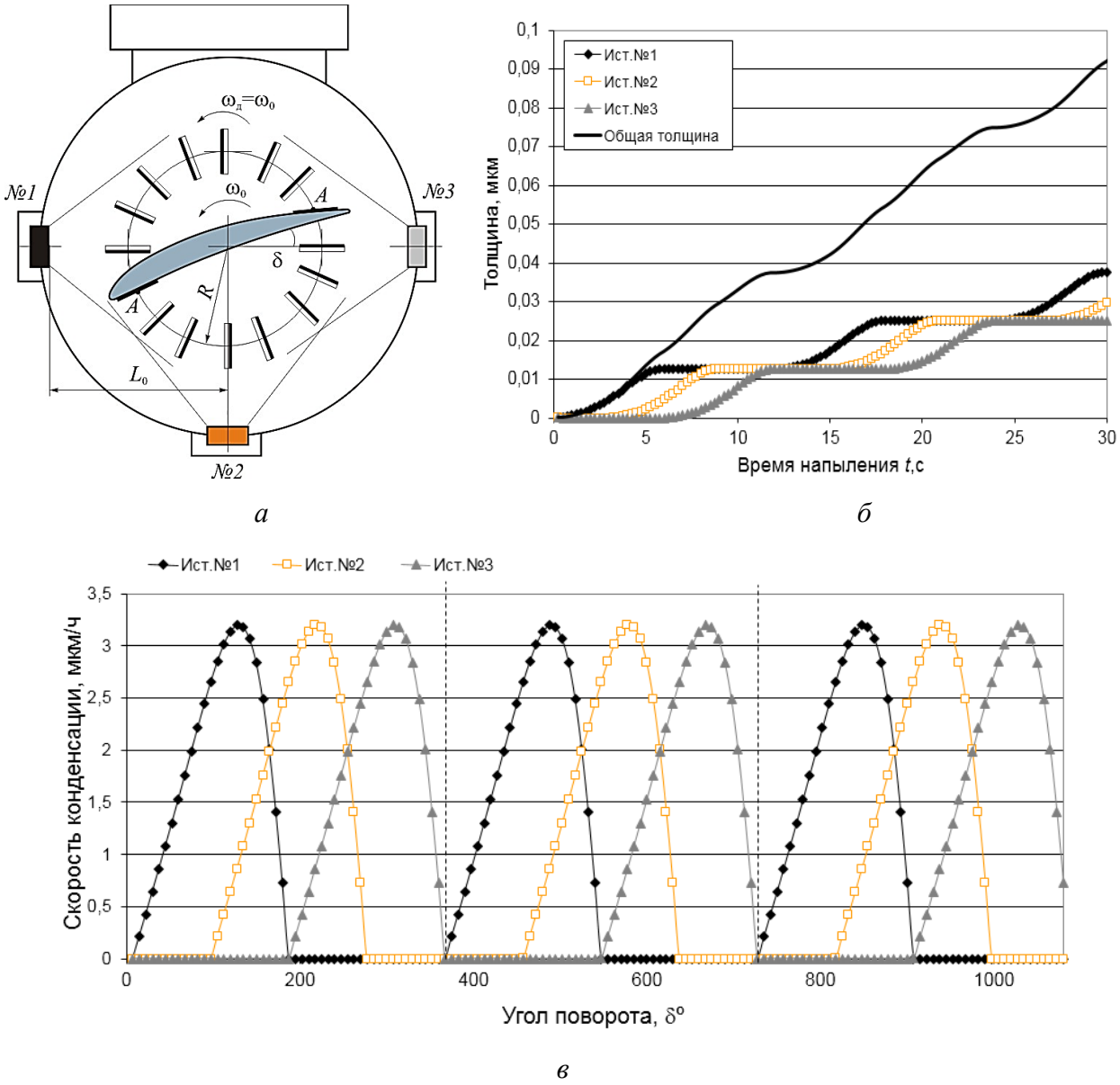
в

а – схема расчета; *б* – график толщины; *в* – график скоростей конденсации покрытия на перо рабочей лопатки паровой турбины в точке *А*

«Ист.» – электродуговой источник плазмы

Рисунок 3.6 – Нанесение покрытия на рабочую лопатку паровой турбины

(L_0 = 900 мм; R=0 мм; ω_0 = 5 мин$^{-1}$)



а *б*

в

а – схема расчета; *б* – график толщины; *в* – график скоростей конденсации покрытия на перо рабочей лопатки паровой турбины в точке *А*

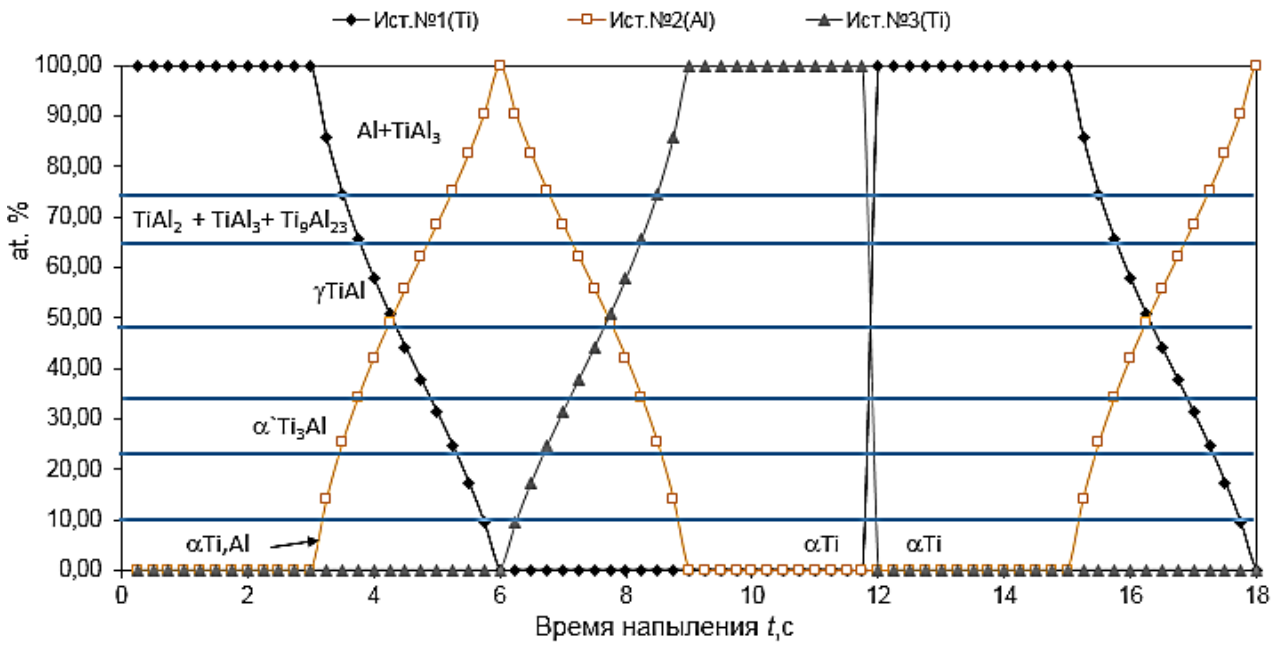
«Ист.» – электродуговой источник плазмы

Рисунок 3.7 – Нанесение покрытия на рабочую лопатку паровой турбины (L_0 = 900 мм; R=125 мм; ω_0 = 5 мин$^{-1}$)

Обрабатываемая поверхность расположена на расстоянии R от центра камеры и вращается вокруг собственной оси с угловой скоростью, равной скорости вращения лопатки относительно центральной оси: $\omega_д = \omega_0$. Радиус вращения кромок лопатки равен половине длины ее хорды R = 125 мм.В результате разворота и смещения кромок лопатки ближе к ионным источникам форма кривых скоростей конденсации, показанная на Рисунке 3.7 в, изменилась по сравнению с центральной областью лопатки (Рисунок 3.6 в), максимальная скорость конденсации материала

сместилась в сторону больших углов и увеличилась с 2,8 до 3,2 мкм/ч. Одновременно с увеличением максимальной скорости конденсации, площадь под кривыми конденсации уменьшалась, как это видно на указанных рисунках, так, что средняя скорость нанесения покрытия не изменилась (Рисунок 3.7 б и Рисунок 3.6 б). Таким образом при принятых допущениях скорость нанесения покрытия в центральной части лопатки и на ее кромках, можно принять одинаковой, равной 11±0,2 мкм/ч. На графиках видно, что при этой скорости конденсации за один оборот детали вокруг своей оси с каждого ионного источника наносится ≈ 12 нм покрытия.

Зная распределение скоростей конденсации ионов с различных источников, можно определить относительно соотношение количества конденсируемых веществ и по известным диаграммам состояния прогнозировать наиболее вероятный фазовый состав осаждаемого покрытия при условии наличия необходимого количества энергии образования химических соединений и фазовых превращений. В качестве примера на Рисунке 3.8 показана схема образования возможных интерметаллидов Ti_xAl_y при осаждении покрытия с двух титановых (сплав ВТ1-0, 99,3% Ti) и одного алюминиевого катода (сплав АД-0, 99% Al), расположенного между титановыми катодами по ходу движения деталей. На приведенной диаграмме в каждый момент времени можно определить отношение Al:Ti в % от веса и, таким образом, прогнозировать наиболее вероятное образование интерметаллидных фаз (Ti_xAl_y).



«Ист.» – электродуговой источник плазмы

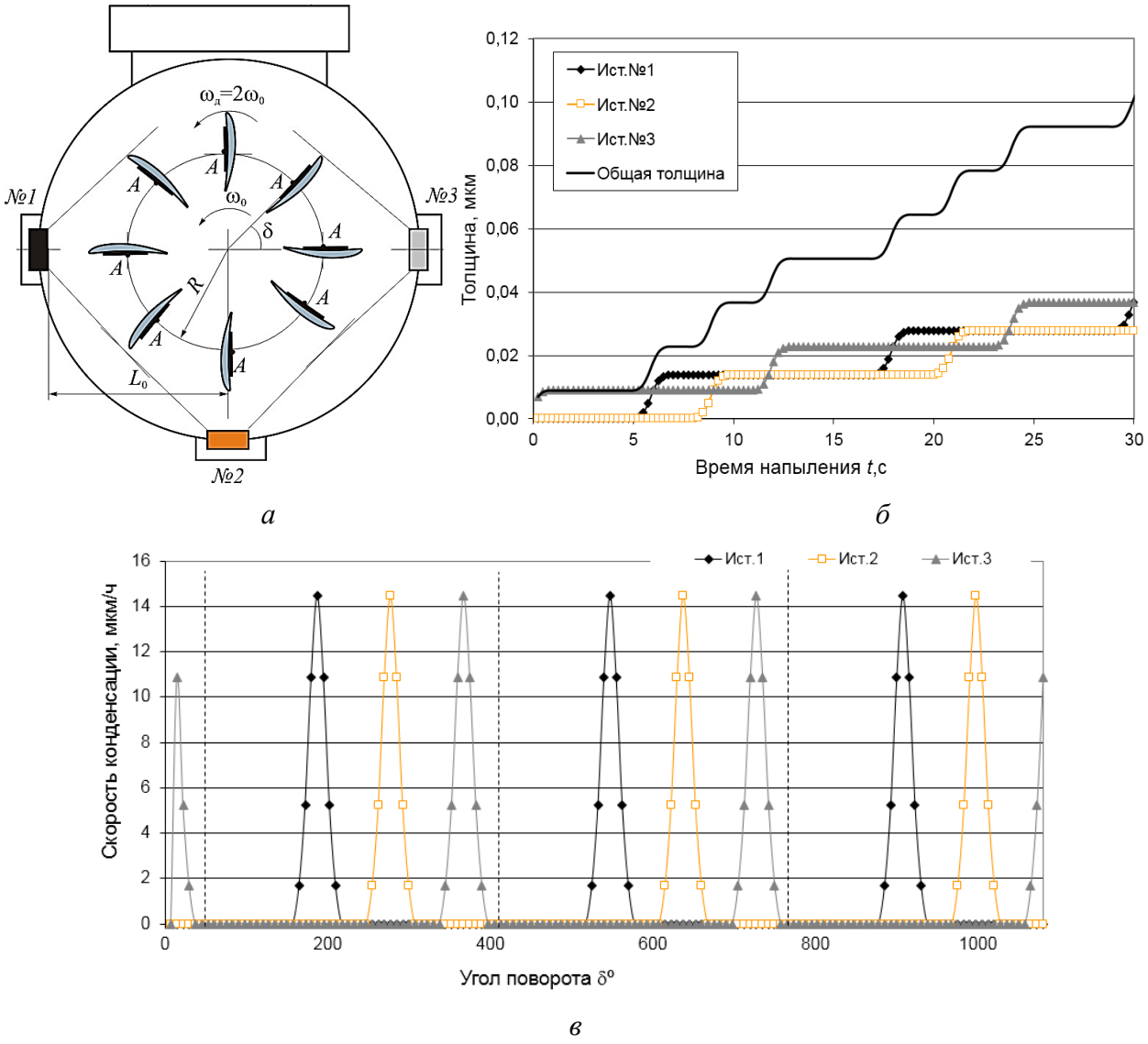
Рисунок 3.8 – Процентное соотношение количества частиц, осаждаемых с трех ионных испарителей и вероятное образование интерметаллидных фаз (к схеме обработки, показанной на Рисунке 3.6).

3.1.2 Нанесение многослойных покрытий на рабочие лопатки компрессора

Схема нанесения покрытия на рабочие лопатки компрессора ГТД АЛ-31СТ производства ПАО «ОДК-УМПО» (г. Уфа) показана на Рисунках 3.4, 3.5 и 3.9 а. Высота лопаток от 150 до 250 мм, ширина хорды по высоте пера лопатки от 50 до 75 мм. Рассмотрим осаждение покрытия на поверхность пера лопатки в сечениях, расположенных на высоте h_1 = 0 мм и h_2 = 185 мм (высота пера рабочей лопатки 2-й ступени КНД). Для крепления лопаток в вакуумной камере предусмотрен планетарный редуктор с центральным колесом и шестью сменными сателлитами. При настройке редуктора его передаточное отношение u может меняться в пределах от 1 до 5, что определяет скорость вращения лопаток вокруг собственной оси.

Зная параметры вакуумной камеры и рассчитав углы поворота детали (α, φ) относительно каждого ионного источника, по формуле (3.13) определим скорость конденсации и толщину покрытия в процессе обработки. На Рисунке 3.9 показана схема вращения лопаток с передаточным отношением редуктора u = 1, т.е. за один полный оборот вокруг центральной оси, лопатки совершают один оборот вокруг собственной оси, аналогично схеме, показанной на Рисунке 3.7 а. В процессе обработки лопатки вращаются на расстоянии R = 300 мм от оси камеры и последовательно проходят все зоны обработки ионных источников.

Скорость конденсации покрытия меняется в зависимости от угла поворота лопатки и расстояния до соответствующего источника. Из графика (Рисунок 3.9 в) видно, что при такой схеме обработки области конденсации не перекрывают друг друга и покрытие с каждого источника наносится отдельно. В рассматриваемом случае процессами диффузии конденсированных материалов можно пренебречь, поскольку температура детали в процессе нанесения ионно-плазменного покрытия не велика, в диапазоне от 300 до 500 °С, а пауза между нанесением отдельных слоев составляет от 1 до 3,5 с, что во много больше времени дрейфа по поверхности конденсированных атомов и формирования ими тонкой пленки [231, 232].Таким образом, при реализации показанной на Рисунке 3.9 а схемы напыления на поверхности лопаток будет формироваться покрытие, представляющее собой смесь тонких пленок с характерной толщиной ≈ 18 нм (Рисунок 3.9), что подтверждается экспериментально (пункт 5.5, глава 5). Средняя скорость напыления при принятых допущениях составит ≈ 13 мкм/ч, что также подтверждено экспериментально при исследовании лопаток с нанесенным покрытием (пункт 6.2, глава 6).



а *б*

в

а – схема расчета; *б* – график толщины; *в* – график скоростей конденсации покрытия на перо рабочей лопатки компрессора в точке *А*

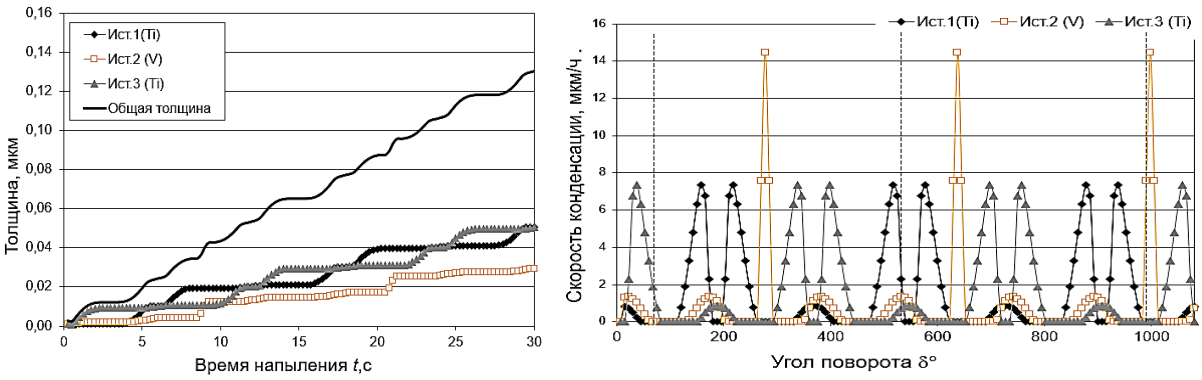
«Ист.» – электродуговой источник плазмы

Рисунок 3.9 – Нанесение покрытия на рабочую лопатку компрессора

(L_0 = 900 мм; R=300 мм; ω_0 = 5 мин$^{-1}$; $\omega_д$ = 5 мин$^{-1}$; u=1)

Изменить конструкцию покрытия можно, изменив передаточное отношение планетарного редуктора, которое, для обеспечения равномерности напыления, рекомендуется выбирать нечетным. В этом случае, деталь, сделав полный оборот вокруг оси камеры, будет обращена к источнику противоположной стороной.

Примеры сочетания ионных потоков, наносимых на детали с различным передаточным отношением (u), показаны на Рисунках 3.10-3.12.

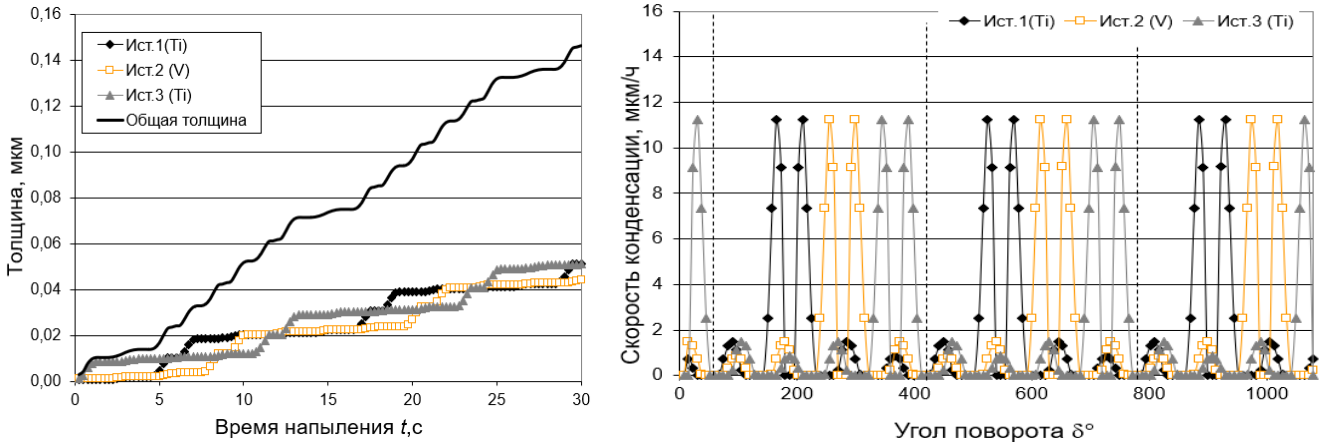


а *б*

а – график толщины; *б* – график скоростей конденсации покрытия на перо рабочей лопатки компрессора в точке *А* (к схеме обработки на Рисунке 3.4)

«Ист». – электродуговой источник плазмы

Рисунок 3.10 – Нанесение покрытия на рабочую лопатку компрессора (L_0 = 900 мм; R=300 мм; ω_0 = 5 мин$^{-1}$; $\omega_д$ = 15 мин$^{-1}$; u = 3)

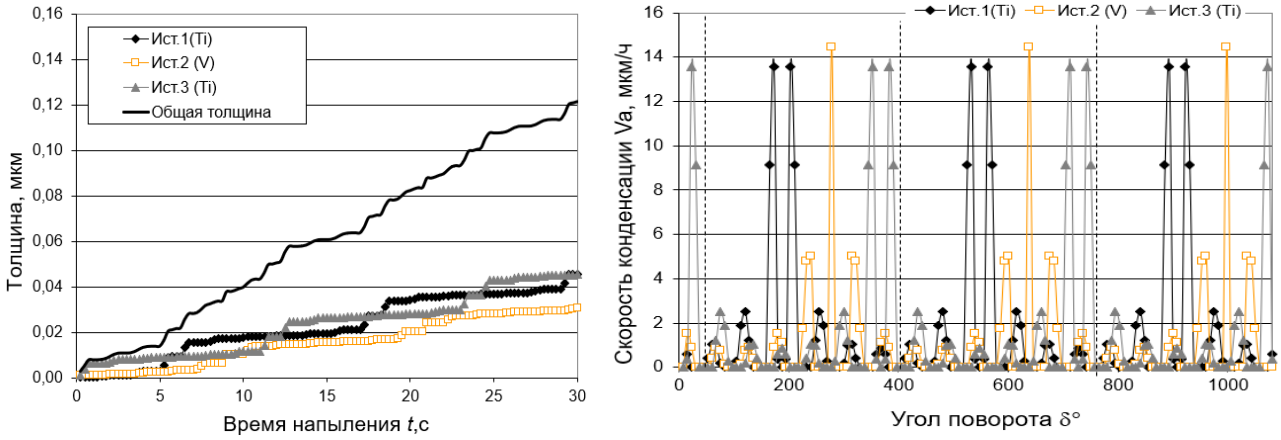


а *б*

а – график толщины; *б* – график скоростей конденсации покрытия на перо рабочей лопатки компрессора в точке *А* (к схеме обработки на Рисунке 3.4)

«Ист». – электродуговой источник плазмы

Рисунок 3.11 – Нанесение покрытия на рабочую лопатку компрессора (L_0 = 900 мм; R=300 мм; ω_0 = 5 мин$^{-1}$; $\omega_д$ = 25 мин$^{-1}$; u = 5)



а *б*

а – график толщины; *б* – график скоростей конденсации покрытия на перо рабочей лопатки компрессора в точке *А* (к схеме обработки на Рисунке 3.4)

«Ист». – электродуговой источник плазмы

Рисунок 3.12 – Нанесение покрытия на рабочую лопатку компрессора

(L_0 = 900 мм; R=300 мм; ω_0 = 5 мин$^{-1}$; $\omega_д$ = 35 мин$^{-1}$; u = 7)

Графики скоростей конденсации представляют собой чередование пиков большей и меньшей интенсивности, пропорционально расстоянию до ионных источников. Общее для всех рассматриваемых вариантов обработки является то, что в каждую единицу времени в области конденсации присутствуют частицы одновременно с нескольких катодов, что должно обеспечивать равномерный фазовый состав по толщине покрытия. нанесение покрытия при повышенной скорости конденсации материала (с ионного источника №2) показан на Рисунке 3.10 а (u=3).

Таким образом, изменяя передаточное отношение редуктора (u), можно управлять углом поворота лопатки в зоне обработки и, следовательно, скоростью осаждения покрытия с того или иного ионного источника. Пример реализации одинаковой скорости конденсации со всех ионных источников показан на Рисунке 3.11 а и Рисунке 3.9 в.

3.2 Моделирование ионно-имплантационной обработки с нескольких протяженных ионных источников, совмещенных в одном вакуумном объеме

Рассмотрим два способа ионно-имплантационной обработки рабочих лопаток паровой турбины и лопаток компрессора ГТУ на вакуумной установке «Ватт-900-3Д» с тремя протяженными электродуговыми источниками ионов. Для моделирования были приняты следующие параметры:

а) Конструкторские параметры вакуумной камеры:

– ширина катода ионного испарителя $B_{эди}$, мм 100;
– длина катода ионного испарителя $L_к$, мм 1200;
– расстояние до оси вращения L_0, мм 450;
– радиус вращения детали R, мм 300;
– передаточное отношение планетарного редуктора, u ..... от 1 до 7;

б) Технологические режимы:

– скорость вращения детали вокруг центральной оси ω_0, мин$^{-1}$ 5;
– скорость вращения детали ($\omega_д = u \cdot \omega_0$), мин$^{-1}$ ..... 5..35;
– напряжение смещение $U_{см}$, В ..... от 600 до 1500;
– сорт имплантируемых ионов ……. N^+;
– минимальная доза имплантации, ион/см^2……..….... $2 \cdot 10^{17}$;

в) Характеристики ионного источника газовой плазмы «ПИНК»:

– плотность ионного тока, мА/см^2……..….... от 10 до 15;
– диаметр ионного пучка, мм ……..…….. 300;
– рабочее давление газов, Па ……...….. от 10^0 до 10^{-1};
– остаточное давление газов, Па ……..…..... $6{,}6 \cdot 10^{-3}$.

При расчетах профиля распределения легирующей примеси, скорости набора дозы, скорости распыления и нагрева обрабатываемой поверхности приняты допущения:

а) плазменный поток, эмитируемый ионным источником, движется по направлению к поверхности детали прямолинейно без взаимодействия с другими частицами, т.е. при выбранном диапазоне давлений газов длина свободного пробега частицы сопоставима или больше размера вакуумной камеры;

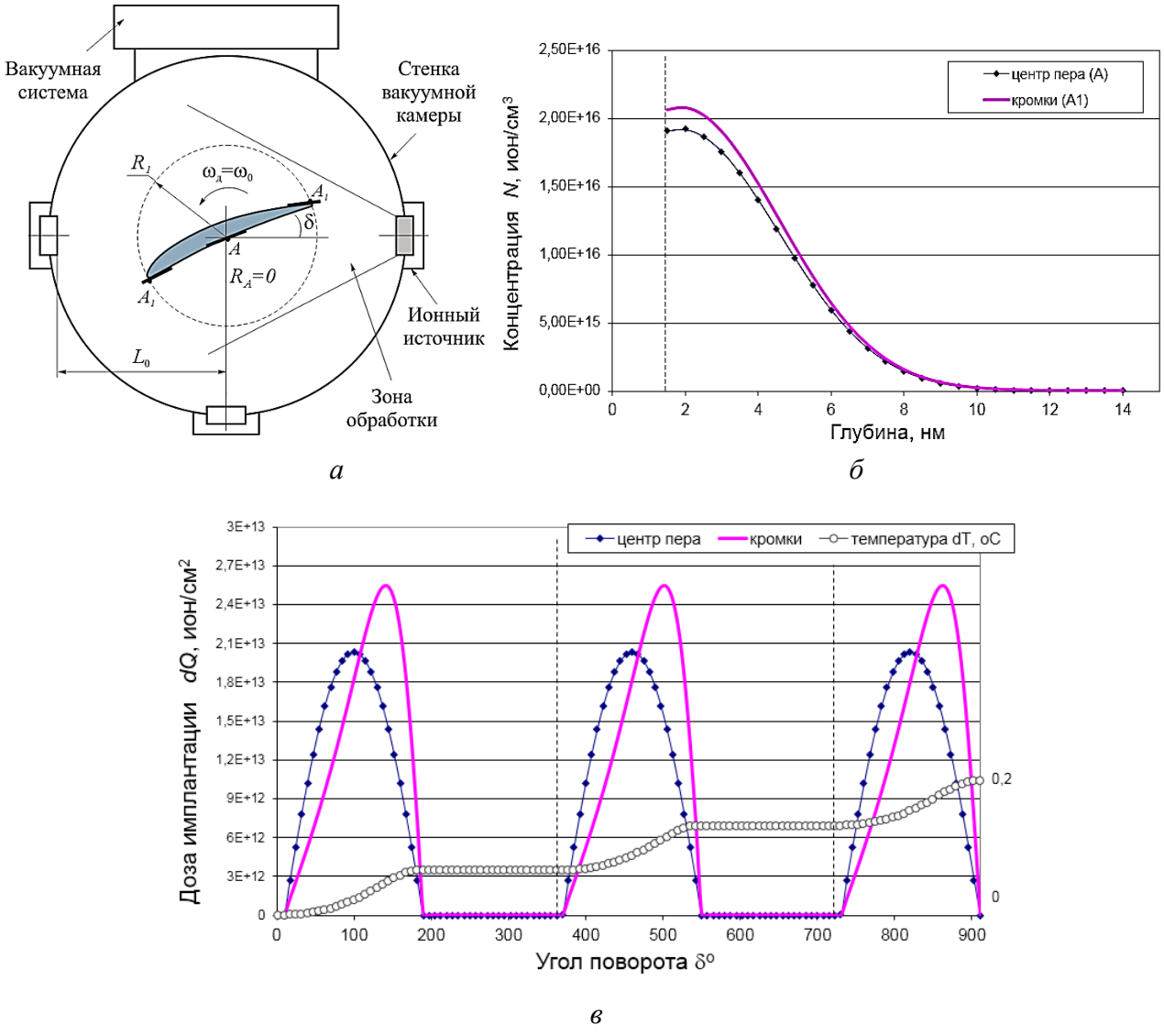
б) средняя величина энергии ионов линейно зависит от напряжения смещения: $w_i = ZeU_{см}$, при этом величиной среднего отклонения можно пренебречь, что справедливо для выбранного типа ионного источника;

в) интенсивность распыления материала поверхности изменяется обратно косинусу от угла падения ионного пучка в пределе до 80º, после чего круто падает до нуля. Подробнее закономерности ионного распыления рассмотрены в Приложении Б.

3.2.1 Ионное легирование (модификация) азотом рабочих лопаток паровой турбины

На Рисунках 3.3 и 3.13 а показана схема ионно-плазменного упрочнения поверхности пера и кромок большеразмерных рабочих лопаток последних ступеней паровых турбин типа К-1000, К-1200 ионами азота. Высота лопатки ≈ 1300 мм, ширина хорды по высоте пера лопатки от 250 до 200 мм.

Лопатка размещена в центре камеры и вращается вокруг ее оси с постоянной скоростью $\omega_д = 5$ об/мин так, что точка A, расположенная в центральной части пера лопатки, остается все время на одинаковом расстоянии от ионного источника L_0 и поворачивается к нему под разными углами $\delta \in [0; 2\pi]$. Точки A_1, расположенные в области кромок лопатки, вращаются вокруг оси камеры по радиусу $R_1 = 125$ мм, равном половине хорды лопатки, при этом расстояние до источника постоянно меняется от (L_0-R_1) до (L_0+R_1). В зависимости от расстояния до источника и угла поворота лопатки δ вокруг оси камеры была рассчитана доза имплантируемых ионов, изменение концентрации и температуры пера лопатки (Рисунок 3.13 в).



а – схема обработки; *б* – концентрация N^+; *в* – доза ионной имплантации пера рабочей лопатки паровой турбины в точках *А и* A_1

Рисунок 3.13 – Ионная обработка рабочей лопатки паровой турбины ($L_0 = 900$ мм; ширина хорды 250 мм; $\omega_0 = 5$ мин$^{-1}$)

На графике видно, что ионная имплантация происходит при углах поворота лопатки δ от 17 до 163°. При меньших углах глубина имплантированных ионов не значительна и не превышает глубину распыления поверхностных атомов. Суммарная глубина распыленной поверхности показана вертикальной линией на Рисунке 3.13 б. Наиболее интенсивное легирование материала протекает при развороте обрабатываемой поверхности нормально к ионному потоку. Для центральной области пера лопатки (точка *A*) это условие выполняется при угле поворота δ=90°, а на кромках – при δ=130° (Рисунок 3.13 а и Рисунок 3.13 в).

Время обработки было рассчитано из условия получения материалом поверхности минимальной дозы имплантации азота $Q = 2 \cdot 10^{17}$ ион/см^2 и составило $t = 215$ мин (Таблицу 3.1). При этом из графика (Рисунок 3.13 б) видно, что наибольшую дозу имплантируемых ионов за время обработки $Q_{A1} = 2{,}2 \cdot 10^{17}$ ион/см^2 получает материал в области кромок, что объясняется меньшим расстоянием до ионного источника и повышенной концентрацией ионов в области кромок вследствие большей напряженности электрического поля (подробнее об особенностях распределения заряда по перу лопатки изложено в Приложении Б).

Таблица 3.1 – Расчетные параметры ионной модификации лопаток паровых турбин

Параметры	Величина
Время обработки	215 мин
Доза имплантации в центре пера лопатки*, точка *A*, Q_A	$2{,}0 \cdot 10^{17}$
Доза имплантации на комках пера лопатки*, точки A_1, Q_{A1}	$2{,}2 \cdot 10^{17}$ ион/см^2
Неравномерность ионной имплантации по поверхности пера лопатки $\Delta Q = \lvert Q_A - Q_{A1} \rvert / Q_A$	10%
Максимальная глубина** ионной имплантации ионов N^+	10,5 нм
Глубина** максимальной концентрации легирующего вещества (N^+)	1,9 нм
Увеличение температуры лопатки за время обработки	217 ^{O}C

* Обозначение обрабатываемых поверхностей дано в соответствие Рисунку 3.13 а
** Без учета распыления поверхности

На графике (Рисунок 3.13 б) показано распределение внедренных ионов азота в центре и на кромках пера лопатки после окончания обработки. Максимальная концентрация азота наблюдается на глубине 1,9 нм (0,7 нм с учетом распыления поверхности), при этом величина дозы имплантации на глубину залегания внедренной примеси не влияет. Максимальная глубина залегания азота без учета диффузионных процессов составляет 10,5 нм.

Сопутствующими процессами при ионной имплантации являются распыление поверхности и ее нагрев. Результаты моделирования показывают, что при обработке происходит распыление атомов поверхности на глубину ≈ 1,2 нм (Рисунок 3.13 б) и ее незначительный нагрев на ≈ 0,7 °С/об (Рисунок 3.13 в). Общая температура нагрева лопатки в результате обработки составила 217 °С, что является приемлемым для деталей из титановых сплавов, работающих до температур 500-600 °С.

После ионной имплантации максимальная концентрация внедренной примеси располагается в тонком приповерхностном слое нанометровой толщины. Для перераспределения («разгонки») имплантированых частиц по глубине поверхности проводят постимплантационный отжиг деталей. Активация термической диффузии внедренных атомов, увеличивает глубину их залегания и способствует частичной рекристаллизации аморфизированной структуры кристаллической решетки. Подробнее о постимплантационном отжиге изложено в Приложении Б.

Рассмотрим вариант проведения ионно-имплантационной обработки, соответствующий схеме, показанной, на Рисунке 3.13 а, с последующим нанесением покрытия, которое сопровождается нагревом поверхности 500 ºС в течение нескольких часов.

При моделировании процессов диффузии принимали следующие допущения:

а) процесс диффузии протекает в соответствии с законами Фика при постоянном коэффициенте диффузии и постоянной температуре в диапазоне от 300 до 600 ºС;

б) переходными процессами при нагреве и остывании поверхности в диапазоне от 20 до 600 ºС можно пренебречь. Это допустимо, поскольку при обработке лопаток время их нагрева до 500 ºС составляет 10-12 минут, что намного меньше времени последующего нанесения покрытия, проводимого в течение от 120 до 300 минут.

Моделирование диффузии внедренных ионов азота при принятых условиях показывает, что наиболее активно диффузионные процессы протекают в течение первого часа после нагрева. Максимальная концентрация ионов азота в поверхности уменьшается в четыре раза, от $2 \cdot 10^{16}$ до $0{,}5 \cdot 10^{16}$ ион/см^3 при постоянной дозе имплантации $Q = 2 \cdot 10^{17}$ ион/см^3. При дальнейшем увеличении времени термообработки от 1 до 10 часов максимальная концентрация ионов азота у поверхности продолжает снижаться, но с меньшей интенсивностью (Рисунки 3.14 и 3.15 а).

Глубина внедрения азота при постимплантационном отжиге, совмещенном с нанесение покрытия, увеличивается на порядок и достигает величины более 100 нм (Рисунок 3.14). С увеличением температуры и времени термообработки глубина диффузии увеличивается экспоненциально, стремясь к своему максимальному значению. Максимальная глубина диффузии азота при принятых режимах и схеме имплантации с последующим отжигом 500 ºС в течение более

10 часов достигает от 300 до 350 нм (Рисунок 3.14, Рисунок 3.15 б). Учитывая эффект дальнодействия при ионной имплантации (описанный в Приложении Б), расчетная глубина диффузии азота при принятых условиях моделирования составляет ≈200 мкм, что подтверждается экспериментально при исследовании микротвердости по глубине упрочненного слоя (пункт 5.5, глава 5).

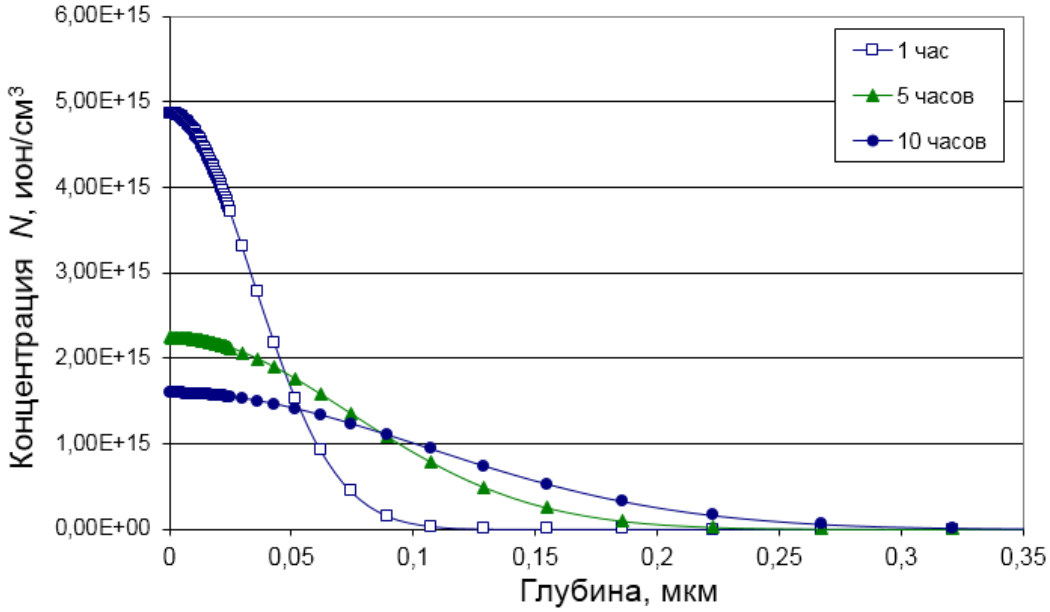
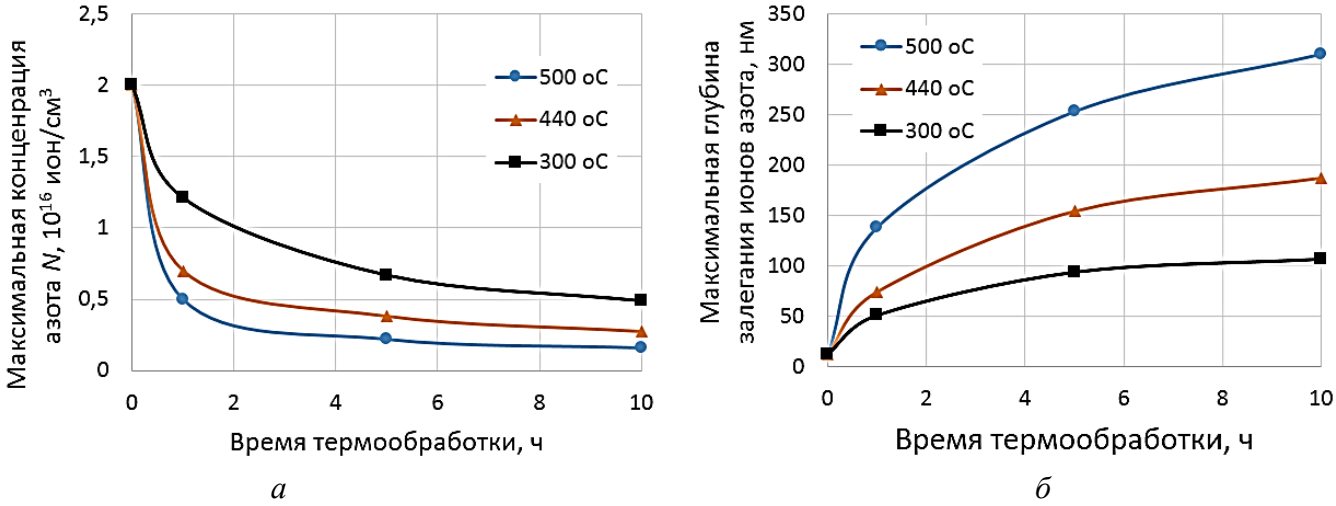


Рисунок 3.14 – Изменение концентрации ионов азота после проведения постимплантационного отжига при температуре 500 °С



а *б*

а – концентрации ионов азота; *б* – глубина диффузии азота

Рисунок 3.15 – Результаты расчетов имплантации азота в сплав ВТ6 при различных режимах термообработки лопаток паровых турбин из сплава ВТ6

3.2.2 Ионное легирование (модификация) азотом рабочих лопаток компрессора ГТУ

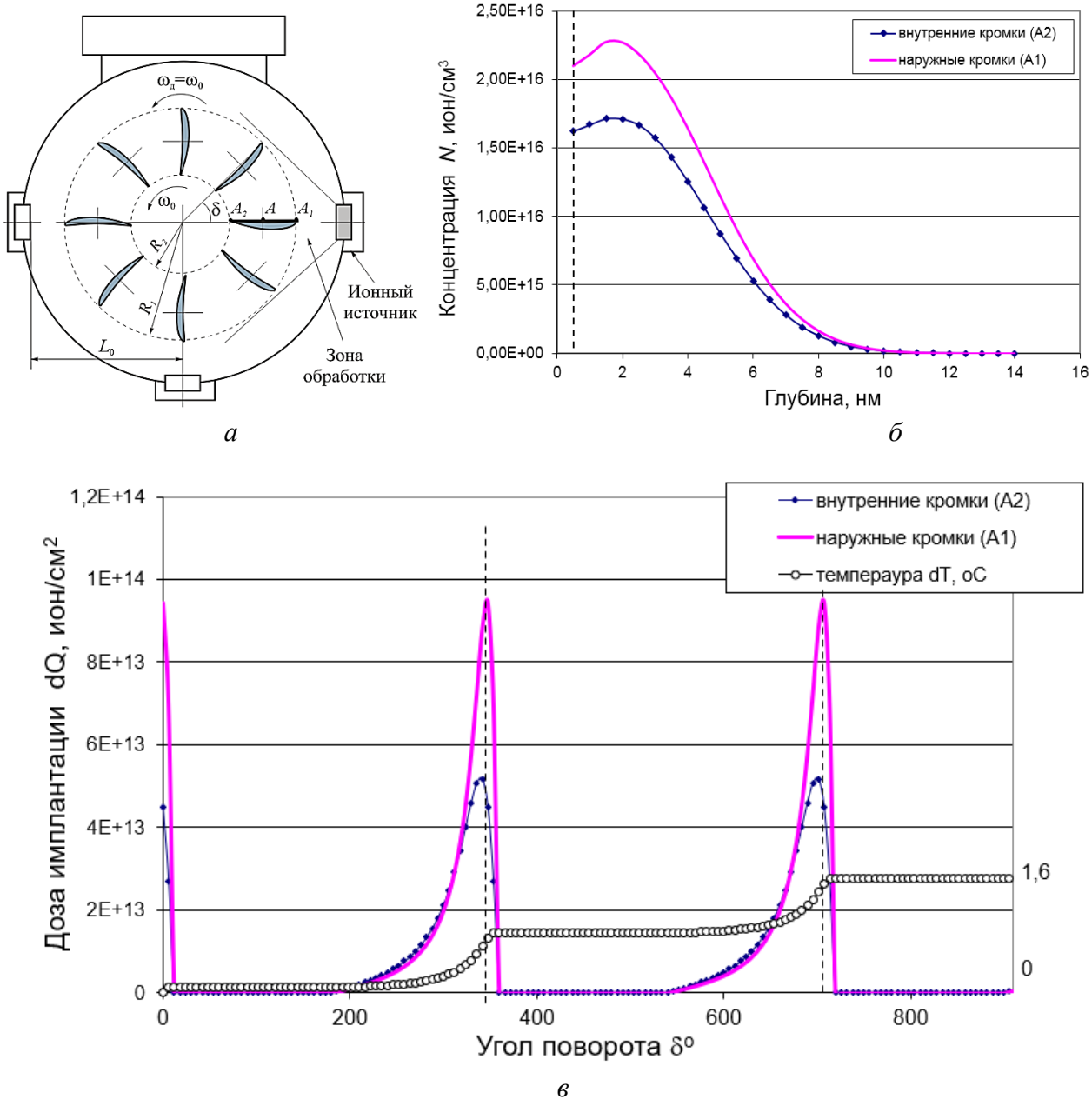
На Рисунке 3.4 и Рисунке 3.5 показаны схема ионно-плазменного упрочнения ионами азота поверхности пера и кромок рабочих лопаток компрессора газотурбинной установки АЛ-31СТ, работающей в составе газоперекачивающего агрегата ГПА-16Р «Уфа». Высота рабочих лопаток составляет от 150 до 250 мм, ширина хорды по высоте пера лопатки от 50 до 75 мм. Для крепления лопаток в вакуумной камере предусмотрен планетарный редуктор с центральным колесом и сменными сателлитами. При настройке редуктора его передаточное отношение u может меняться в пределах от 1 до 5, что определяет скорость вращения лопаток вокруг собственной оси. Зная параметры вакуумной камеры и ионного источника, рассчитав углы поворота детали относительно ионного потока, определим изменение дозы имплантации азота, температуру нагрева детали в процессе обработки и итоговый профиль залегания легирующей примеси по глубине поверхности.

На Рисунке 3.9 а показана схема вращения лопаток с передаточным отношением редуктора u=1, т.е. за один полный оборот вокруг центральной оси, лопатки совершают один оборот вокруг собственной оси. Лопатки установлены на приспособления и вращаются вокруг собственной оси, расположенной на расстоянии R=300 мм от оси камеры. Точки A_1, расположенные в области входных кромок пера лопатки, вращаются вокруг оси камеры по постоянному радиусу $R_1 = R + 37{,}5 = 375{,}5$ мм, где 37,5 мм – половина хорды лопатки. Соответственно точки A_2, расположенные в области выходных кромок, вращаются вокруг оси камеры по постоянному радиусу $R_2 = R - 37{,}5 = 262{,}5$ мм.

В зависимости от расстояния до источника и угла поворота лопатки δ вокруг оси камеры по формулам (Б.30)-(Б.37), приведенным в Приложении Б, была рассчитана доза имплантируемых ионов и увеличение температуры пера лопатки. Результаты расчетов показаны в виде графика на Рисунке 3.16 в. На графике видно, что обработка идет в импульсном режиме при нахождении лопатки в зоне обработки ионного источника. По мере сокращения расстояния до источника и увеличения угла поворота δ в диапазоне от 180 до 360° доза имплантации dQ монотонно увеличивается. Максимальную дозу имплантации dQ при угле поворота δ = 342° получают входные кромки лопаток, расположенные ближе к источнику. Далее, с увеличением угла поворота, dQ резко уменьшается, что связано с повышением интенсивности распыления материала поверхности при углах падения ионного потока близких к 80°.

Время обработки было рассчитано из условия получения материалом поверхности минимальной дозы имплантации азота Q=2·10^{17} ион/см^2 и составило t=120 мин (Таблицу 3.2). Из графика (Рисунок 3.16 б) видно, что наибольшую дозу имплантируемых ионов Q=2,2·10^{17} ион/см^2

за время обработки получает материал в области входных кромок, расположенных ближе к ионному источнику, что объясняется меньшим расстоянием до ионного источника и, следовательно, большей концентрацией легирующих ионов.



а *б*

в

а – схема обработки; *б* – концентрация N^+; *в* – доза ионной имплантации пера рабочей лопатки ГТД в точках *А и* A_1

Рисунок 3.16 – Ионная обработка рабочей лопатки паровой турбины (L_0 = 900 мм; $(R_1+R_2)/2$ = 300 мм; ширина хорды (расстояние A_1-A_2) b = 75 мм; ω_0 = 5 мин$^{-1}$; $\omega_д$ = 5 мин$^{-1}$; u = 1)

На графике (Рисунок 3.16 б) показано распределение внедренных ионов азота после окончания обработки на входных (точка A_1) и выходных (точка A_2) кромках пера лопатки. Максимальная концентрация азота на обеих кромках наблюдается на глубине 1,9 нм (или 0,7 нм с учетом распыления поверхности). Наибольшая глубина залегания азота без учета диффузионных процессов составляет 10,5 нм, при этом из графика видно, что величина дозы имплантации на глубину залегания внедренной примеси не влияет. Учитывая эффект дальнодействия при ионной имплантации с достаточно высокой для этого процесса плотностью ионного тока 10...50 мА/см^2 (подробнее об эффекте дальнодействия изложено в Приложении Б), прогнозируемая глубина упрочнения поверхности по критерию микротвердости составляет ≈ 10,5 мкм.

Сопутствующими процессами при ионной имплантации являются распыление поверхности и ее нагрев. Результаты моделирования показывают, что при обработке происходит распыление атомов поверхности на глубину ≈ 1,2 нм (показана вертикальной линией на Рисунке 3.16 б). Средняя расчетная температура нагрева исследуемых лопаток за принятое время обработки составляет ≈ 320 ºС, что подтверждается экспериментально и является допустимым для рабочих лопаток компрессора из сплава ВТ6, температура эксплуатации которых составляет 500...550 °С.

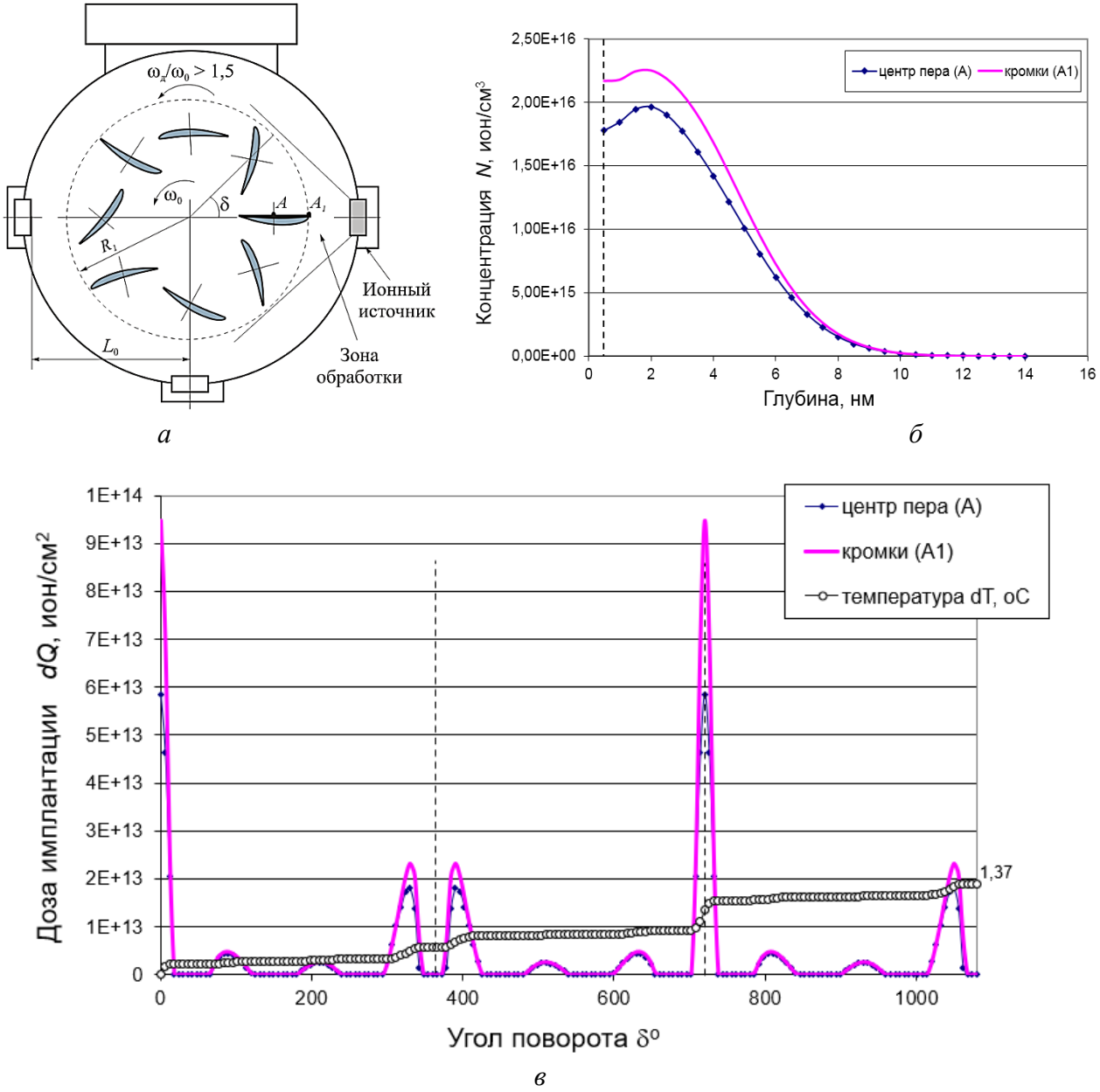
Таблица 3.2 – Расчетные параметры ионной модификации рабочих лопаток 1-й ступени компрессора ГТД АЛ-31СТ при передаточном отношении планетарного редуктора $u = 1$

Параметры	Величина
Время обработки	120 мин
Доза имплантации в центре пера лопатки*, точка A, Q_A	$2{,}0 \cdot 10^{17}$ ион/см^2
Доза имплантации на входных комках пера лопатки*, точки A_1, Q_{A1}	$2{,}3 \cdot 10^{17}$ ион/см^2
Доза имплантации на выходных комках пера лопатки*, точки A_2, Q_{A2}	$1{,}7 \cdot 10^{17}$ ион/см^2
Неравномерность ионной имплантации по поверхности пера лопатки $\Delta Q = \lvert Q_{A1} - Q_{A2} \rvert / Q_A$	30%
Максимальная глубина** ионной имплантации ионов N^+	10,5 нм
Глубина** максимальной концентрации легирующего вещества (N^+)	2 нм
Увеличение температуры лопатки за время обработки	320 °С

* Обозначение обрабатываемых поверхностей дано в соответствие Рисунком 3.16 а

** Без учета распыления поверхности

Для сравнения рассмотрим еще один способ обработки, при котором скорость вращения лопаток вокруг собственной оси будет отличаться от скорости вращения вокруг оси камеры. При такой обработке лопатки, перемещаясь в зоне обработки ионного источника, поворачиваются к нему под различными углами (Рисунок 3.17 а).



а *б*

в

а – схема обработки; *б* – концентрация N^+; *в* – доза ионной имплантации пера рабочей лопатки ГТД в точках *A* и A_1

Рисунок 3.17 – Ионная обработка рабочей лопатки паровой турбины (L_0 = 900 мм; $(R_1+R_2)/2$ = 300 мм; ширина хорды (расстояние A_1-A_2) *b* = 75 мм; $\omega_0 = 5$ мин$^{-1}$; $\omega_д = 17{,}5$ мин$^{-1}$; *u* = 3,5)

Для обеспечения равномерности обработки, передаточное отношение планетарного редуктора рекомендуется выбирать из отношения $u = 1{,}5\,n$, где $n = 1, 3, 5\ldots$ и т.д. В этом случае, лопатка, сделав полный оборот вокруг оси камеры, повернется к ионному источнику своей противоположной стороной. Результаты моделирования процесса ионной имплантации при вращении лопаток с передаточным отношением планетарного редуктора $u = 3{,}5$ показаны на Рисунке 3.17 и приведены в Таблице 3.3.

В зависимости от расстояния до источника и угла поворота лопатки δ вокруг оси камеры была рассчитана доза имплантируемых ионов и увеличение температуры пера лопатки (Рисунок 3.17 в). На графике видно, что обработка идет в импульсном режиме, при этом величина импульсов изменяется в зависимости от угла поворота лопатки относительно ионного пучка. По сравнению с предыдущей схемой обработки (Рисунок 3.16 в), максимальная величина дозы имплантации dQ при прохождении зоны обработки остается на прежнем уровне $\approx (6\ldots9)\cdot10^{13}$ ион/см^2, при этом ширина импульсов в угловом выражении уменьшается в два раза. Это объясняется тем, что при увеличении передаточного отношения u (в рассматриваем случае с 1 до 3,5) соответственно увеличивается скорость вращения детали в зоне обработки и уменьшается время ионного воздействия на лопатку в зоне обработки. Еще одним отличием является присутствие на графике пиков dQ меньшей величины (например, при повороте на угол δ=90°, 216°, 336° и др. (Рисунок 3.17). Это свидетельствует о воздействии ионного пучка на поверхность лопатки под различными углами на сравнительно большем расстоянии и от ионного источника.

Расчетное время ионной имплантации лопаток компрессора до получения ими дозы имплантации азота $Q = 2\cdot10^{17}$ ион/см^2 составило $t = 115$ мин (Таблица 3.3). Из графика, показанного на Рисунке 3.17 б, видно, что наибольшую дозу имплантируемых ионов $Q = 2{,}3\cdot10^{17}$ за время обработки получает материал в области кромок, которые проходят зону обработки ближе к ионному источнику, чем центральная область пера и, следовательно, обрабатываются с большей интенсивностью.

На графике (Рисунок 3.17 б) показано распределение внедренных ионов азота после окончания обработки в центре пера лопатки (точка A) и на ее кромках (тока A_1). Максимальная концентрация азота в обоих точках наблюдается на глубине ≈ 2 нм (1,5 нм с учетом распыления поверхности. Величина распыления показана на графике вертикальной линией). Наибольшая глубина залегания азота без учета диффузионных процессов составляет ≈ 11 нм.

Сопутствующими процессами при ионной имплантации являются распыление поверхности и ее нагрев. Результаты моделирования показывают, что при обработке происходит распыление атомов поверхности на глубину ≈ 0,5 нм (Рисунок 3.17 б) и ее незначительный нагрев на

≈ 1,4 ºС/об (Рисунок 3.17 в). Средняя расчетная температура нагрева лопаток в результате обработки составила 262 ºС, что является не значительным для рабочих лопаток компрессора из сплава ВТ6. Необходимо отметить, что с увеличением передаточного отношения (u) температура имплантации уменьшается, что объясняется более короткими импульсами набора дозы dQ и меньшим временем ионного воздействия.

Таблица 3.3 – Расчетные параметры ионной модификации рабочих лопаток 1-й ступени компрессора АЛ-31СТ при передаточном отношении планетарного редуктора $u > 1$

Параметры	Величина
Время обработки	116,5
Доза имплантации в центре пера лопатки*, точка A, Q_A	$2{,}0\cdot10^{17}$ ион/см^2
Доза имплантации на входных комках пера лопатки*, точки A_1, Q_{A1}	$2{,}3\cdot10^{17}$ ион/см^2
Неравномерность ионной имплантации по поверхности пера лопатки $\Delta Q=\lvert Q_{A1}-Q_A\rvert/Q_A$	15%
Максимальная глубина** ионной имплантации ионов N^+	11 нм
Глубина** максимальной концентрации легирующего вещества (N^+)	2 нм
Увеличение температуры лопатки за время обработки	262 ºС

* Обозначение обрабатываемых поверхностей дано в соответствие Рисунком 3.17 а

** Без учета распыления поверхности

Рассмотрим вариант проведения обработки, соответствующий схеме, показанной, на Рисунке 3.17, с последующим нанесением покрытия, которое сопровождается нагревом поверхности до ≈ 500 ºС в течение нескольких часов.

Моделирование диффузии внедренных ионов азота при принятых условиях показывает, что наиболее активно диффузионные процессы протекают также в течение первого часа после нагрева. Максимальная концентрация ионов азота в поверхности уменьшается в два раза, от $(2{,}0...2{,}3)\cdot10^{16}$ до $0{,}9\cdot10^{16}$ ион/см^3 при постоянной дозе имплантации $Q = 2\cdot10^{17}$ ион/см^3. При дальнейшем увеличении времени термообработки от 1 до 10 часов максимальная концентрация ионов азота у поверхности продолжает снижаться, но с меньшей интенсивностью (Рисунки 3.17 и 3.18 а).

Глубина внедрения азота при постимплантационном отжиге, совмещенном с нанесение покрытия, увеличивается на порядок и может достигать более 100 нм, как это показано на Рисунке 3.18. С увеличением температуры до 500 ºС и суммарном времени термообработки до

10 часов глубина диффузии увеличивается экспоненциально, стремясь к своему максимальному значению 250-300 нм (Рисунок 3.18).

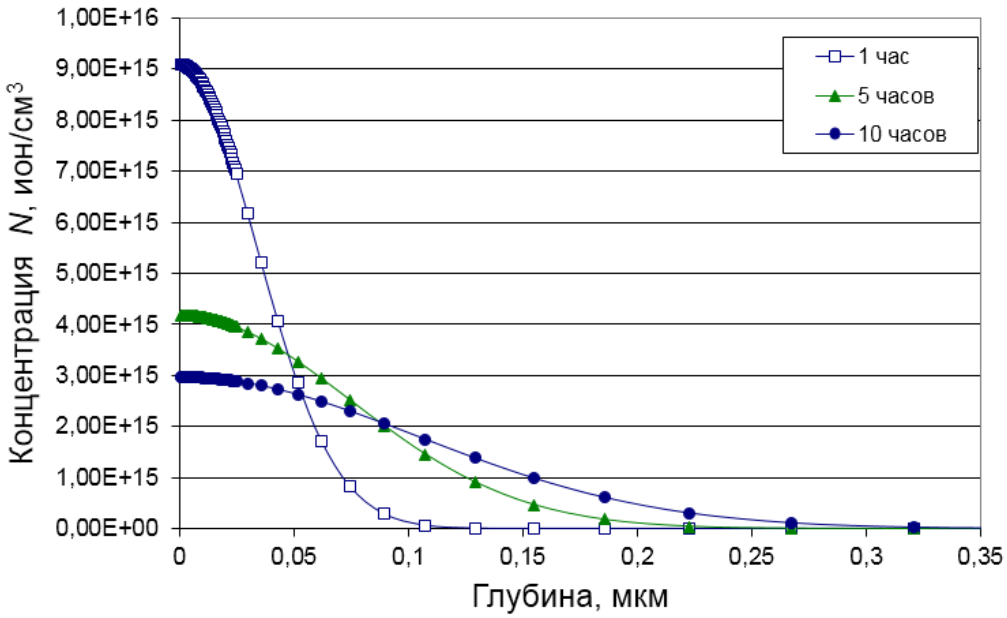
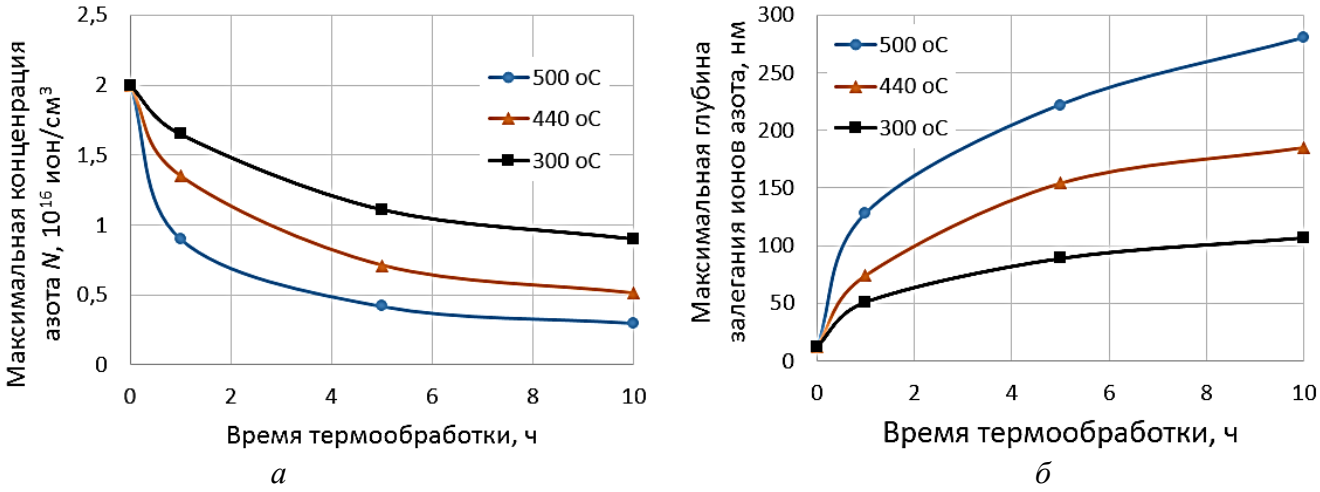


Рисунок 3.18 – Изменение концентрации ионов азота после проведения постимплантационного отжига при температуре 500 °С

Установленные закономерности изменения концентрации имплантированного азота и глубины его залегания от времени нагрева показаны на Рисунке 3.19. Максимальная глубина диффузии при температуре 500 ºС и выдержке от 1 до 10 ч составляет от 120 до 280 мкм, что косвенно подтверждается экспериментально по глубине изменения микротвердости (пункт 5.5, глава 5). Подробнее о процессе ионного поверхностного легирования (модификации) изложено в Приложении Б.

При сравнении двух схем проведения обработки деталей: с центральным вращением (Рисунок 3.16 а) и с планетарным (Рисунок 3.17 а), можно отметить, что ионно-лучевое воздействие на поверхность в обоих случаях носит периодический, импульсный характер. Наиболее интенсивная обработка, включающая в себя ионную имплантацию и последующее нанесение покрытия, протекает при планетарной схеме вращения лопаток. При этой схеме детали, вращаясь вокруг своей оси, проходят область обработки при минимально возможном расстоянии до ионных источников. В этих условиях заданная доза имплантации и толщина покрытия обеспечивается за более короткое время воздействия ионным пучком. Скорость нанесения покрытия увеличивается в ≈ 5 раза (сравнить графики на Рисунке 3.6 б и Рисунке 3.9 б), а скорость набора дозы легирования при имплантации – в ≈ 2 раза (сравнить графики на Рисунке 3.13 в и Рисунке 3.17 в).



а – концентрации ионов азота; *б* – глубина диффузии азота

Рисунок 3.19 – Результаты расчетов имплантации азота в сплав ВТ6 при различных режимах термообработки лопаток компрессора ГТД из сплава ВТ6

Еще одной особенностью обработки является то, что постимплантационный отжиг, совмещенный с нанесением покрытия, также протекает в условиях импульсного нагрева. С одной стороны, это обеспечивает поддержание постоянной средней температуры детали без ее интенсивного нагрева, а с другой – обеспечивает диффузионную подвижность внедренных ионов азота при обеспечении заданной концентрации легированной примеси. Так, при принятых начальных и граничных условиях моделирования, следует ожидать, что диффузия азота в процессе постимплантационного отжига при температуре 500 ºС в течении 10 часов достигнет глубины до 300 нм при снижении максимальной концентрации азота в приповерхностной области с $2{,}1 \cdot 10^{16}$ до $0{,}6 \cdot 10^{16}$ ион/см^3 (Рисунок 3.19).

3.3 Выводы по главе 3

1 Предложены новые аналитические модели процессов комплексной вакуумной ионно-плазменной обработки: ионного нагрева, распыления, ионного поверхностного легирования (имплантации) и конденсации с учетом особенностей формирования ионного пучка при обработке рабочих лопаток компрессора ГТД и паровых турбин.

2 Разработана математическая модель формирования на лопатках газовых и паровых турбин многослойных вакуумных ионно-плазменных покрытий, позволяющая прогнозировать скорость нанесения покрытия, дозу ионной имплантации и температуру ионного нагрева при одновременной работе нескольких протяженных ионных источников. Предложены схемы обработки деталей при их сложном кинематическом вращении вокруг собственной оси и оси камеры, позволившие установить закономерности изменения в процессе обработки: толщины наносимого

покрытия, профиля концентрации имплантируемой примеси и количественного соотношения веществ, конденсируемых на поверхность.

3 Разработана математическая модель ионно-имплантационной обработки с нескольких протяженных ионных источников, совмещенных в одном вакуумном объеме, позволяющая проводить численный прогноз распределения легируемой примеси в обрабатываемой поверхности, в т.ч. с учетом последующей термической обработки.

4 Для численной реализации математических моделей нанесения многослойных покрытий и ионной имплантации разработана специальная компьютерная программа, позволяющая:

а) проводить численное интегрирование аналитических зависимостей по времени и, таким образом, строить графические зависимости толщины нанесения покрытий и профиля концентрации имплантированной примеси от времени и температуры обработки;

б) определять соотношение различных конденсируемых материалов и прогнозировать наиболее вероятный фазовый состав осаждаемого покрытия при условии наличия необходимого количества энергии образования химических соединений и фазовых превращений.

5 Анализ разработанных схем обработки деталей: с центральным и с планетарным вращением, позволил установить, что ионно-лучевое воздействие на поверхность во всех случаях носит периодический, импульсный характер. Наиболее интенсивная обработка, включающая в себя ионную имплантацию и последующее нанесение покрытия при температуре 500 °С, протекает при планетарной схеме вращения лопаток. При этой схеме детали, вращаясь, проходят область обработки при минимально возможном расстоянии до ионных источников и при минимальных углах падения ионных потоков. В этих условиях скорость нанесения покрытия увеличивается в ≈ 5 раз, а скорость набора дозы легирования при имплантации – до двух раз.

6 Результаты теоретических исследований процесса формирования многослойных композиционных покрытий были использованы при разработке новых способов упрочнения лопаток из титановых сплавов, на которые получен более десятка патентов на изобретения РФ, приведенные в автореферате на диссертационную работу.

ГЛАВА 4
ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ

4.1 Основные материалы, выбранные для исследования

Исследуемые покрытия в настоящей работе разрабатывались для упрочнения рабочих лопаток последних ступеней ЦНД турбин К-800, К-1000, К-1200 и рабочих лопаток компрессора ГТД наземного применения АЛ-31СТ, изготавливаемые из двухфазного (α+β)-титанового сплава ВТ6 по ГОСТ 19807-91. По данным ФГУП «ВИАМ» [233, 234] сплав ВТ6 (Ti-6Al-4V) является одним из наиболее универсальных титановых сплавов, рекомендуемом для изготовления деталей авиационного двигателестроения и энергетического машиностроения – это диски, лопатки, детали статора, кольца, корпуса и другие детали, работающие при температуре до 500 °С.

ВТ6 – высокопрочный титановый сплав с двухфазной (α+β)-структурой, легированный алюминием и ванадием в качестве β-стабилизатора. Алюминий в титановых сплавах является стабилизатором α-фазы при нормальной и повышенной температурах, увеличивает термическую стабильность β-фазы, а также снижает плотность (α+β)-сплавов, что позволяет удерживать ее на уровне α-титана [235]. Чем больше β-фазы содержится в структуре сплава, тем он прочнее в отожженном состоянии и сильнее упрочняется при термической обработке. Химический состав титанового сплава ВТ6 представлен в Таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Химический состав элементов титанового сплава ВТ6 ГОСТ 19807-91

Марка	Химический состав, %										
	Ti	Al	V	Zr	Si	Fe	O	H	N	C	Проч.
ВТ6	Осн.	5,3…6,8	3,5…5,3	0,3	0,10	0,60	0,20	0,015	0,05	0,10	0,30

Для изготовления деталей из сплава ВТ6 в производстве используют полуфабрикаты в виде катаных прутков, штамповок дисков, раскатных колец, штамповок лопаток и листов, поставляемых по отраслевым стандартам, например ОСТ1 90107–73 «Прутки кованые из титановых сплавов». Механические свойства прутков приведены в Таблице 4.2.

Кроме лопаток паровых турбин и компрессора ГТД объектами испытаний в настоящей работе приняты следующие образцы, имитирующие свойства исследуемых деталей и покрытий:

а) *лабораторный образец*, используемый для проведения определенного вида лабораторного испытания. Лабораторные образцы изготавливают из материала детали для последующего

нанесения исследуемых вариантов покрытий. Исходная шероховатость, качество поверхности и состояние основного материала для всех лабораторных образцов обеспечивается применением одной технологии изготовления, включающей в себя размерную обработку на токарном и фрезерном станках с последующим шлифованием, термическую обработку для снятия остаточных напряжений и окончательное полирование до шероховатости Ra 0,8. Как правило, лабораторные образцы изготавливают электроэрозионной вырезкой из исследуемых деталей;

б) *образец-свидетель* – лабораторный образец, обрабатываемый в одном технологическом цикле с деталями или другими образцами для контроля заданных свойств, обеспечиваемых технологическими режимами обработки;

в) *технологический образец (деталь)* – полноразмерная деталь, обрабатываемая для проведения испытаний на усталостную прочность или специальных стендовых испытаний с целью подтверждения служебных свойств исследуемых покрытий.

Таблица 4.2 – Механические свойства заготовок из титанового сплава ВТ6 ОСТ1 90107–73

Марка материала	Временное сопротивление разрыву, МПа	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %	Ударная вязкость, кгс·м/см^2	Твердость по Бринеллю (100/3000), мм
ВТ6	850...1070	6,0	20,0	3,0	∅3,3...3,8

Примечание – Свойства даны для отожженных образцов, вырезанных вдоль волокон прутка

4.1.1 Материалы образцов

Для изготовления образцов использовали прутки из сплава ВТ6 ОСТ1 90107–73 производства ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА» диаметром 20 мм и длиной 1000 мм. Термическая обработка заготовок проводилась по лопаточной технологии и включала предварительный нагрев до 950±10 °С (Тпп $\alpha \rightarrow \beta$) в течение 20 мин и последующую выдержку при 675±10 °С в течение 4 ч в контролируемой среде. После такой термообработки в структуре сплава ВТ6 образуется мартенсит (α`-фаза) и сравнительно небольшое количество β-фазы (5…25%) [235].

Последующая обработка заготовок включала в себя операции: фрезерование, механическое полирование с шероховатостью Ra 0,8 и окончательную термообработку для снятия остаточных напряжений: температура нагрева 500±10 °С, выдержка в печи 2 ч в воздушной среде. Образованную при термообработке окисную пленку удаляли ручным полированием войлочными кругами с полировальной пастой или проведением электролитно-плазменной обработки (ЭПП). ЭПП образцов проводили в электролите (слабоконцентрированный 5% водный раствор KF и

NH_4F) при напряжении электрического тока между деталью и электролитом 320...350 В. Полирование образцов вели при величине тока от 0,2 до 0,5 А/дм^2, при температуре от 70 до 90 °С, в течение 5 минут. После обработки на поверхности образцов формировалась шероховатость Ra 0,1 с характерным зеркальным металлическим блеском.

Непосредственно перед нанесением покрытия образцы проходили ультразвуковую мойку в 10% щелочном растворе технического моющего средства «Грин-Юниклин» ТУ 2383-006-26788126-2003 и обезжиривание в органическом растворителе «Нефрас» ТУ 38.401-67-108-92.

4.1.2 Материалы для нанесения многослойных ионно-плазменных покрытий

На образцы было нанесено несколько вариантов многослойных ионно-плазменных покрытий. В качестве основного материала покрытий был выбран титан, имеющий максимально близкие физико-механические свойства к основному материалу деталей и образцов (сплаву ВТ6), что обеспечивало максимальную адгезионную прочность сцепления покрытия с обрабатываемой поверхностью и минимальный уровень остаточных термических напряжений в покрытиях. В качестве дополнительного материала покрытия, наносимого совместно с титаном, выбирали один или несколько переходных металлов IV-V группы периодической таблицы Менделеева (Cr, Zr, V, Al, Mo и другие), способные формировать нитридные фазы, а также являться стабилизатором β-фазы титана, обеспечивая повышение механических свойств основного материала покрытия.

Нанесение композиционных многослойных ионно-плазменных покрытий на исследуемые образцы и детали проводили на специальных вакуумных установках «Ватт-900-3Д» и «ВУ-2М», оснащенных ионным источником газов с энергиями до 20 кэВ, протяженными электродуговыми испарителями и магнетронными распылительными системами, что позволило в одном вакуумном цикле проводить ионную имплантацию, осаждение многокомпонентных многослойных покрытий в условиях ассистирования ионами азота и аргона. Подробнее о технологии формировании исследуемых ионно-плазменных покрытий в главе 6.

Металлическую плазму в камере вакуумной установки получали путем распыления катодов протяженных электродуговых испарителей. Режимы нанесения покрытия приведены в Таблице 4.3. Для распыления металлов и их последующего осаждения на обрабатываемые поверхности использовали катоды из следующих материалов:

а) титановый сплав ВТ1-0 (содержание титана 99,8 вес.%);

б) титановый сплав ВТ20 (TiAlZrMoV, содержание титана более 84,2 вес.%);

в) ванадиевый сплав ВНМ-1 (V 99,9 вес.%);

г) циркониевый сплав Э-110 (Zr 98,8 вес.%);

д) сплав Ti/Al (53/47 вес.%).

Таблица 4.3 – Режимы нанесения ионно-плазменных покрытий на установке Ватт-900-3Д

Параметр	Значение
Габариты вакуумной камеры	∅980 х 1900 мм
Схема вращение деталей	Планетарное
Крепление деталей	Вертикальное
Количество электродуговых источников плазмы (ЭДИ)	3 шт.
Размеры катодов ЭДИ	1200 х120х30 мм
Расстояние от лопаток до катода	не менее 150 мм
Ионная модификация поверхности ионами азота	$U_{см}$ = 950...1500 В; I_u = 1,5...2,0 А; T < 280±10 °С
Ионная очистка ионами титана	$U_{см}$ = 600...950 В; I_u = 19...21 А; T = 390..410 °С
Нанесение ионно-плазменных покрытий	$U_{см}$ ≈ 180 В; I_u = 28...31 А; T = 350...380 °С; P_{N2} = (4...6)·10^{-2} Па
Максимальная температура нагрева, контроль по фото-пирометру	T_{max} =500±10 ºС
Температура охлаждения в вакууме	T_0 =150±10 ºС

Примечания – $U_{см}$ – напряжение смещения; I_u – ток дуги, А; T – контролируемая температура нагрева деталей; P_{N2} – давление азота.

Химический состав элементов использованных для нанесения покрытий катодов приведены в Таблице 4.4. В качестве реакционного газа для получения в покрытии слоев нитридов распыляемых металлов использовали азот особочистый ГОСТ 9293-74.

Для обозначения исследуемых многослойных ионно-плазменных покрытий в настоящей работе используется следующая нотация:

$$(xMe + yMeN) \times n; \qquad (4.1)$$
$$(xMe + y(Me_1, Me_2)N) \times n,$$

где Me – напыляемый металл;

MeN – соответствующий нитрид;

x – толщина металлических слоев, мкм;

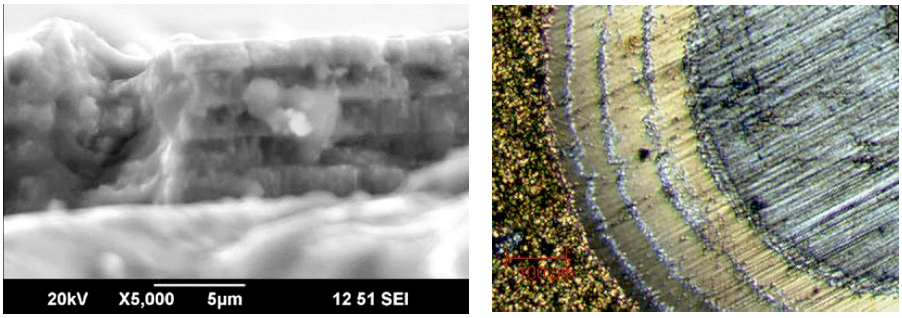
y – толщина нитридных слоев, мкм;

n – количество пар слоев металла и его нитридов.

Таблица 4.4 – Химический состав элементов катодов электродуговых испарителей

Марка	Химический состав, вес.%										
	Ti	Al	V	Mo	Zr	Si	Fe	O	Nb	C	Проч.
ВТ1-0 ГОСТ 19807-91	Осн.					0,1	0,25	0,20	–	0,07	0,35
ВТ20 ГОСТ 19807-91	Осн.	5,5 - 7,0	0,8 – 2,5	0,5 – 2,0	1,5 – 2,5	0,15	0,25	0,15	–	0,10	0,36
ВНМ-1 ТУ 48.4.272-73	–	0,2	Осн.	–	–	0,2	0,15	0,03	0,01	0,03	0,31
Э-110 ТУ 95.166-83	0,005	0,008	–	–	Осн.	0,02	0,05	0,10	0,9 - 1,1	0,02	0,3
Сплав Ti/Al	53	47	–	–	–	0,02	0,25	0,25	–	0,08	0,35

Первым слагаемым в формуле (4.1) указан первый слой, наносимый непосредственно на поверхность детали и образца. При одновременном нанесении нескольких металлов они указываются в скобках через запятую, например (Ti, V) или (Ti, Al, Zr, V, Mo). В некоторых случаях перед обозначением осажденного металла или его нитрида указана толщина соответствующего слоя в микрометрах. В качестве примера на Рисунке 4.1 а показано десятислойное покрытие (0,3Ti + 2,5(Ti, Al, Zr, V, Mo)N)x5 с чередующимися слоями титана со средней толщиной 0,3 мкм и нитрида титанового сплава, легированного Al, Zr, V, Mo, со средней толщиной 2,5 мкм.



а *б*

а – десятислойное покрытие (0,3Ti + 2,5(Ti, Al, Zr, V, Mo)N)x5, изображение излома во вторичных электронах; *б* – восьмислойное покрытие (0,5Ti + 2,5TiN)x4, изображение части сферического шлифа на световом микроскопе

Рисунок 4.1 – Примеры обозначения многослойных покрытий

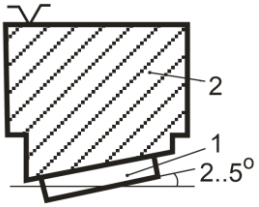
Общая толщина такого покрытия составляет ≈ 14 мкм. На Рисунке 4.1 б показано восьмислойное покрытие (0,5Ti + 2,5TiN)x4 с чередующимися слоями титана со средней толщиной 0,5 мкм и нитрида титана со средней толщиной 2,5 мкм. Общая толщина этого покрытия составляет ≈ 12 мкм (Рисунок 4.1 б).

4.2 Оборудование и методика металлографических исследований

Анализ макро- и микроструктуры материалов проводился на лабораторных образцах, в том числе вырезанных из натурных деталей. Для исследования свойств поверхностного слоя материала и нанесенных на него покрытий по глубине изготавливали наклонные и сферические микрошлифы.

Наклонные микрошлифы к исследуемой поверхности изготавливали с малым углом (ε), выбираемым из диапазона от 2 до 5°. Для этого применяли специальные оправки с точно изготовленным углом рабочей поверхности, к основанию которой крепили (приклеивали) исследуемый образец (Рисунок 4.2). Поверхность образца шлифовали под постоянным выбранным углом на шлифовальных шкурках постепенно уменьшая размер зерен. Окончательно полировали на бархатной ткани с коротким ворсом с использованием алмазных суспензий и окиси кремния. Для изготовления микрошлифов использовали шлифовальный станок фирмы Struers. После полировки образцы промывали в дистиллированной воде и далее сушили в потоке сухого теплого воздуха.

Сферические шлифы изготавливали на установке «Calotest» фирмы CSM Instruments при помощи вращающегося стального шарика (из набора с различным диаметром), который за несколько минут при помощи алмазной пасты удаляет материал с поверхности образца, образуя лунку с известными геометрическими характеристиками. Методика изготовления сферических шлифов является стандартизированной и соответствует ISO 1071-2 «Methods of test for ceramic coatings. Determination of coating thickness by the crater-grinding method».



1 – образец с покрытием; *2* – плашка

Рисунок 4.2 – Изготовление плоского шлифа наклонного сечения

Сферические шлифы использовали для изучения структуры многослойных покрытий, проведения элементного анализа и измерения толщины. Измерение толщины покрытий на сферических шлифах проводили по методике ISO 2177 «Metallic coatings. Measurement of coating thickness» с использованием светового микроскопа Nikon 100MA и системы анализа изображения Thixomet Pro.

4.3 Оборудование и методики растрового микроскопического и химического анализа

Для выявления структуры и элементного состава исследуемых материалов применяли методики микроскопического и рентгеноспектрального анализа. С их помощью был определен состав и характер распределения входящих в материал компонентов. Исследования проводились на растровом электронном микроскопе (РЭМ) JXA-6400 фирмы JEOL с увеличением до 20000X.

Анализ химического (элементного) состава основного материала и материалов покрытий проводили на лабораторных образцах, в т.ч. вырезанных из натурных деталей, с помощью приставки для микро-энергодисперсионного анализа INCA X-act Oxford Instruments к РЭМ JEOL JSM-6490LV. Определение химического состава материала и покрытий проводили в точечном режиме с размером области анализа ≈10 мкм по пяти точкам и усреднением полученных результатов. В соответствии с паспортными данными порог обнаружения элементов для энергодисперсионного спектрометра составляет от 0,1 по 0,5 вес.%. При расчете химического состава такие элементы как кислород, углерод, натрий, кальций, хлор исключались из расчета по причине их возможного завышения вследствие технологических особенностей подготовки образцов.

Анализ содержания элементов, доля которых в сплаве составляет менее 0,1…0,5 вес.%, производили с помощью стационарного оптико-эмиссионного спектрометра Bruker Q4 Tasman. Минимальная область анализа оптико-эмиссионного спектрометра составляет ≈8x8 мм, поэтому исследование химического состава этим методом проводили только для основного материала образцов и деталей. Анализ осуществлялся путем пятикратного прожига материала с усреднением полученных результатов.

4.4 Оборудование и методики рентгеноструктурных исследований

Рентгеноструктурный анализ включал в себя качественный фазовый анализ изучаемых образцов, основанный на идентификации кристаллических решеток материалов, с определением их периодов и межплоскостных расстояний [236, 237]. Для проведения рентгеноструктурного фазового анализа использовали дифрактометры общего назначения ДРОН-4 и Rigaku Ultima IV.

Исследования проводили с фокусировкой гониометра по схеме Брегга–Брентано, включающей в себя неподвижную рентгеновскую трубку, вращающийся образец и счетчик. Съемку проводили с шагом движения счетчика в 0,02° и для областей фона – 0,1°. Время накопления импульсов в одной точке составляло соответственно 10 и 5 с.

4.5 Оборудование и методики просвечивающей электронной микроскопии

Структура основного материала поверхности и материала покрытий изучалась по методике просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) [238] на растровом электронном микроскопе JEOL JEM-2100. Образцы для микроскопа получали методом шлифования до толщины 100-150 мкм с дальнейшим электрохимическим полированием на установке TenuPol-5 Struers. Электрохимическое полирование образца (анод) проводили в струе электролита следующего состава: $CH_3OH+C_4H_9OH+HCl$ (59:35:6 об.%) с добавлением жидкого азота для уменьшения температуры до минус 30 °С. Для определения фазового состава, с помощью ПЭМ были получены дифракционные картины (рентгенограммы). Фазовый анализ провели путем сравнения измеренных межплоскостных расстояний с межплоскостными расстояниями, взятыми из литературы [238-240].

4.6 Методика измерения микротвердости по глубине поверхности

Определение микротвердости проводили стандартной четырехугольной алмазной пирамидкой типа Виккерс с углом при вершине 136° в соответствии с методикой ГОСТ 9450-60. Для испытаний был использован прибор ПМТ-3М. Измерения микротвердости проводились путем последовательного вдавливания алмазной пирамидки нагрузками 0,2, 0,5, 1,0 и 0,20 Н и выдержки в течение 10 секунд. Диагонали, полученных таким образом отпечатков, измеряли с помощью 30Х объектива ОЭ-6 с апертурой А = 0,65 и 15Х окуляра-микрометра АМ9-3. Значение микротвердости находили по таблицам ГОСТ 9450-60 в зависимости от величины нагрузки и длины измеренных диагоналей отпечатков.

Микротвердость образцов по глубине поверхностного слоя измерялась на наклонных шлифах без съема с оправок, что обеспечивало прямой угол между поверхностью шлифа и прикладываемым усилием при измерениях. За начальный замер твердости принимали отпечаток, расположенный на расстоянии не менее двух диагоналей отпечатка от края поверхности в глубь основного материала подложки. На наклонных шлифах глубина исследованного слоя рассчитывалась по формуле:

$$h = L \cdot tg\alpha, \text{ мкм} \qquad (4.2)$$

где h – глубина слоя, мкм;

L – расстояние от границы с поверхностью и местом измерения твердости, мкм;

$\alpha \approx 3\ldots10°$ – угол наклона шлифа к плоскости поверхности, определяется фактически.

Статистическая значимость получаемых значений обеспечивалось тем, что каждое измерение при определенной нагрузке повторялось не менее пяти раз, после чего находилась ее средняя величина.

4.7 Оборудование и методики исследования внутренних остаточных напряжений

4.7.1 Определение внутренних напряжений первого рода

В основе метода определения внутренних упругих напряжений первого рода лежит метод, предложенный академиком Н.Н. Давиденковым, заключающийся в измерении деформации образца при непрерывном удалении поверхностных напряженных слоев, например, электрополированием [241]. Для определения остаточных напряжений использовали автоматизированный комплекс «ПИОН» для измерения поверхностных остаточных напряжений в металлах и сплавах механическим методом [242, 243].

Для измерения внутренних напряжений из лабораторных образцов и натурных деталей на электроэрозионном станке вырезали образцы размерами: длина 40…90 мм, ширина 4…10 мм, толщина 1,5...2,5 мм. Электролитическое травление титановых сплавов производили в электролите: плавиковая кислота – 45 об.%; азотная кислота – 47 об.%; вода – 8 об.%. Величина остаточных упругих напряжений определялась в автоматическом режиме, при этом напряжения считались растягивающими (положительными), когда образец прогибался в сторону электролита.

4.7.2 Определение внутренних напряжений второго рода

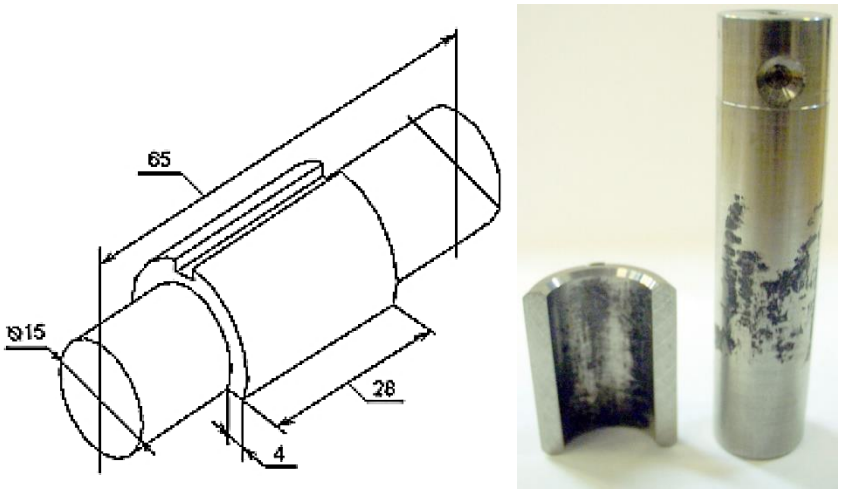
Исследования внутренних напряжений второго рода (по классификации Н.Н. Давиденкова) проводили на рентгеновском дифрактометре Rigaku Ultima IV при съемке нескольких дифрактограмм под различными углами наклона образца (ψ) в соответствии с известной методикой рентгеноструктурного анализа «$sin^2\psi$» [244-246].

Съёмку образцов проводили при Cu-Kα излучении (40 кВ, 40 мА) с использованием плоского графитового монохроматора <0002> на отраженном пучке. Для минимизации эффектов дефокусировки, связанных с наклоном исследуемого образца и его смещением относительно нулевой линии, съемку проводили на параллельном пучке, полученном с помощью приставки «Cross Beam Optics», включающую в себя параболическое многослойное зеркало и набор щелей Соллера с размерами: 5,0° – на первичном и 0,5° – на вторичном пучке.

Съемки дифрактограмм проводили при величинах угла съемки $2\Theta_0 > 130°$. На полученных дифрактограммах выбирали самый дальний пик с наибольшей интенсивностью и измеряли его под различными углами наклона (ψ). Далее определяли зависимость величины смещения выбранного пика по углу 2Θ от угла (ψ) путем построения прямой зависимости $2\Theta=f(\psi)$ и величину остаточных напряжений ($\sigma_{ост}$) по методике «$sin^2\psi$».

4.8 Оборудование и методика проведения испытаний на стойкость при фреттинге и фреттинг-коррозии

Испытания проводили в соответствии с методикой ГОСТ 23.211–80 «Метод испытаний материалов на изнашивание при фреттинге и фреттинг-коррозии», вид испытаний II. В качестве образцов использовали сопряжение «Вал-Втулка» (Рисунок 4.3), имитирующие зацепление бандажных полок рабочих лопаток паровых турбин из титанового сплава ВТ6.



а *б*

а – схема сопряжения образцов «Вал-Втулка»; *б* – внешний вид образцов из сплава ВТ6 после испытания на фреттинг

Рисунок 4.3 – Испытание на фреттинг и фреттинг-коррозию

Сущность метода испытания состоит в том, что цилиндрический подвижный образец-вал по образующей соприкасается с поверхностью отверстия неподвижного контробразца-втулки. После приложения нагрузки контробразец приводится в возвратно-вращательное движение с заданными частотой и амплитудой, контролируемой визуально по катетометру. После окончания заданного количества циклов взаимодействия измеряется износ неподвижного образца, по значению которого определяется износостойкость исследуемого образца.

Режимы испытания:

а) Диапазон нагружения образцов в осевом направлении силами от 200 до 3000 Н с погрешностями ±25 Н (в диапазоне нагрузок от 200 до 1000 Н) и ±50 Н (в диапазоне свыше 1000 Н);

б) частота относительного смещения в диапазоне от 10 до 30 Гц с погрешностью не более 10%;

в) амплитуда относительного смещения от 10 до 1000 мкм с погрешностью не более 2 мкм в диапазоне 10–30 мкм и не более 5 мкм свыше 100 мкм;

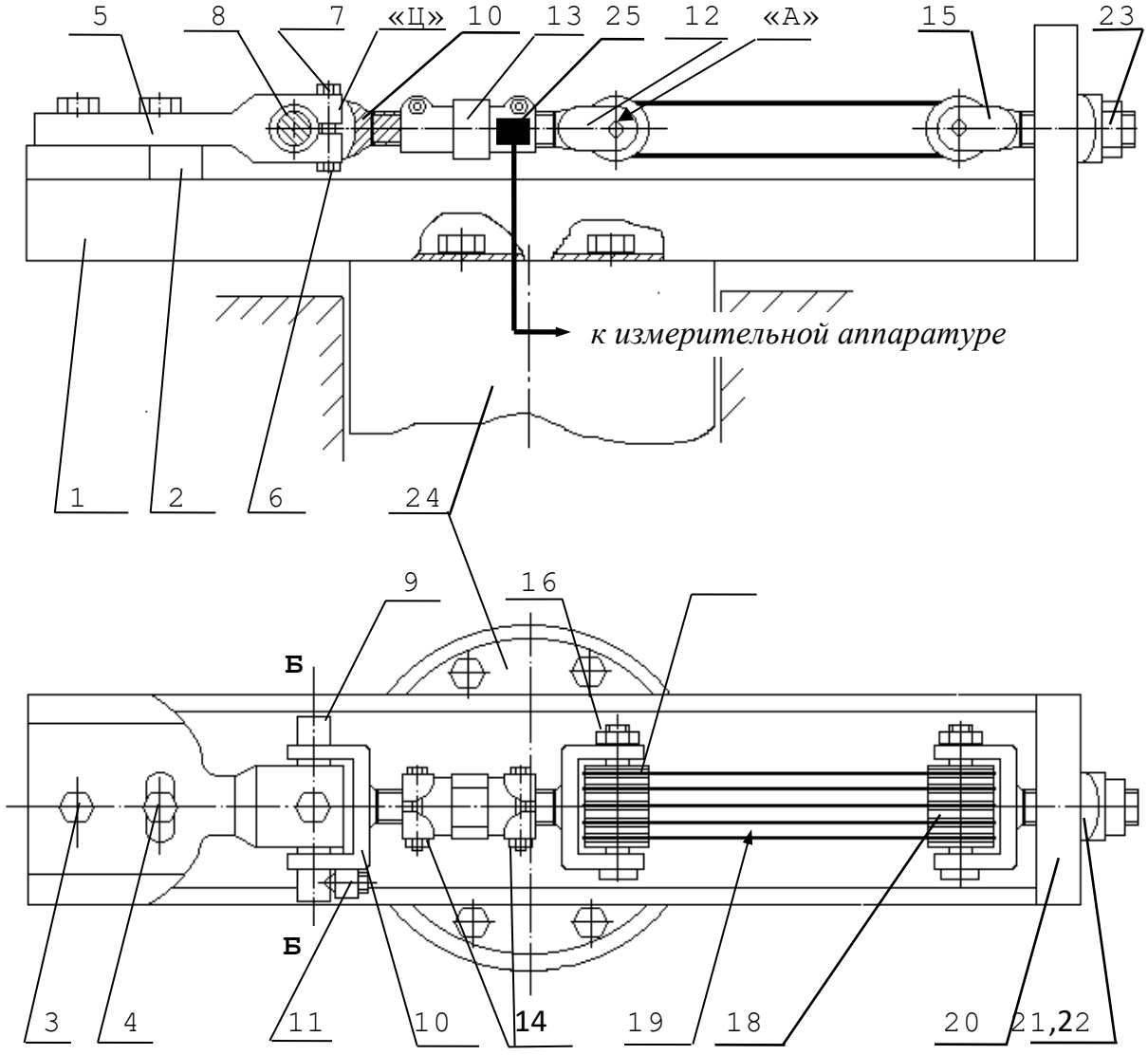
г) непрерывная регистрация количества циклов возвратно-вращательного движения контробразца с погрешностью не более 50 циклов.

Для реализации методики испытания на фреттинг и фреттинг-коррозию образцов типа «Вал-Втулка» была сконструирована и изготовлена специальная испытательная установка, проведена ее метрологическая аттестация. Схема и внешний установки показаны на Рисунках 4.4 и 4.5. Все элементы конструкции установки смонтированы на основании 1, устанавливаемого и закрепляемого в посадочных отверстиях вибростенда ВЭДС-1500.

Подготовка устройства к работе осуществляется следующим образом. При ослабленных болтах 3, 4, 7 и гайки 23 в цанговый зажим «Ц» кронштейна 5 устанавливается и фиксируется образец-втулка 8. Во втулку вставляется образец-вал 9, который неподвижно фиксируется в первой вилке 10 устройством 11. После этого, во избежания проворота втулки во время работы, затягивается болт 7. Далее, затягиванием гайки 23, создается небольшое начальное осевое усилие. В это время происходит самоустановка и необходимая плотность прилегания поверхностей контакта образцов, которая достигается благодаря описанной выше системе компенсаторов. После того, как необходимая плотность прилегания образцов обеспечена, производится затяжка болтов 3 и 4. Заданное осевое усилие создается гайкой 23, после чего производится ее законтривание. Установка готова к испытаниям.

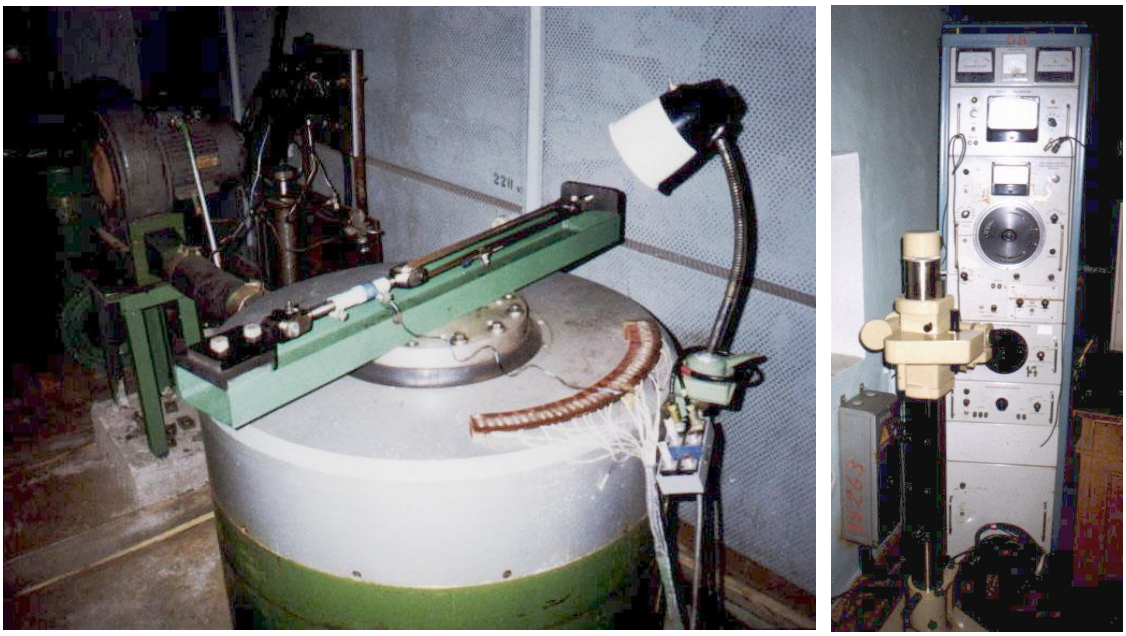
Устройство работает следующим образом. При включении вибростенда и задании некоторой начальной частоты, стол стенда 24 со всей закрепленной на нем системой начинает осуществлять колебательное движение в вертикальной плоскости. Резонансная частота колебаний упругого элемента системы подбирается путем регулирования частоты колебаний стола на

пульте управления вибростендом. При достижении резонанса, возникшие вертикальные колебания тросовой растяжки 19 через барабан 17 и вилку 12 передаются на тягу 13. Тяга 13, связанная вилкой 10 с пальцем 9, осуществляет колебания вокруг оси «Б–Б», в результате чего возникает требуемое реверсивное возвратно-вращательное движение пальца относительно неподвижной втулки 8.



1 - основание; 2 - горизонтальная плита; 3, 4, 7, 14 – резьбовой крепеж; 23, 6 - гайки; 5 - кронштейн; 8 - неподвижный контробразец-втулка в цанговом зажиме «Ц»; 9 - подвижный образец-вал; 10, 12, 15 - вилки; 11 - фиксирующее устройство; 13 - трубчатая тяга; 16 - пальцы; 17, 18 - несущие барабаны; 19 - тросовая растяжка; 20 - боковина; 21, 22 - сферический подпятник; 25 - четыре резистивных тензодатчика, собранных в измерительный мост Уинстона

Рисунок 4.4 – Устройство для испытания на фреттинг и фреттинг-коррозию сопряжений типа «Вал-Втулка»



а *б*

а – Испытательная установка, смонтированная на вибростенде ВЭДС-1500;

б – блок управления с катетометром

Рисунок 4.5 – Оборудование для испытания на фреттинг и фреттинг-коррозию

Размах колебаний тяги регулируется путем изменения с пульта управления стендом силы тока. Контроль величины размаха тяги осуществляется визуально с помощью оптического прибора – катетометра. По известному размаху с помощью несложных геометрических преобразований определяется угол поворота пальца относительно втулки и действительная амплитуда микроперемещений. Осевое усилие в процессе работы контролируется измерением сигнала, снимаемого с тензодатчиков 25.

Достоинствами описанной схемы устройства для испытания на фреттинг и фреттинг-коррозию являются:

а) возможность использования образцов, изготовленных по реальным технологиям и качествам поверхности, соответствующим аналогичным изделиям, которые выпускаются серийно;

б) относительная простота конструкции и простота переналаживания по основным усилиям, амплитудам относительного движения, частотам;

в) возможность осуществлять контроль осевого усилия в процессе испытания;

г) самонастраиваемость установки, что исключает возникновение неравномерности удельного давления и осуществляет максимально плотное прилегание поверхностей. Это обеспечивается использованием особых устройств, компенсаторов: рычага-кронштейна и тросовой развязки.

На разработанные конструкции испытательных установок получены два государственных патента на изобретение РФ (№2173846 и №78943).

4.9 Оборудование и методика проведения испытаний на газоабразивный износ

Методика проведения испытаний на газоабаразивный износ заключается в одновременном воздействии на испытываемые образцы потоком твердых частиц, создаваемым центробежным ускорителем, соответствующим требованиям ГОСТ 23.201-78 «Обеспечение износостойкости изделий. Метод испытания материалов и покрытий на газоабразивное изнашивание с помощью центробежного ускорителя».

В одном цикле испытывали двенадцать образов, по три образца каждого варианта. Совместно с исследуемыми образцами испытывали три эталонных образца, изготовленных из того же материала, но без упрочнения. Перед испытанием образцы промывали в ультразвуковой ванне, высушивали сухим теплым воздухом и взвешивали на аналитических весах с погрешностью не более 0,1 мг, выполняя не менее трех измерений. Далее образцы устанавливали в держатели установки под заданным углом к оси центробежного ускорителя.

Для проведения одного цикла испытаний использовали 100±4 г абразивного материала одного фракционного состава. Перед загрузкой абразивный материал сушили в термошкафу: температура нагрева 150...200 °С, выдержка 30 мин, остывание на воздухе до 50±10 °С. После каждого цикла испытания все образцы промывали, сушили и проводили не менее трех взвешиваний каждого образца на аналитических весах с погрешностью не более 0,1 мг. Результаты измерения отмечали на графике в координатах «Количество абразивного материала m_a, г» - «Изменение веса образца Δm, г». Испытания проводили до тех пор, пока потеря массы исследуемых образцов за один цикл испытаний станет равной или превысит потерю массы эталонных образцов.

В результате испытаний для каждого образца была построена соответствующая эрозионная кривая $dm = f(m_a)$, где dm – изменение массы образца, г; m_a – масса абразивного материала, г. По изменению угла наклона эрозионной кривой, соответствующему увеличению скорости износа, определяли количество абразива, необходимого для полного удаления покрытия и начала износа основного материала. При этом соответствии с ГОСТ 23.201-78 определяли относительную износостойкость (ξ) исследуемого образца в по формуле:

$$\xi = \bar{m}_{\text{Э}}\rho_{\text{И}} \,/\, \bar{m}_{\text{И}}\rho_{\text{Э}}, \qquad (4.3)$$

где $\rho_э$, $\rho_и$ – плотности эталонного и испытуемого материала (соответственно), г/см^3;

$m_э$, $m_и$ – средняя суммарная потеря массы эталонных и испытуемых образцов (соответственно), г.

4.10 Методика испытания образцов на каплеударную эрозию

Исследования на стойкость при каплеударной эрозии проводили по методике ФГБОУ ВО «НИУ МЭИ» [22, 247] на специализированном гидроударном стенде «Эрозия-М», позволяющем максимально точно воспроизводить каплеударное воздействие, аналогичное условиям работы рабочих лопаток паровых турбин. Основные технические характеристики эрозионного стенда приведены в Таблице 4.5. Внешний вид и схема эрозионного стенда показана на Рисунке 4.6.

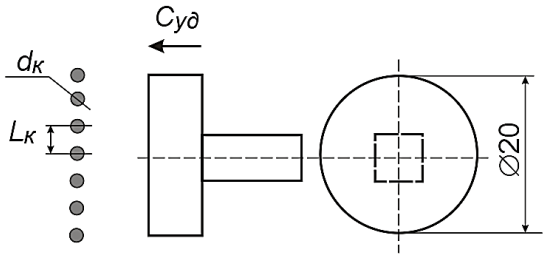
Принцип работы эрозионного стенда заключается в следующем. Исследуемые образцы закрепляются на концах штанги, вращающейся в вакуумной камере. В качестве привода штанги служит высокоскоростной электрический двигатель постоянного тока, установленный на крышке вакуумной камеры.

Таблица 4.5 – Технические характеристики гидроударного стенда «Эрозия-М» [248]

Параметр	Величина
Максимальная скорость соударения образца с каплями	800 м/с
Максимальная частота вращения	13 000 об/мин
Абсолютная скорость движения капли на уровне образца	От 4 до 15 м/с
Величина вакуума в рабочей камере	До 1 кПа (10^{-2} бар)
Диаметр капель, соударяющихся с образцом	От 20 до 2000 мкм

Рисунок 4.6 – Испытательный гидроударный стенд «Эрозия-М» [22, 248]

Для имитации условий эксплуатации рабочих лопаток паровых турбин во влажнопаровой среде, в вакуумной камере испытательного стенда устанавливают давление среды в пределах от 10^{-1} до 10^{-3} МПа. При испытаниях образцы вращаются вокруг центральной оси камеры с заданной окружной скоростью и многократно пересекают вертикальный поток капель. Постоянный размер и частоту выпадения капель жидкости обеспечивает специальный генератор, формирующий монодисперсный однорядный поток капель. В качестве рабочей жидкости используется конденсат учебно-экспериментальной ТЭЦ «НИУ МЭИ». Образцы для испытания изготавливают из материала детали. Схема соударения жидкости с поверхностью исследуемых образцов, реализуемая в экспериментальном стенде, представлена на Рисунке 4.7. Шероховатость рабочей поверхности должна соответствовать шероховатости, назначаемой для пера рабочих лопаток от 0,4 до 0,8 Ra. Перед испытаниями проводят термообработку по технологии изготовления рабочих лопаток. При одинаковых режимах каплеударного воздействия испытывают не менее трех образцов после чего исследуют характер и глубину разрушения.



d_k – диаметр капель; L_k – расстояние между каплями в потоке; $C_{уд}$ – скорость

Рисунок 4.7 – Схема соударения капель жидкости с исследуемым образцом [22]

Для исследований эрозионного износа материала поверхности в качестве критериев используют [22]:

а) средняя глубина эрозии (E, м), равная отношению уменьшения объема образца к площади эродированной поверхности;

б) масса жидкости (M, кг/м^2), выпадающий на единицу, площади поверхности.

Среднюю глубину эрозионного износа за время экспонирования (τ, с) рассчитывают по формуле:

$$E = \Delta G_M/(\rho_м \cdot S_м), \text{ м} \qquad (4.4)$$

где ΔG_M – потеря массы металла образца, кг;

$\rho_м$ – плотность металла образца, кг/м^3;

$S_м$ – площадь эродированной поверхности, м^2;

G_B – масса воды, выпавшая на поверхность образца, кг.

Массу воды, выпавшей на поверхность образца, определяют из отношения:

$$G_B = G_K \cdot N_k, \tag{4.5}$$

где $N_к$ – число капель, ударивших по образцу за время экспонирования τ.

$G_к$ – масса одной капли, кг;

$$G_к = \nu_к \rho_в = \frac{\pi d^3}{6} \rho_в \tag{4.6}$$

где $\nu_к$ – объем капли, м^3;

$d_к$ –диаметр капли, м;

$\rho_в$ – плотность воды, кг/м^3.

Для определения числа капель, ударивших по образцу, снимают следующие характеристики генератора капель с конкретной фильерой:

а) при постоянном перепаде давления на фильере и неизменной температуре конденсата определяются величины резонансных частот, на которых генератор выдает капли одинакового размера с одинаковым расстоянием между ними;

б) при каждой резонансной частоте определяют диаметр капель (d_K) и расстояние между каплями (l_K).

Общее число капель, ударивших по образцу, за время экспонирования определяют из соотношения:

$$N_к = K_{ул} \cdot Z \cdot n_{соуд} \cdot \tau \tag{4.7}$$

где $K_{УЛ}$ – коэффициент улавливания, равный отношению средней высоты зоны эрозионного износа к расстоянию между центрами капель;

Z – число потоков капель;

$n_{соуд}$ – частота соударения, с$^{-1}$;

$$n_{соуд} = \nu / \pi D, \text{ с}^{-1}; \tag{4.8}$$

где ν – окружная скорость образца, м/с;

D – диаметр крепления образцов на штанге, м.

В результате испытаний серии образцов получают кинетические кривые эрозии [22], определяющие зависимость средней глубины эрозионного износа (E, м) от массы жидкости (M, кг/м^2), попавшей на единицу эродированной поверхности: $M = G_B / S_{ЭР}$, кг/м^2. На кинетической кривой можно условно определить три основных периода эрозионного износа: Mo – инкубационный (скрытый), M_1 – период максимальной скорости износа и M_2 – периодом с установившейся скоростью эрозии. Параметры скорости эрозии: максимальной (E_0) и установившейся ($E_{уст}$), определяются тангенсами углов наклона (α) и (β), соответствующих участков кривой эрозии.

Наиболее важными, с точки зрения ресурса работы лопаток турбин, являются величины инкубационного периода (Mo), периода с установившейся скоростью эрозии (M_1) и величина максимальной скорости износа (α).

Для оценки эффектичности износостойкости образцов после упрочнения расчитывают коэффициент относительной эрозионной стойкости, как отношение максимальной скорости эрозии исходного (эталонного) и упрочненного образцов:

$$\zeta = \alpha_э / \alpha_u, \qquad (4.9)$$

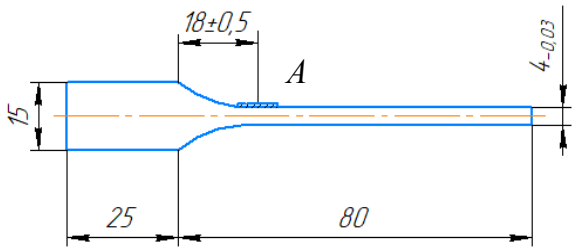
где $\alpha_э$; α_u – величина скорости эрозии в области максимального износа эталонного образца и упрочненного образца соответственно.

4.11 Оборудование и методики испытания на многоцикловую усталость

Усталостные испытания проводили для определения величины предела выносливости исследуемых образцов и лопаток (σ_{-1}) на испытательном оборудовании лаборатории прочности ПАО «ОДК-УМПО». Для проведения испытаний были приняты методики, рекомендованные к использованию ПАО «ОДК» при оценке показателей надежности и долговечности лопаток ГТД в соответствие ОСТ 1 00870–77 «Лопатки газотурбинных двигателей. Методы испытаний на усталость». К этим методикам в т.ч. относятся стандартная методика построения осреднённой кривой усталости (кривой Вёлера) и «Метод лестницы».

Для проведения испытаний по стандартной методике изготавливали партию образцов или лопаток количеством 25-30 шт. Образцы изготавливали из материала лопаток по технологии максимально приближенной к лопаточной. Эскиз усталостных образцов показан на Рисунке 4.8. Гео-

метрические формы и размеры образцов подобраны таким образом, чтобы собственная резонансная частота образцов по первой изгибной форме колебаний совпадала с частотой собственных колебаний рабочих лопаток компрессора низкого давления ГТД из титановых сплавов.



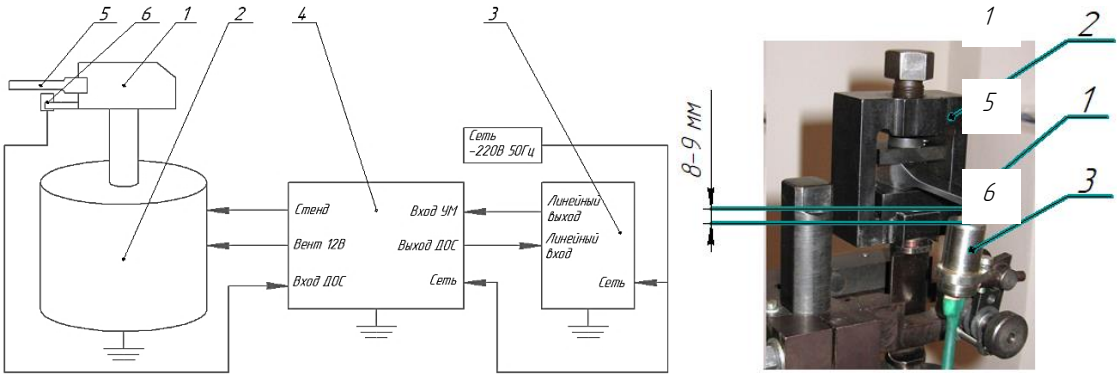
A – место наклейки резистивного тензодатчика для контроля напряжений

Рисунок 4.8 – Эскиз образца для усталостных испытаний

Испытания проводили не менее чем при трёх амплитудах напряжений цикла (σ_a, МПа). За базу испытаний принимали $N = 2x10^7$ циклов нагружения. Для повышения достоверности за предел выносливости принимали ту амплитуду напряжений, при которой без разрушений выдержали заданную базу испытаний не менее шести образцов. В ходе испытаний строили кривую усталости $\sigma = f(N)$ в координатах: «Нагрузка σ, МПа» - «Количество циклов $ln(N)$».

Для проведения сравнительных испытаний вариантов покрытий, в т.ч. при отработке технологии их нанесения, испытания на усталость проводили по «Методу лестницы» в соответствии с ОСТ 1 00870–77 «Лопатки газотурбинных двигателей. Методы испытаний на усталость».

Испытания проводили на вибродинамическом стенде ВЭДС-1500 и пьезодинамическом стенде «МИКАТ-У», принципиальная схема которых показана на Рисунке 4.9.



1 – зажимное устройство, 2 – вибратор, 3 – персональный компьютер,

4 – усилитель мощности, 5 – испытуемый объект, 6 –датчик обратной связи

Рисунок 4.9 – Электродинамический вибростенд «МИКОНТ»

Вибростенды состоят из вибратора с оснасткой для крепления образцов или лопаток, генератора гармонических колебаний, усилителя мощности низкой частоты, устройства видеофиксации и персонального компьютера. Дополнительно к компьютеру подключают систему тензометрирования, состоящую из контрольного образца с наклеенными резистивными тензодатчиками типа КФ5П1-5-100-А-12 по ТУ3.06 7710-0001093, включенными в измерительный «*мост Уинстона*». В качестве аналогового преобразователя применяли АЦП ZetLab 210 с соответствующим программным обеспечением.

4.12 Оборудование и методика инструментального индентирования материала поверхности алмазными наконечниками

Исследования механических свойств материала поверхности и покрытий проводили на установке «CSM Scratch Tester» по методике инструментального индентирования алмазными наконечниками ASTM C1624 «Adhesion Strength and Mechanical Failure Modes of Ceramic Coatings by Quantitative Scratch Testing». Для испытаний использовали алмазный наконечник типа Роквелл с радиусом 20 мкм и углом при вершине 120˚. Диапазон прикладываемых нагрузок выбирался в приделах от 0,3 до 30 Н так, чтобы на поверхности была сформирована царапина с характерными местами разрушения покрытия (Рисунок 4.10 а). В процессе испытания на компьютере проводили автоматическую запись прилагаемой нагрузки (F_N, Н), глубины проникновения индентора (P_d, мкм) и сигнала акустической эмиссии ($A_э$, дБ).

Характер разрушения материала образцов и покрытий исследовали визуально с помощью оптического или растрового электронного микроскопа при увеличении от 50 до 1000×. На основе анализа разрушенного материала покрытия делали заключение о характере разрушения, наличии трещин, сколов и прочих поверхностных дефектов. В общем виде при испытании поверхности с упрочняющим покрытием по следу индентора можно выделить четыре области, характеризуемые соответствующими нагрузками (Рисунок 4.10):

а) Lc_0, Н – нагрузка начала пластической деформации;

б) Lc_1, Н – нагрузка начала разрушения покрытия и появления первых визуально обнаруживаемых дефектов: микротрещины, сколы в объеме покрытия и др.;

в) Lc_2, Н – нагрузка полного разрушения покрытия. По величине этой нагрузки можно определить прочностные свойства материала покрытия.

г) Lc_3, Н – нагрузка, при которой наблюдают отслоение покрытия от подложки или полное удаление покрытия с поверхности. По величине этой нагрузки можно оценить адгезионный характер разрушения покрытия при его отслоении от подложки.

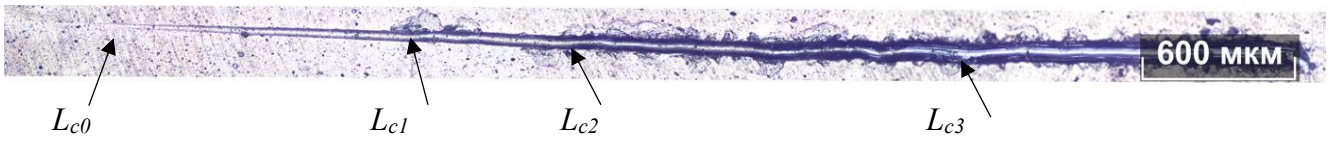
Экспериментальные данныные, полученные по стандартной методике, были использованы для проведения сравнительной оценки механических свойств образцов с различными вариантами покрытий. Для этого по формулам механики контактного взаимодействия [208-209] с учетом результатов проведенного математического моделирования напряженно-деформированного состояния, возникающего при взаимодействии жесткой полусферы с упругопластическим полупространством (пункт 2.4.3, глава 2), были рассчитаны:

а) максимальное нормальное давление (p_0, МПа), действующее в центре контакта (4.10);

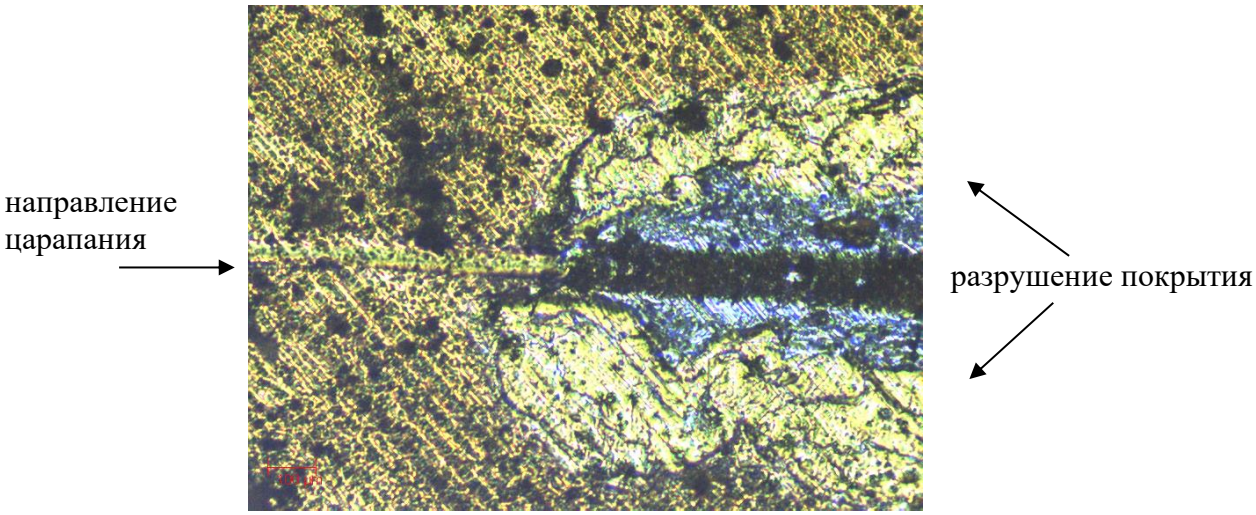
б) эквивалентные напряжения (σ_{III}, МПа) по третьей теории прочности (4.15);

в) эквивалентный (контактный) модуль упругости (E^*, МПа), рассчитываемый по (4.14).

По графикам изменения давление p_0 от прилагаемой нагрузки L (Приложение Е) определяли максимальное контактное давление (p_{max}), величину которого принимали за критерий прочности исследуемого покрытия.



а



б

а – След (царапина) от индентирования поверхности; *б* – место разрушения покрытия; $L_{c0..3}$ – критические нагрузки

Рисунок 4.10 – Индентирование поверхности алмазным наконечником типа Роквелл

$$p_0 = \frac{3}{2} p_{\text{ср}} = \frac{3}{2} \frac{F_N}{\pi a^2}, \text{МПа}, \qquad (4.10)$$

где $p_{ср}$ – среднее давление в контакте, МПа;

F_N – нормальная сила в момент разрушения ($F_N \equiv L_{c2}$), Н;

a – радиус невосстановленного пятна контакта индентора:

$$a = \sqrt{Rd}, \text{мм}^2, \tag{4.11}$$

где R – радиус индентора, мм;

d – глубина проникновения индентора в материал поверхности, при упругом контакте примерно равна половине глубины индентирования P_d, мм.

На основании положений механики контактного взаимодействия (задача Герца). Имеем:

$$F_N = \frac{4}{3} E^* \sqrt{Rd^3}, \text{МПа}, \tag{4.12}$$

где E^* – эквивалентный (контактный) модуль упругости, МПа, зависящий от упругих свойств контактируемых материалов следующим образом

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1-\upsilon_1^2}{E_1} + \frac{1-\upsilon_2^2}{E_2}, \text{МПа}^{-1}, \tag{4.13}$$

где $E_{1,2}$ – модули Юнга контактируемых материалов (соответственно), МПа;

$\nu_{1,2}$ – коэффициенты Пуассона соответствующих материалов (соответственно).

Объединяя выражения (4.10)–(4.13), получаем формулу для экспериментального определения эквивалентного модуля упругости контактирующих материалов:

$$E^* = \frac{3F_N}{4\sqrt{Rd^3}}, \text{МПа}. \tag{4.14}$$

Подставляя в формулу в (4.13) рассчитанную таким образом величину E^*, модуль упругости алмазного индентора (E = 1147 ГПа) и соответствующие коэффициенты Пуассона, можно определить модуль упругости исследуемой поверхности.

На основании третьей теории прочности и с учетом результатов моделирования напряженно-деформированного состояния поверхности (пункт 2.4.3, глава 2) можно определить эквивалентные напряжения (по критерию Треска – Сен-Венана), действующие в упругой области, до появления первых трещин в нитридных покрытиях:

$$\sigma_{III} = |\sigma_1 - \sigma_3| = 2p_0 \frac{(1-2\nu)}{3}, \text{МПа} \quad (4.15)$$

За критерий деформации материала поверхности по аналогии с работами [206, 208] принимали величину:

$$\varepsilon = 0{,}5\sqrt{\frac{P_d}{R}}. \quad (4.16)$$

4.13 Выводы по главе 4

1 На основании широкого применения при изготовлении лопаток газовых и паровых турбин для исследования приняты:

а) основной материал образцов – двухфазный титановый сплав ВТ6 по ГОСТ 19807-91;

б) основной материал покрытий: α-титан, легированного Al, Zr, V, Mo, и его нитридов различной толщины;

в) дополнительный материал покрытия, наносимый совместно с α-титаном: металлы IV-V группы (Cr, Zr, V, Al, Mo и другие), способные формировать нитридные фазы, а также являться стабилизатором β-фазы титана.

2 С целью установления зависимостей влияния структуры и состава материалов многослойных покрытий на их физико-механические свойства приняты следующие методы исследования: рентгеноспектральный, рентгеноструктурный анализ, исследования микротвердости, внутренних напряжений, механических и прочностных свойств методом инструментального индентирования.

3 С целью установления зависимостей влияния структуры и состава материалов многослойных покрытий на их функциональные и служебные свойства приняты следующие методики исследования: испытание на газоабразивный износ, каплеударную эрозию, фреттинг и фреттинг-коррозию.

4 Предложен способ исследования фреттинг-износа и фреттинг-коррозии поверхностей в сопряжении «Вал-Втулка», отличающийся от известных тем, что подвижный образец-вал, контактирующий по образующей с неподвижным контробразцом-втулкой, при приложении нормальной нагрузки приводится в возвратно-вращательное движение с заданной амплитудой и частотой. После наработки оценивается физико-химическое состояние и износ поверхности.

Сконструирована и изготовлена установка для реализации этого способа исследования,

которая отличается от известных тем, что в ней предусмотрена система компенсаторов нормальной нагрузки с целью повышения достоверности получаемых результатов испытаний. На конструкцию установки получен Патент на изобретение РФ №2173846, МПК G01N 3/56 (заявка 99122126/28, от 22.10.1999).

5 Разработана новая методика определения прочности ионно-плазменных покрытий при их упруго-пластическом деформировании алмазными наконечниками типа Роквелл, отличающаяся от известных тем, что за критерий разрушения материала поверхности принимают не критическую нагрузку, а величину максимальных контактных или эквивалентных напряжений, определяемых в зависимости от степени деформации материала в области контакта. Предлагаемая методика расширяет исследовательские возможности известного способа инструментального индентирования ASTM C1624-2022 (Scratch testing), повышает его универсальность и достоверность получаемых результатов.

ГЛАВА 5
ИССЛЕДОВАНИЯ И ИСПЫТАНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ

5.1 Испытание образцов на газоабразивный износ

Испытания на газоабразивный износ были проведены с помощью центробежного ускорителя по методике ГОСТ 23.201-78 при угле атаки 60° и частоте вращения диска n = 9500 об/мин ($v \approx 76…120$ м/с), абразивный материал – электрокорунд F-280 со средним диаметром частиц 40±5 мкм. Испытания заключались в изнашивании образцов путем воздействия на них потока абразивных частиц, создаваемого центробежным ускорителем, при заданных угле атаки и скорости. Износ материала измеряли путем взвешивания образцов на аналитических весах после проведения каждого цикла испытания, включающего в себя обдувку абразивным песком массой 100 г. Износостойкость оценивали путем сравнения износа эталонного образца без покрытия и образца с покрытием, испытанных в одном цикле и при одинаковых условиях. Методика испытания приведена в пункте 4.9 главы 4. Испытания были проведены в рамках ФЦП 2010-1.1-231-057 по теме «Повышение надежности и ресурса газотурбинных двигателей транспортных средств, эксплуатирующихся в условиях запыленной атмосферы и морской среды».

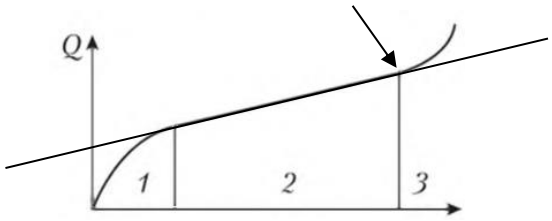
Для проведения сравнительного анализа и выбора наиболее износостойких материалов для дальнейших исследований были изготовлены образцы с несколькими вариантами многослойных ионно-плазменных покрытий на основе титана. Покрытия отличались различным химическим составом, толщиной и количеством слоев. Исследованные варианты покрытий приведены в Приложении Г. Изменение веса образца относительно его начального значения после каждого цикла испытания отмечали на графике. Таким образом, для каждого варианта покрытия была построена соответствующая эрозионная кривая: $dm = f(m_a)$, где dm – изменение массы образца, г; m_a – масса абразивного материала, г.

Сравнительный анализ износостойкости многослойных покрытий проводили по нескольким критериям: использованные материалы (Рисунок Г.1 и Рисунок Г.2 Приложения Г), толщина покрытия и количество пар слоев (Рисунки Г.3–Г.5 Приложения Г), толщина нитридных слоев (Рисунок Г.6 Приложения Г).

Установлено, что при принятых условиях испытаний, наибольшую эрозионную стойкость показали многослойные нитридные покрытия на основе титана (сплав ВТ1-0) со следующими дополнительными материалами (по мере возрастания износостойкости): цирконий (сплав Э-110, 98,8 вес.% Zr), псевдо-α титановый сплав ВТ-20 (Ti-7Al-2Mo-2,5V-2,5Zr) и ванадий (сплав ВнМ-1, 99,9 вес.% V). Покрытия с добавлением стеллита (сплав В3К, Co+WC), никелевого

сплава СДП1 (Ni-20Co-20Cr-12Al) и алюминиевых сплавов различного химического состава показали неудовлетворительную износостойкость, меньшую основного материала образцов, и из дальнейших испытаний были исключены.

Полученные эрозионные кривые многослойных покрытий имеют характерную форму, содержащие три стадии изнашивания (Рисунок 5.1), известные из теории трения и износа [205, 249].



1 – область начального износа (область приработки); *2* – область нормального износа, характерного для установившегося изнашивания; *3* – область ускоренного износа

Рисунок 5.1 – Изменение массы образца в процессе его изнашивания

Область ускоренного износа для образцов с защитным покрытием определяется увеличением угла наклона эрозионной кривой к оси абсцисс (на Рисунке 5.1 показана стрелкой), который свидетельствует об интенсивном разрушении материала покрытия и увеличении скорости его износа, стремящейся к скорости износа основного материала.

Сравнительный анализ полученных эрозионных кривых (Рисунки Г.3-Г.5) позволил подтвердить сделанные ранее предположения (пункт 2.4, глава 2) о влиянии толщины и количества слоев многослойных композиционных покрытий на их стойкость при газоабразивном изнашивании. Экспериментально установлено, что износ покрытий с одинаковым химическим составом в областях начального и нормального износа протекает одинаково, с равной скоростью, которая, очевидно, определяется совокупностью материалов покрытия и не зависит от его толщины и количества слоев. Толщина и количество слоев, в свою очередь, определяют стойкость образцов, выражаемую в длительности испытания или в количестве использованного абразива до возникновения области ускоренного износа. Покрытия, имеющие большее количество пар нитридных и металлических слоев, и, следовательно, большую толщину при прочих равных условиях, характеризуются меньшей скоростью износа и, следовательно, проявляют большую стойкость в области ускоренного износа (Рисунок Г.3 и Рисунок Г.5). При этом подтверждается существование необходимой минимальной толщины нитридных слоев $h_N > 2$ мкм (для принятых условий испытания), о наличии которой было сделано предположение ранее, при теоретическом исследовании (п.2.4, глава 2). Не зависимо от общей толщины покрытия и количества промежуточных слоев при уменьшении h_N до 0,5 мкм, покрытие перестает проявлять свои защитные свойства,

скорость его износа в течение всего испытания практически совпадает со скоростью износа образцов без покрытия (Рисунок Г.6 и Г.7), что отражается в многократном снижении износостойкости. Для покрытий системы (Ti + (TiAlMoVZr)N) с уменьшением толщины h_N с 2,5 до 0,5 относительная износостойкость ξ снижается в 2,1...3,2 раза (Таблица Г.6 Приложения Г); для титан-ванадиевых покрытий ((V, Ti) + (V, Ti)N) – от 4,7 до 4,9 раза (Таблица Г.7 Приложения Г).

По результатам испытания наибольшую износостойкость показали следующие многослойные покрытия:

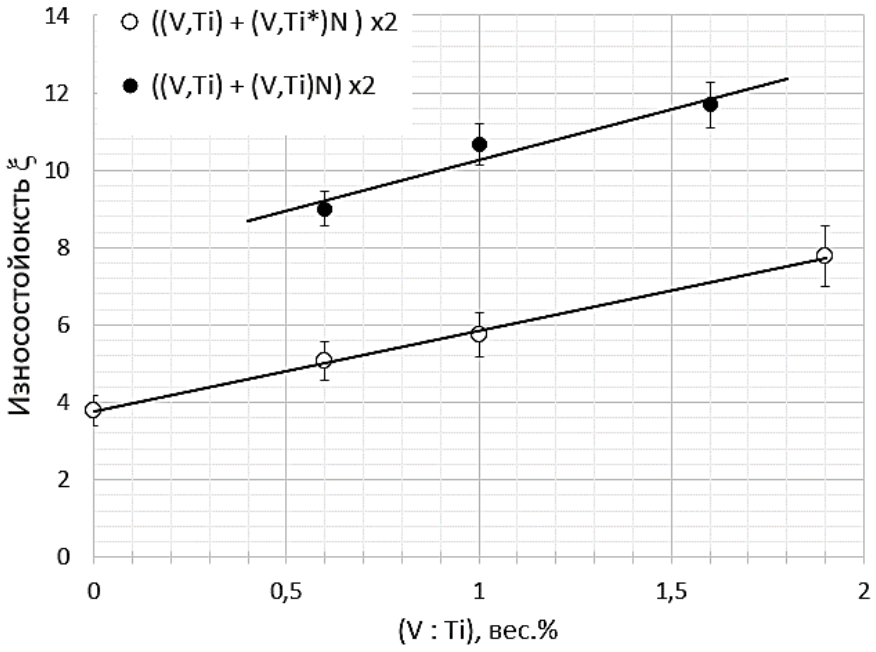
а) ((V, Ti) + (V, Ti)N)x5, нанесенное совместно с ванадием, средняя толщина h = 10,9 мкм, толщина нитридных слоев h_N = 2,5 мкм, относительная износостойкость ξ = 12,3;

б) (Ti + (TiAlMoVZr)N)x5, нанесенное совместно с титановым сплавом ВТ20, средняя толщина h = 14,9 мкм, толщина слоев h_N = 2,5 мкм, относительная износостойкость ξ = 4,9.

Относительная износостойкость аналогичного титан-циркониевого покрытия во всем исследуемом диапазоне толщин и количестве слоев составила ξ = 1,8±0,1 (Таблица Г.4 Приложения Г). При этом максимальная величина износостойкости этого покрытия наблюдалась только в течение первого цикла испытаний (менее 100 г абразива, Рисунок Г.4 Приложения Г), что является неудовлетворительным результатом. Для сравнения, при принятых режимах испытания максимальная износостойкость титан-ванадиевого покрытия ((V, Ti) + (V, Ti)N) x5 наблюдалась в течение 2500 г абразива; покрытия (Ti + (TiAlMoVZr)N)x5 – 1000 г абразива. Таким образом титан-циркониевые покрытия (Ti + (Zr, Ti)N) из дальнейших испытаний были исключены по причине неудовлетворительной износостойкости при газоабразивном изнашивании.

Для исследования влияния ванадия на повышение износостойкости были изготовлены и исследованы дополнительные варианты многослойных покрытий при принятых условиях испытаний на газоабразивный износ. Результаты испытаний приведены в Приложении Г (Таблица Г.8, Рисунки Г.8 и Г.9). Полученные результаты показывают, что увеличение содержания ванадия при совместном напылении с титаном в диапазоне их отношений от 0 до 2 вес.% позволяет увеличить износостойкость покрытия в 1,5...2 раза, что, вероятно, связано со способностью ванадия стабилизировать структуру титана в β-области, образовывая с ним непрерывный ряд интерметаллидов [250]. Полученный результат также подтверждается при совместном напылении ванадия и титанового сплава ВТ20 системы легирования Al-Mo-V-Zr (Рисунок 5.2). Химический анализ титан-ванадиевых покрытий приведен в п. 5.5.3, глава. 5.

Исследование поверхности образцов с покрытиями после испытания на газоабразивное изнашивание проводили визуально на металлографическом микроскопе при различном увеличении от 100 до 500Х. Выявлена качественная динамика разрушения поверхности в зависимости от количества использованного абразива при выбранных режимах испытания. Характерные фотографии поверхности с многослойными покрытиями различной степени износа показаны на Рисунках 5.3 и 5.4.

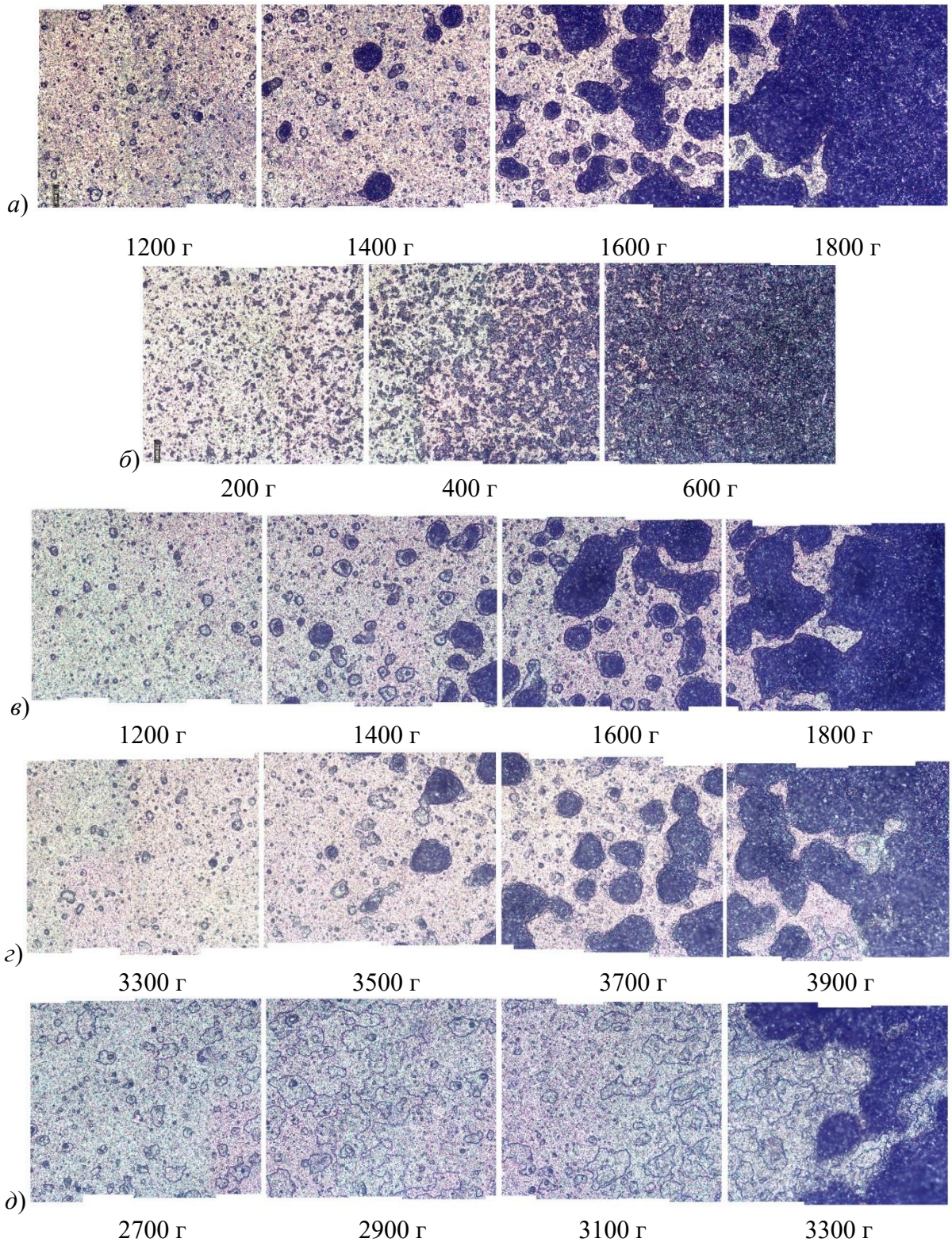


Ti – титановый сплав ВТ1-0; Ti* – титановый сплав ВТ20

Рисунок 5.2 – Изменение износостойкости многослойных покрытий системы ((V, Ti)+(V, Ti)N)x2 при различном содержании ванадия

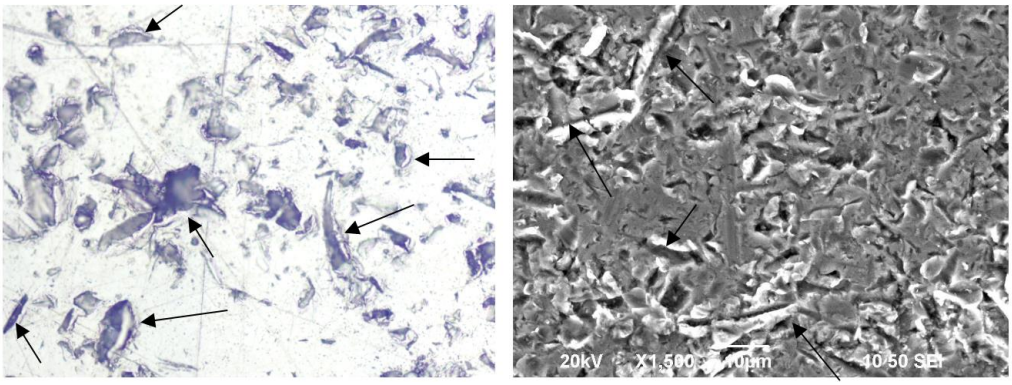
Установлено, что в процессе испытания покрытия изнашиваются послойно с образованием характерного ямочного рельефа, включающего в себя всю толщину покрытия и часть основного материала. Эрозионные ямки (Рисунок 5.4) представляют собой ступенчатые лунки или кратеры, образованные вследствие послойного разрушения нитридных слоев покрытий, начиная с внешнего. На основе фрактографического анализа образованных эрозионных дефектов наиболее вероятной представляется следующая картина износа.

Абразивные частицы электрокорунда, ударяя по поверхности образца с многослойным покрытием, в начальной стадии износа формируют в его внешнем нитридном слое некоторую плотность точечных дефектов в виде лунок диаметром до 50 мкм, что сопоставимо с характерным размером самих частиц. Количество образующихся при этом дефектов, в основном зависит от толщины нитридного слоя h_N (Рисунки 5.3 а, 5.3 б, 5.3 г), твердость которого должна гарантированно превышать твердость абразивных частиц.



а – n=4; h_N=2,5 мкм; V: 50 вес.%; *б* – n=36; h_N =0,5 мкм; V: 50 вес.%;
в – n=4; h_N=2,5 мкм; V: 30 вес.%; *г* – n=4; h_N=5,5 мкм; V: 50 вес.%;
д – n=10; h_N=2,5 мкм; V: 50 вес.%

Рисунок 5.3 – Эрозионное разрушение многослойных покрытий системы ((V, Ti)+(V, Ti)N)xn при различном количестве абразивных частиц (m_a, г), 200X



а *б*

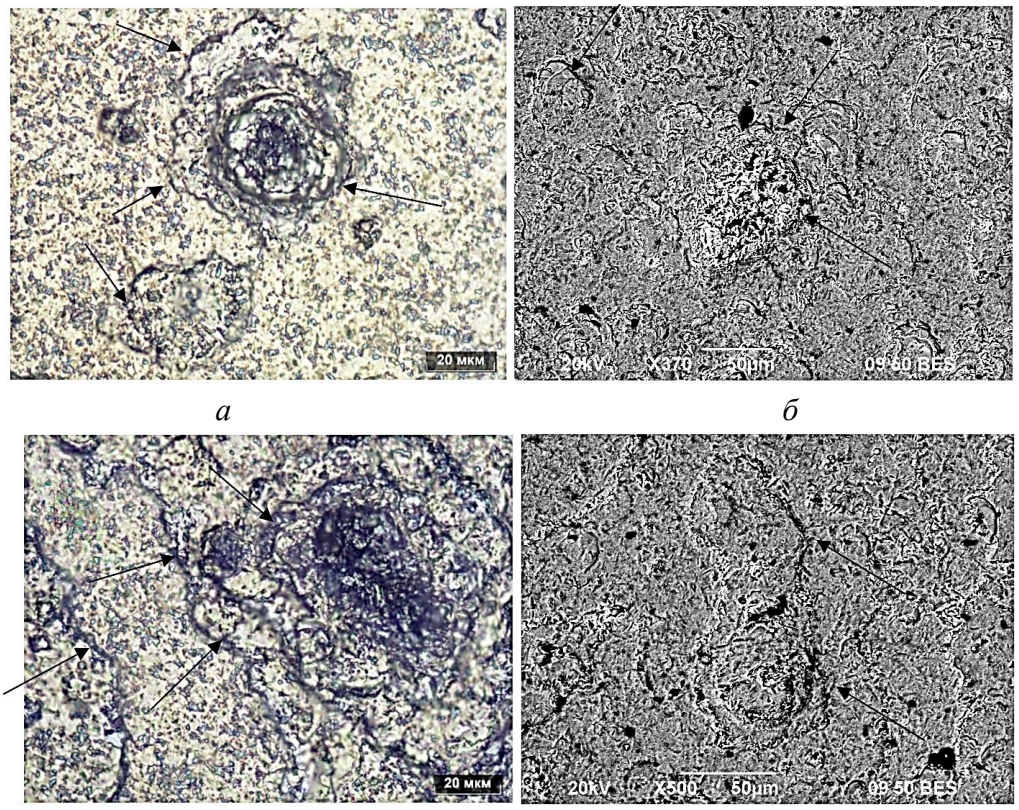
а – оптический микроскоп; *б* – РЭМ во вторичных электронах
Стрелками показаны множественные следы пластической деформации от удара абразивными частицами

Рисунок 5.4 – Исходная поверхность (без покрытия) после испытания на эрозионный износ (m_a = 200 г)

На рисунках видно, что при толщине h_N = 0,5 мкм покрытие не способно сдерживать развитие износа и разрушается на всю толщину до основного материала уже после воздействия на него 200 г абразива (Рисунок 5.3 б). При этом другие покрытия, с большей толщиной нитридных слоев: 2,5 и 5,5 мкм (см Рисунки 5.3 а, 5.3 г), характеризуются меньшей плотностью дефектов даже после воздействия значительно большего количества абразива, 1200 и 3300 г соответственно. Это еще раз наглядно подтверждает сделанное предположение о существовании определенной критической толщины нитридных слоев h_N, зависящей от условий ударного воздействия частиц (пункт 2.4, глава 2), менее величины которой покрытие не обеспечивает защитные свойства поверхности.

После формирования начальной плотности дефектов продолжающиеся удары частиц по поверхности стремятся увеличить площадь образовавшихся лунок. При этом, сравнивая образующийся рельеф исходного образца, без покрытия (Рисунок 5.4), и испытываемых покрытий (Рисунок 5.5), можно заключить, что характер разрушения носит принципиально разный характер. У образца без покрытия в месте удара наблюдаются следы локальной пластической деформации высокой интенсивности. На Рисунке 5.4 а видны характерные следы от абразивных частиц и образованные гребешки пластически деформированного материала (показаны стрелками). Характер разрушения материала поверхности вязкий, без образования микротрещин или сколов.

Для нитридных покрытий характерен хрупкий характер разрушения. Образованные в начальной стадии износа локальные дефекты (Рисунок 5.6 а) увеличиваются в размерах с образованием четких границ лунок (показаны стрелками на Рисунке 5.5), вероятно путем откалывания от них части покрытия, как это показано на Рисунок 5.6 б.



а *б*

в *г*

а – вид в световой микроскоп, m_a = 1400 г; *б* – съемка в отраженных электронах, m_a = 1400 г; *в* – вид в световой микроскоп, m_a = 3100 г; *г* – съемка в отраженных электронах, m_a = 3100 г

Стрелками показаны границы лунок. Размер абразивных частиц ≈ 40 мкм

Рисунок 5.5 – Эрозионные лунки на поверхности многослойных покрытий системы ((V, Ti)+(V, Ti)N)x4

Наблюдаемое разрушение покрытия идет послойно с образованием ступенек между соседними нитридными слоями (Рисунок 5.6 в). Можно предположить, что скорость распространения трещин, возникающих в нитридных слоях, при прохождении более пластичных титановых прослоек должна значительно уменьшаться за счет увеличения перед трещинами области пластической деформации с одновременным снижением уровня механических напряжений.

Для дальнейшего развития трещины и прохождения ее в нижележащий нитридный слой потребуется затратить дополнительную механическую работу. При этом твердые и более плотные (по сравнению с титановыми) нитридные слои затрудняют проникновение в них трещин, создавая перед ними барьер и изменяя направление их развития вдоль границы между титановым и нижележащим нитридным слоями, что косвенно подтверждается отсутствием в изломах видимых титановых прослоек с характерным металлическим блеском. Изменение направления трещин вдоль нитридных слоев объясняет преимущественное разрушение нитридных слоев путем скалывания по границам дефектов без перехода в нижележащие слои. При дальнейшем испытании разрушение нижележащего слоя покрытия может начаться от попадания абразивной частицы

в уже существующую лунку, после чего механизм разрушения повторяется уже на большей глубине (Рисунки 5.6 в, 5.6 г). Пример процесса разрушения показан на Рисунке 5.7.

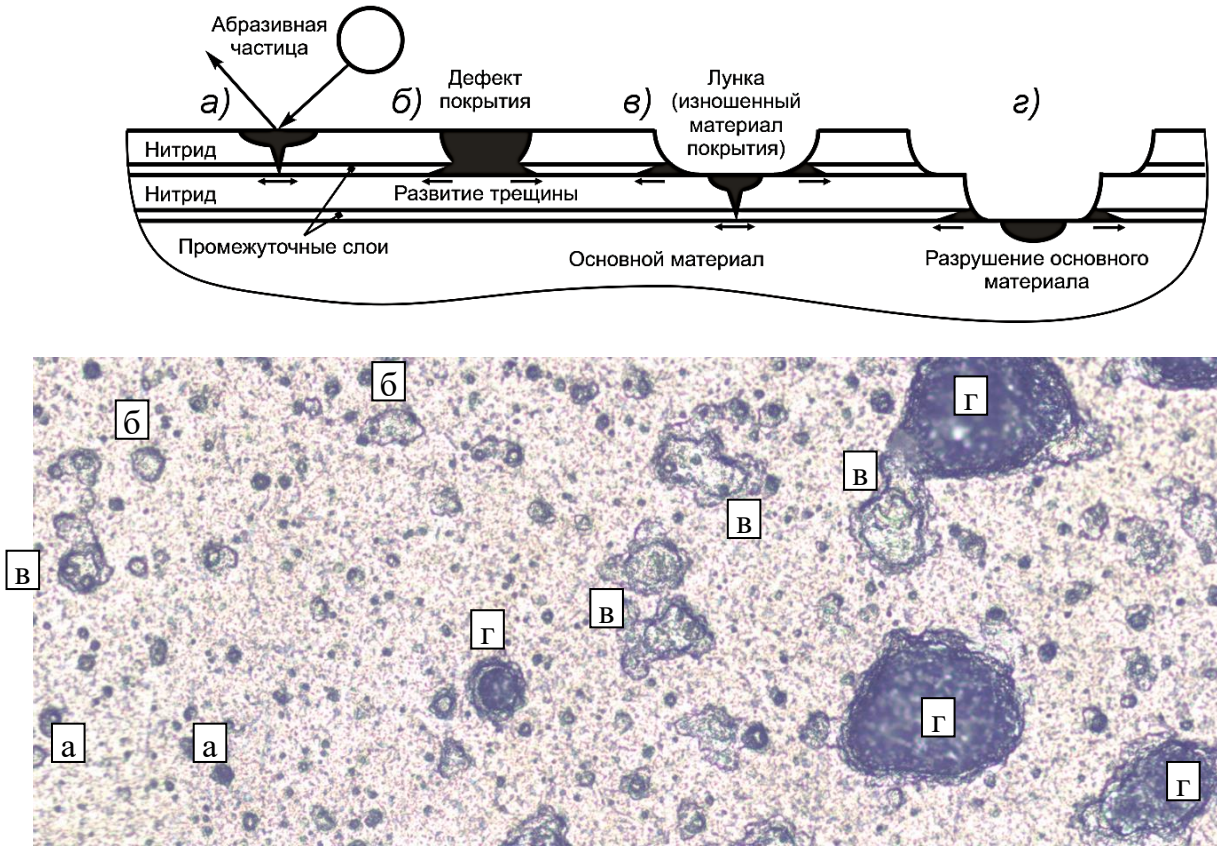
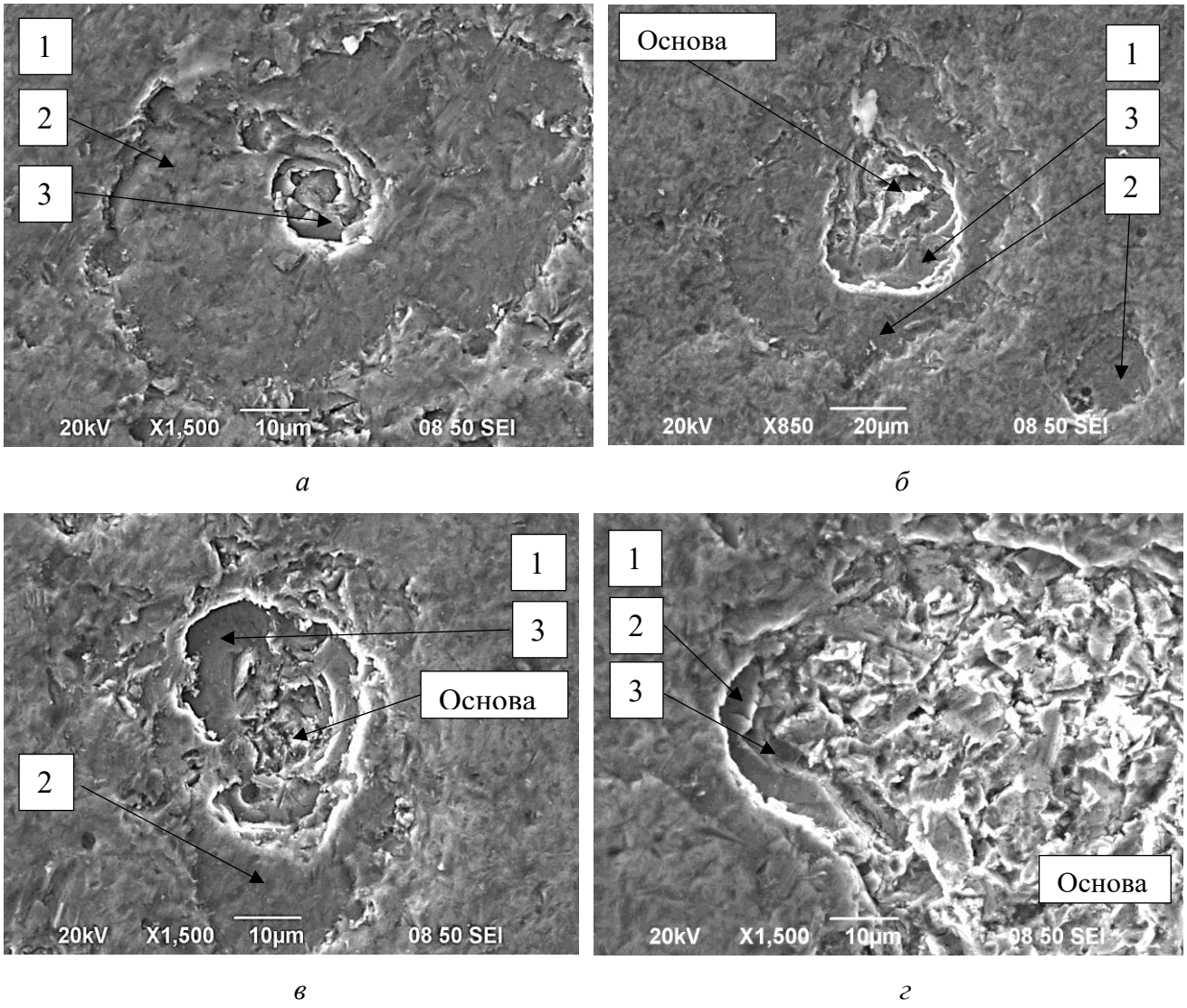


Рисунок 5.6 – Схема газоабразивного изнашивания многослойных ионно-плазменных покрытий на примере четырехслойного покрытия ((V, Ti)+(V, Ti)N)x2

Таким образом, стойкость ионно-плазменных покрытий к газоабразивному износу зависит от нескольких факторов. Во-первых, это материал покрытия прочность или твердость которого должна превышать твердость абразивных частиц при минимальном уровне внутренних напряжений, ускоряющим развитие возникающих трещин. Во-вторых, регулярная структура покрытия, сочетающая в себе нитридные слои с толщиной, достаточной для локализации механических напряжений, возникающих при ударе, и более пластичные промежуточные слои, препятствующие распространению трещин вглубь покрытия. При этом, для увеличения стойкости к изнашиванию при прочих равных условиях, количество пар слоев должно быть максимально большим. В-третьих, это упрочнение и формирование в материале поверхности, перед нанесением покрытия, остаточных напряжений сжатия, что позволяет компенсировать растягивающие напряжения, возникающие при осаждении ионно-плазменных покрытий, и обеспечивать требуемый уровень усталостных свойств детали.



а *б*

в *г*

Цифрами указаны номера нитридных слоев, начиная с внешнего

Рисунок 5.7 – Вид послойного «ступенчатого» износа многослойных ионно-плазменных покрытий на примере шестислойного покрытия ((V, Ti)+(V, Ti)N)x3

После завершения испытаний был проведен фракционный анализ абразивных частиц (Рисунок 5.8). На графиках показано относительное содержание в абразивном песке частиц различных размеров. Видно, что в результате проведения испытаний средний размер частиц заметно уменьшается, что свидетельствует об их разрушении при ударе о покрытие. Дополнительно проведенный элементный анализ материалов покрытия типа (V, Ti)+(V, Ti)N в месте их разрушения выявил в изломах одновременное присутствие повышенного содержания алюминия и кислорода (Рисунок 5.9, Таблицы 5.1 и 5.2), что указывает на наличие вторичных продуктов разрушения абразивных частиц и подтверждает факт их разрушения. На основе полученных результатов

можно заключить, что твердость и прочность исследуемых многослойных покрытий превышает твердость и прочность абразивных частиц, что является одним из основных выдвинутых требований (выводы к главе 2) для повышения стойкости к газоабразивному износу.

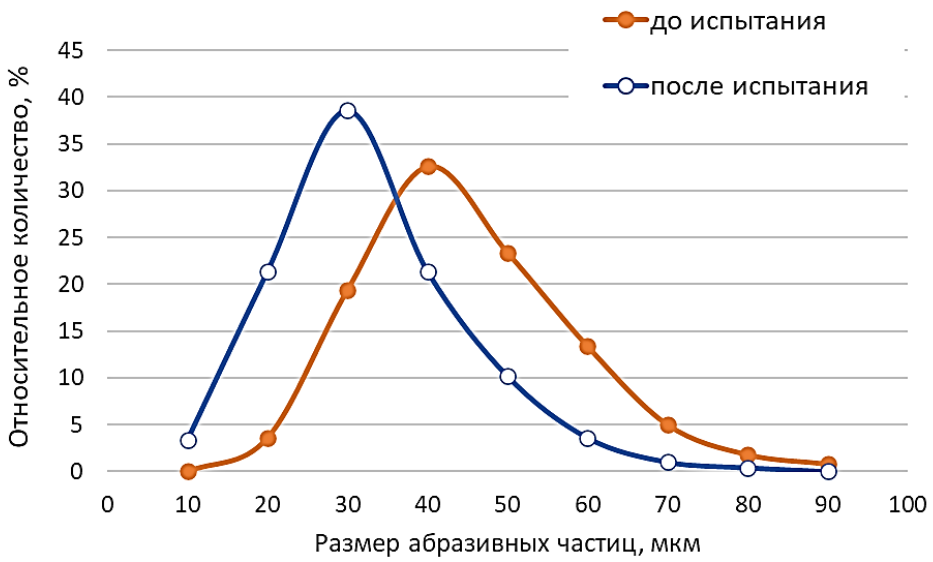
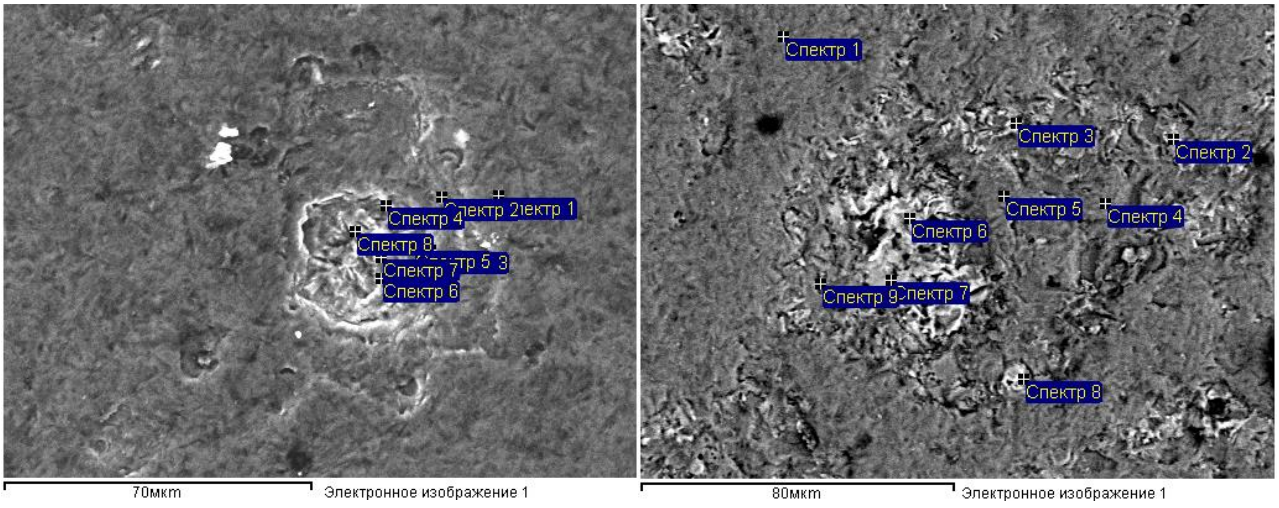


Рисунок 5.8 – Изменение фракционного состава абразивного материала при испытаниях на газоабразивный износ образцов с износостойкими покрытиями



а *б*

Рисунок 5.9 – Результаты элементного анализа в местах разрушения многослойного титан-ванадиевого нитридного покрытия типа (V, Ti)+(V, Ti)N

Таблица 5.1 – Элементный состав к Рисунку 5.9 а, в вес.%

Спектр	N	O	Al	Ti	V
Спектр 1	0,00	33,52	7,80	28,35	30,33
Спектр 2	0,00	нет	0,46	45,55	53,99
Спектр 3	13,77	нет	2,69	38,97	44,57
Спектр 4	0,00	нет	1,43	49,10	46,97
Спектр 5	11,43	нет	0,47	44,38	43,72
Спектр 6	12,29	нет	3,73	54,09	12,61
Спектр 7	0,00	25,94	4,97	53,58	15,51
Спектр 8	0,00	16,38	5,29	63,23	15,10

Таблица 5.2 – Элементный состав к Рисунку 5.9 б, в вес.%

Спектр	N	O	Al	Ti	V
Спектр 1	19,56	нет	0,44	80,01	нет
Спектр 2	12,12	нет	1,58	86,30	нет
Спектр 3	10,14	нет	0,89	88,97	нет
Спектр 4	12,77	нет	0,61	86,62	нет
Спектр 5	14,86	нет	1,07	84,08	нет
Спектр 6	0,00	31,8	8,04	60,16	нет
Спектр 7	0,00	24,7	6,93	64,84	3,53
Спектр 8	0,00	нет	1,00	96,60	2,39
Спектр 9	5,54	нет	1,15	93,31	нет

5.2 Испытание образцов на каплеударную эрозию

Испытания на эрозионную стойкость проводили совместно с ФГБОУ ВО «НИУ МЭИ» на специализированном гидроударном стенде «Эрозия» при соударении водяных частиц (капель) диаметром 820 мкм со скоростями $C_{уд}$ = 250 м/с. Метод исследований и использованное специализированное оборудование позволяет максимально точно воспроизводить реальные условия эрозии рабочих лопаток паровых турбин [251].

Для испытания было подготовлено шесть вариантов покрытий с различной конструкцией и способами нанесения. Конструкция многослойных ионно-плазменных покрытий (материал, толщина, количество слоев) была реализована с учетом результатов теоретических исследований рассеяния упругих волн при каплеударном воздействии, пункт 2.3.3 главы 2.

К настоящему времени эрозионную стойкость рабочих лопаток паровых турбин достигают приваркой или припайкой к их входным кромкам стеллитовых пластин, обеспечивающих многократное снижение скорости изнашивания при каплеударной эрозии [252, 253]. По рекомендации СКБ «Турбина» АО «Силовые машины» (г. Санкт–Петербург) для исследования возможности применения стеллитовых материалов в качестве покрытий было испытано два твердых

сплава на основе карбидов вольфрама с добавлением кобальта и хрома. Покрытия были нанесены на образцы детонационным и сверхзвуковым способом и испытывались совместно с ионно-плазменными покрытиями по одним режимам. Варианты испытанных покрытий приведены в Таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Результаты испытаний на каплеударную эрозию многослойных ионно-плазменных покрытий на образцах из сплава ВТ6

Вариант покрытия	Толщина h, мкм	Инкуб. период m_0, x10^{-4} кг/м^2	Макс. скорость эрозии dE/dM, м^3/кг	Параметр E_0, м
1 ВТ6, без покрытия	–	1,2	0,52	0,72
2 0,5Ti-10TiN	9 ± 1	1,5	0,35	0,55
3 (0,5Ti-10TiN) x2	20 ± 1	2,3	0,22	0,46
4 (0,3Ti-5TiN) x5	26 ± 2	2,5	0,20	0,46
5 (0,3Ti-2,8TiN) x10	31 ± 2	2,7	0,18	0,44
6 WC+20%Co, детонационное напыление	100...200	0,2	4,00	1,31
7 WC+10%Co+4%Cr, сверхзвуковое напыление	250…400	0,2	4,44	1,35

Методика определения эрозионной стойкости состояла в проведении испытаний образцов путем воздействия на испытываемую поверхность заданной массы воды в виде отдельных капель с постоянными диаметром, скоростью и углом падения. В ходе испытания образцы взвешивались, изменение массы образцов в зависимости от массы выпавшей воды отмечали на графике. В результате были построены кинетические кривые эрозионного износа образцов для различных видов защитных покрытий (Рисунок 5.10), которые определяют зависимость средней глубины эрозионного износа (E, м) от массы жидкости, попавшей на единицу испытываемой поверхности (M, кг/м^2):

$$E = \Delta G_M/(\rho \cdot S_{ЭР}), \text{ м} \quad (5.1)$$

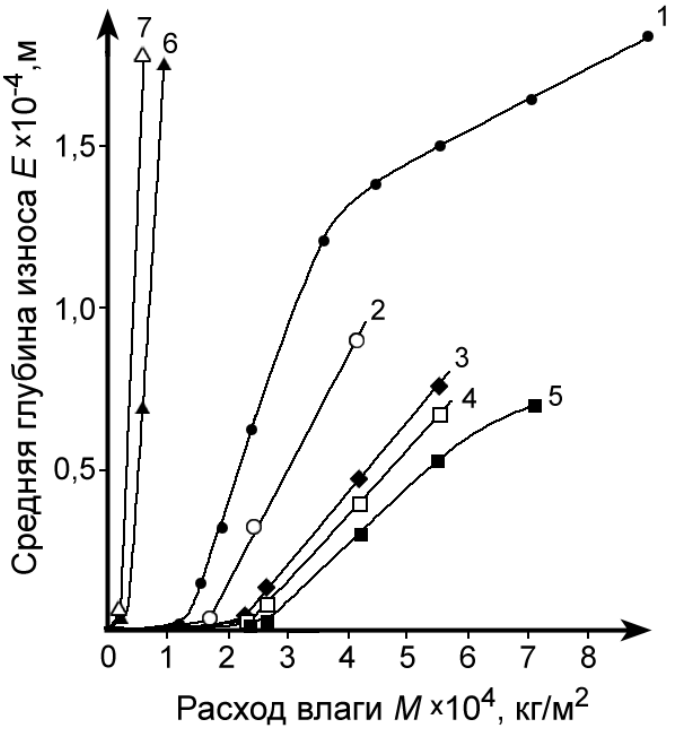
$$M = G_B/S_{ЭР}, \text{ кг/м}^2 \quad (5.2)$$

где ΔG_M – уменьшение массы образца, кг;

ρ – плотность испытываемого материала, кг/м^3;

G_B – масса воды, ударившаяся в виде капель об изнашиваемую поверхность, кг; $S_{ЭР}$ –

площадь изношенной поверхности, м^2.



Цифрами обозначены варианты покрытий в соответствии с Таблицей 5.3

Рисунок 5.10 – Кривые эрозионного износа образцов из титанового сплава ВТ6

Процесс эрозионного разрушения металлических поверхностей характеризуются тремя основными периодами (Рисунок 5.11): инкубационным периодом (m_0), периодом с максимальной скоростью эрозии ($m_П$) и периодом с установившейся скоростью эрозии (m_{ac}). Различают две скорости эрозии: максимальную и установившуюся, кооторые определяются углами наклона (α и β) соответствущих участков кривой эрозии и имеют соответствующие им точки пересечения с осью ординат (E_0 и E_1). Наиболее важными, с точки зрения ресурса работы лопаток турбин, являются определяемые по графикам: величина инкубационного периода (m_0, кг/м^2), максимальная скорость эрозии (dE/dm, м^3/кг) и связывающий их комплексный параметр (E_0, м), [22, 32-34]. Величина установившейся скорости износа и соответствующей ей параметр E_1 для оценки износостойкости защитных покрытий не приемлемы, поскольку при приближении эрозионной кривой к точке *Mn* (Рисунок 5.11) в процессе изнашивания начинает участвовать материал подложки, ускоряющий износ образца [254]. Поэтому при исследовании эрозионной стойкости покрытий кривые эрозионного износа асимптотический период не учитывали.

На основании полученных экспериментальных данных для образцов после различных вариантов упрочнения определяли основные параметры эрозии: инкубационный период (m_0),

максимальную скорость эрозии (dE/dM), параметр изнашивания (E_0) и относительную эрозионную стойкость, как отношение максимальной скорости эрозии исходного и упрочненного образцов. Результаты эксперимента и рассчитанные параметры эрозии представлены в Таблице 5.4, на Рисунках 5.10–5.15. Подробнее о методике проведения испытаний пункт 4.10, глава 4.

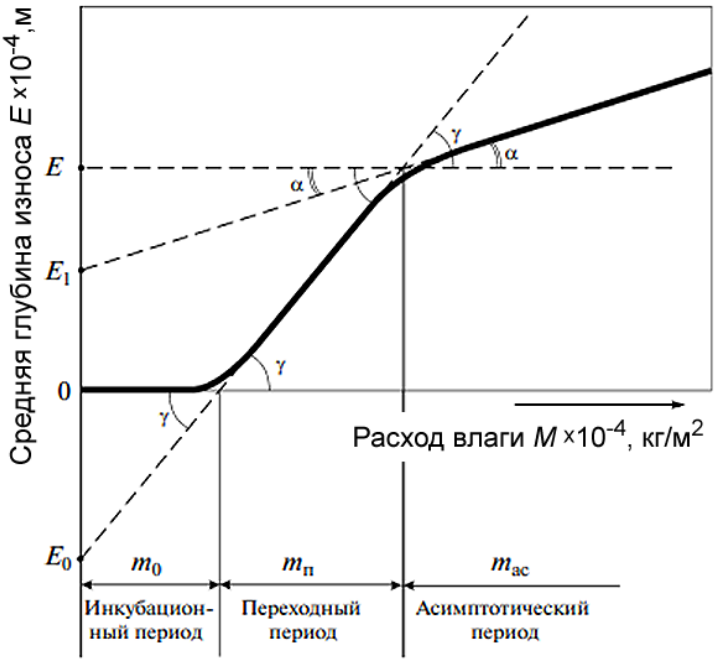


Рисунок 5.11 – Геометрические характристики типовой кривой эрозионного износа при каплеударном воздействии [22, 32-34] (пояснение в тексте)

Механизм капельной эрозии многослойных композиционных покрытий подробно описан в пункте 2.3 главы 2, где показано, что основной причиной этого вида износа износа является многочисленные удары капель, в точке удара которых возникает начальное давление p, зависящее от скорости нормального удара капли по поверхности, скорости распространения упругих волн в материале и его плотности (формула (2.5)). В процессе соударения начальное давление увеличивается до своего максимального значения $p_{max} = 2{,}6p$, действующего по периметру контакта. При выбранных режимах испытания $p_{max} \approx 981$ МПа. В результате удара в поверхности начинают распространяться продольные и поперечные волны упругих деформаций различного направления и интенсивности. Максимальные напряжения, возникающие на фронте поверхностных релеевских волн, равны $\sigma_R = 0{,}75p \approx 272$ МПа. При этих условиях капельноударного воздействия повышение износостойкости поверхности может быть обеспечено за счет повышения механической прочности материалов покрытий и их способности рассеивать волны упругих деформаций без накопления усталостных дефектов. В главе 2, п.2.3. показано, что подбором материалов и толщин отдельных слоев многослойного ионно-

плазменного покрытия можно обеспечить эффективное рассеяние упругих волн (до 90% от величины амплитуды), возникающих при капельной эрозии.

Таблица 5.4 – Критерии эрозионной стойкости покрытий на образцах из сплава ВТ6

Вариант покрытия*	Коэффициент относительной эрозионной стойкости ζ	Коэффициенты изоляции упругой волны** D, дБ
1 ВТ6, без покрытия	1,00	–
2 0,5Ti+10TiN	1,47	2,09
3 (0,5Ti+10TiN) x2	2,31	4,18
4 (0,3Ti+5TiN) x5	2,63	9,06
5 (0,3Ti+2,8TiN) x10	2,89	18,12
6 WC+20%Co, детонационное напыление	0,13	0,10
7 WC+10%Co+4%Cr, сверхзвуковое напыление	0,11	0,10

* Число перед обозначением слоя показывает толщину этого слоя в мкм;

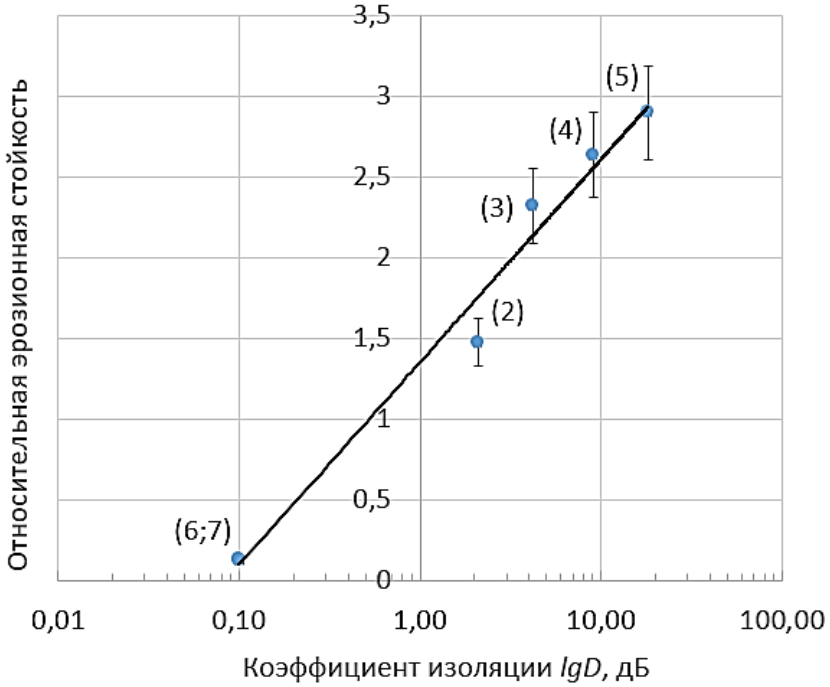
** Расчет проведен по формуле (2.16), пункт 2.3.1, глава 2

Для оценки способности рассеивать упругие волны деформаций, для каждого варианта покрытия был расчитан коэффициент изоляции упругих волн D, дБ (Таблица 5.4). Установлена линейная зависимость относительной эрозионной стойкости от величины D, что подтверждает сделанные ранее предположения о том, что твердость и прочность является необходимым но недостаточным свойством защитных покрытий. На графике (Рисунок 5.12) показано, что наиболее эрозионностойким покрытием является то, которое, являясь изначально достаточно прочным, чтобы выдерживать ударную нагрузку, способно максимально полно рассеивать возникающую при ударном воздействии упругую деформацию.

Наименее стойкими покрытиями, не смотря на сравнительно большую толщину, оказалить твердые газоплазменные покрытия на основе карбида вольфрама, котрые имеют минимальный инкубационный период и начинают разрушаться практически сразу после начала испытания (Рисунок 5.10). Разрушение протекает путем отделения фрагментов покрытия от основого материала с образованием четких границ сколов, возникающих по всей толщине покрытия (Рисунок 5.15), что говорит о хрупком характере разрушения и неудовлетворительной эрозионной стойкости.

Наибольшую эрозионную стойкость проявили многослойные ионно-плазменные покрытия (№3, 4, 5 на Рисунке 5.10) с примерно одинаковой относительной эрозионной стойкостью от 2,3 до 2,9. Нетрудно заметить, что участки эрозионных кривых, соответствующие максимальной скорости износа ионно-плазменных покрытий с числом слоев $n > 2$ пересекаются

с осью ординат приблизительно в одной точке $E_0 \approx 0{,}45 \cdot 10^{-4}$ м. По мнению большинста исследователей, занимающихся проблемой капельной эрозии [22, 32-34, 254], параметр E_0 – является характеристикой материала, определяющей его склонность к эрозионному разрушению.

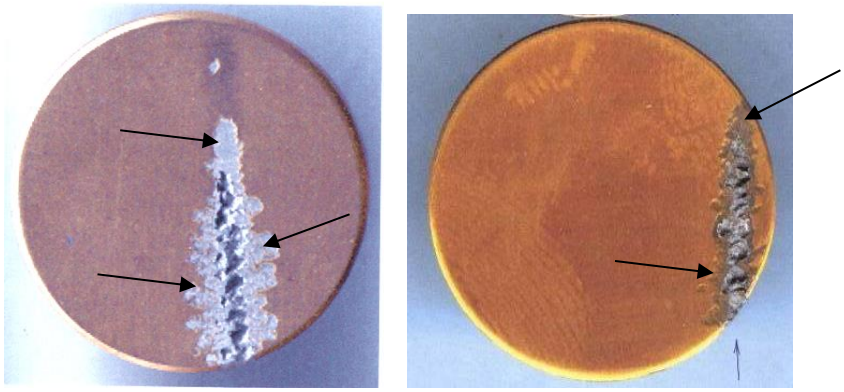


Варианты покрытий указаны в скобках в соответствии с Таблицами 5.3 и 5.4

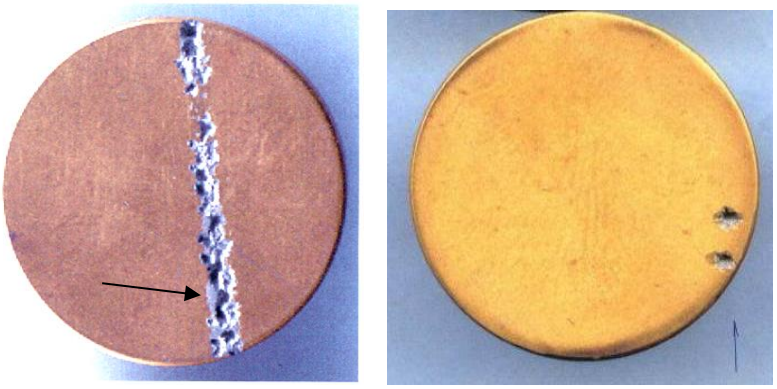
Рисунок 5.12 – Зависимость эрозионной стойкости
от коэффициента изоляции упругой волны многослойными покрытиями

а *б*

Рисунок 5.13 – Образцы из титанового сплава ВТ6 без упрочнения после испытаний на эрозионную стойкость



а *б*



в *г*

а – (Ti+TiN), h = 10,5 ±1 мкм; *б* – (Ti+TiN) х2, h = 21 ±1 мкм; *в* – (Ti+TiN) х5, h = 26,5 ±2 мкм; *г* – (Ti+TiN) х10, h = 31 ±2 мкм

Стрелками поазана область отслоения покрытия

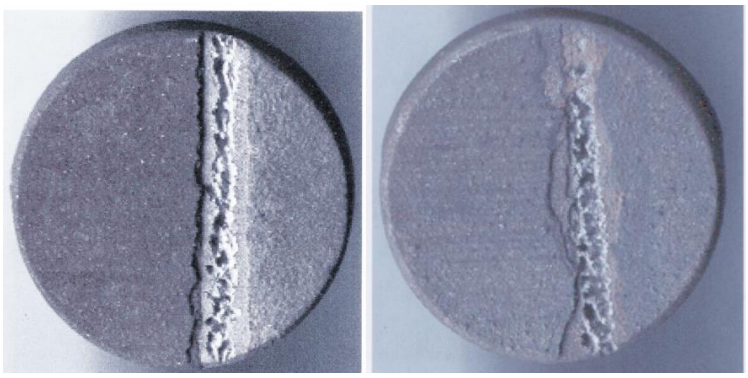
Рисунок 5.14 – Внешний вид образцов ВТ-6 с различными вариантами многослойных ионно-плазменных покрытий

Физический смысл параметра E_0 для хрупких материалов заключается в том, что он отражает вероятный критический размер эрозионной трещины в поверхностном слое с известными физико-механическими свойствами [33, 34, 255]:

$$E_0 = \frac{K_{IC}^2}{2\pi H^2}, \text{м}, \qquad (5.3)$$

где K_{IC} – коэффициент интенсивности напряжений, МПа·м^{0,5};

H – твердость поверхности, Н/мм^2.



а *б*

а – WC+20%Co, детонационное напыление; *б* – WC+10%Co+4%Cr, сверхзвуковое напыление

Рисунок 5.15 – Внешний вид образцов ВТ-6 с различными вариантами многослойных газоплазменных покрытий

Таким образом, при испытании покрытий на капельную эрозию наиболее стойкими (при прочих равных условиях) будут те, которые имеют наименьшую величину параметра E_0 и, следовательно, являются более прочными по критерию коэффициента интенсивности напряжений. Это также подтверждается известными экспериментальными данными [36, 256, 257], где делается вывод, что при уменьшении абсолютного значения E_0 сопротивление материала эрозии увеличивается.

На графике (Рисунок 5.10) видно, что с увеличением количества слоев у покрытия уменьшается наклон кривой в области максимального изнашивания, что свидетельствует об уменьшении скорости износа. На Рисунке 5.14 видно, что ионно-плазменные покрытия при воздействии капель жидкости, разрушаются послойно так, что с увеличением количества слоев область разрушения покрытия вокруг эрозионных лунок (показана стрелками) уменьшается в размерах. Это еще раз косвенным образом подтверждает сделанные предположения об эффективном рассеянии упругих деформаций путем увеличения количества отдельных слоев покрытия, нанесенных при определенном соотношения толщин, что, в конечном итоге, уменьшает скорость каплеударной эрозии.

5.3 Испытание образцов на стойкость при фреттинг-коррозии

Работоспособность рабочих лопаток из титановых сплавов паровых и газовых турбин, эксплуатируемых в условиях контактного взаимодействия, в первую очередь определяется их стойкостью к износу, влияющую на усталостную прочность и долговечность. При этом общеиз-

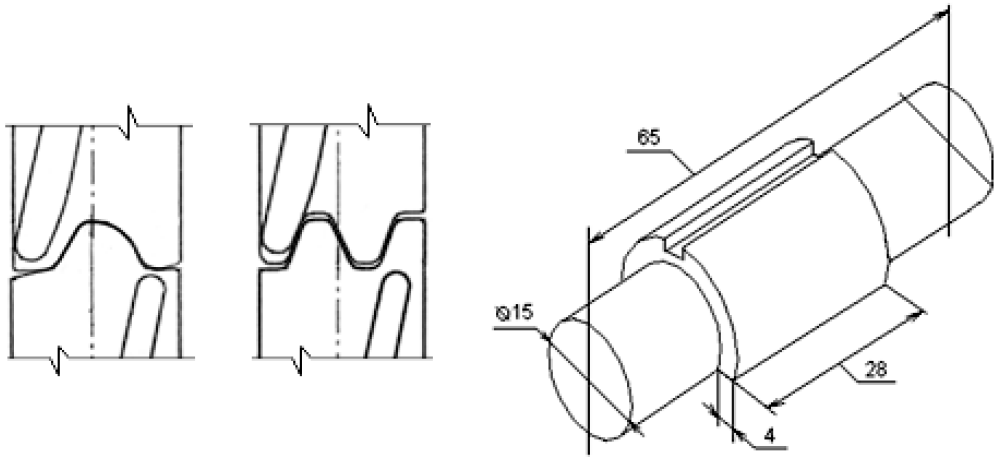
вестно, что титановым сплавам присущи такие недостатки, как склонность к адгезионному схватыванию (заеданию), массопереносу (наволакиванию) и задирам, что катастрофически снижает износостойкость и является недопустимым при эксплуатации. Одним из путей решения этой задачи является использование защитных покрытий, повышающих фреттинг-стойкость, снижающих дефектность поверхности и в конечном итоге обеспечивающих заданный предел выносливости лопаток.

Для исследования износостойкости многослойных ионно-плазменных покрытий были проведены испытания на фреттинг-коррозию, фреттинг-износ и трение скольжения.

5.3.1 Испытания на фреттинг-коррозию

Испытания на стойкость к фреттинг-коррозии проводили на испытательной базе лаборатории прочности ПАО «ОДК-УМПО» на специально разработанном стенде. Стенд соответствует требованиями ГОСТ 23.211–80 (Вид испытаний II – Специальные испытания) и предназначен для испытания на фреттинг и фреттинг-коррозию сопряжений образцов с криволинейными поверхностями. Подробнее об испытательном оборудовании и методике проведения испытаний изложено в пункте 4.8 главы 4.

Геометрические размеры образцов (Рисунок 5.16), состояние контактирующих поверхностей и режимы испытания имитировали условия эксплуатации бандажных полок паровых турбин типа К-255 и были согласованы с СКБ «Турбина» АО «СМ-ЛМЗ».



а *б* *в*

а, *б* – разновидности сопряжения бандажнных полок рабочих лопаток паровых турбин;

в – испытываемое сопряжение «Вал – Полувтулка»

Рисунок 5.16 – Схемы испытания на фреттинг и фреттинг-коррозию

Испытания проводили при следующих режимах:

а) давления в контакте: p = 10,0 МПа (100 кгс/мм^2);

б) двойная амплитуда проскальзывания: $2Am$ = 0,1 мм;

в) частота относительного проскальзывания образцов: f = 50 Гц;

г) количество циклов (база испытания): $N = 2 \cdot 10^5$.

В качестве объекта исследования было выбрано сопряжение «вал-полувтулка», имитирующая контактное сопряжение бандажных полок рабочих лопаток паровых турбин (Рисунок 5.16 в).

Образцы для испытания были изготовлены из титанового сплава ВТ6. На поверхности вала и полувтулку было нанесено несколько вариантов защитных покрытий. Их материал и конструкция (материал, количество и толщина отдельных слоев) были выбраны с учетом результатов испытаний стойкости к каплеударной эрозии (пункт 5.2, глава 5) и результатов теоретических исследований (пункт 2.3, глава 2) из предположения нанесения одного варианта покрытия на все рабочие поверхности лопаток, включая входную, выходную. кромки и контактные поверхности бандажных полок. Варианты исследуемых покрытий приведены в Таблице 5.5.

Таблица 5.5 – Свойства образцов из сплава ВТ6 для испытания на фреттинг-коррозию

Вариант покрытия*	Толщина h, мкм	Микротвердость $HV_{0,1}$	Степень поражения поверхности G, %
1 ВТ6, шлифование без покрытия	–	362	32,7±0,5
2 Ионная имплантация азота	–	540	16,4±0,7
3 0,5Ti+10TiN	10 ±1	2100	22,5±0,6
4 (0,5Ti+10TiN) x2	20 ±1	1850	7,4±0,5
5 (0,3Ti+5TiN) x5	26 ±2	1980	0,8±0,3
6 (0,3Ti+2,8TiN) x10	32 ±2	2250	0,2±0,6

* Число перед обозначением материала обозначает толщину его слоя в мкм

В результате фреттинга на контактных поверхностях образцов были сформированы характерные механические дефекты в виде рисок натертостей (механического износа) и следы коррозии в виде темных пятен, предположительно, окислов титана (Рисунки 5.17–5.18).

В качестве критерия оценки коррозионного повреждения изношенной поверхности использовали критерий G (степень поражения поверхности), рекомендуемый ГОСТ 9.908-85 для оценки коррозии пятнами:

$$G = \frac{1}{S}\sum_{i=1}^{n} S_i \cdot 100\%, \qquad (5.4)$$

где S_i – площадь i-го пятна фреттинг-коррозии, м^2;

S – площадь контакта, м^2;

n – количество пятен.

а *б*

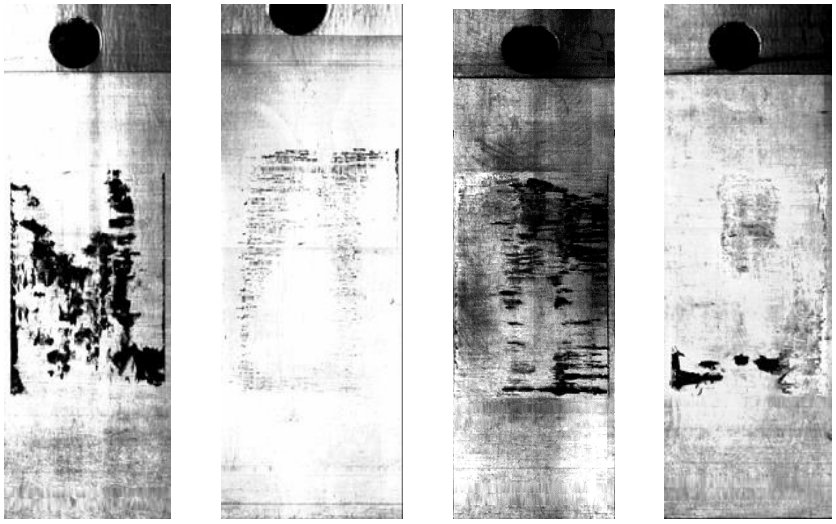
а – исходное состояние, без упрочнения; *б* – после ионной имплантации азота

Рисунок 5.17 – Внешний вид образцов после испытания на фреттинг

а *б* *в* *г*

а –0,5Ti+10TiN; *б* – (0,5Ti+10TiN)x2; *в* – (0,3Ti+5TiN)x5; *г* – (0,3Ti+2,8TiN)x10

Рисунок 5.18 – Внешний вид образцов с покрытием после испытания на фреттинг



а *б* *в* *г*

а – исходная поверхность без упрочнения;
б – ионная имплантация азота; *в* – покрытие 0,5Ti+10TiN; *г* – покрытие (0,5Ti+10TiN)x2
(обозначение покрытий в соотв. с Таблицей 5.3)

Рисунок 5.19 – Внешний вид (развертка) контактных поверхностей образцов «Вал» после испытания на фреттинг

Развертки контактных поверхностей с образованными в результате фреттинг-коррозии пятнами окислов показаны на Рисунке 5.19. Микрофотографии дефектов поверхности, образованных в результате испытания показаны на Рисунке 5.20.

Анализ результатов проведенного исследования позволяет установить следующее. В результате фреттинга исходного шлифованного образца без дополнительной упрочняющей обработки) на его поверхности была сформирована сетка поверхностных усталостных трещин (Рисунок 5.20 а, б), расположенных по направлению трения образцов. В местах скопления трещин наблюдается интенсивное выкрошивание материала и образование совокупности магистральных поверхностных трещин с неровными, сколотыми краями. Поверх основного материала сформирована плотная хрупкая пленка, предположительно оксид титана III (Ti_2O_3) насыщенного темного цвета (Рисунки 5.19 и 5.20 в, г). Установлено, что разрушение оксидов начинается с их края и носит хрупкий очаговый характер. При разрушении оксидов образуются частицы износа размером 2-5 мкм (Рисунок 5.20 г), которые скапливаются внутри образованных поверхностных дефектов (Рисунок 5.20 б).

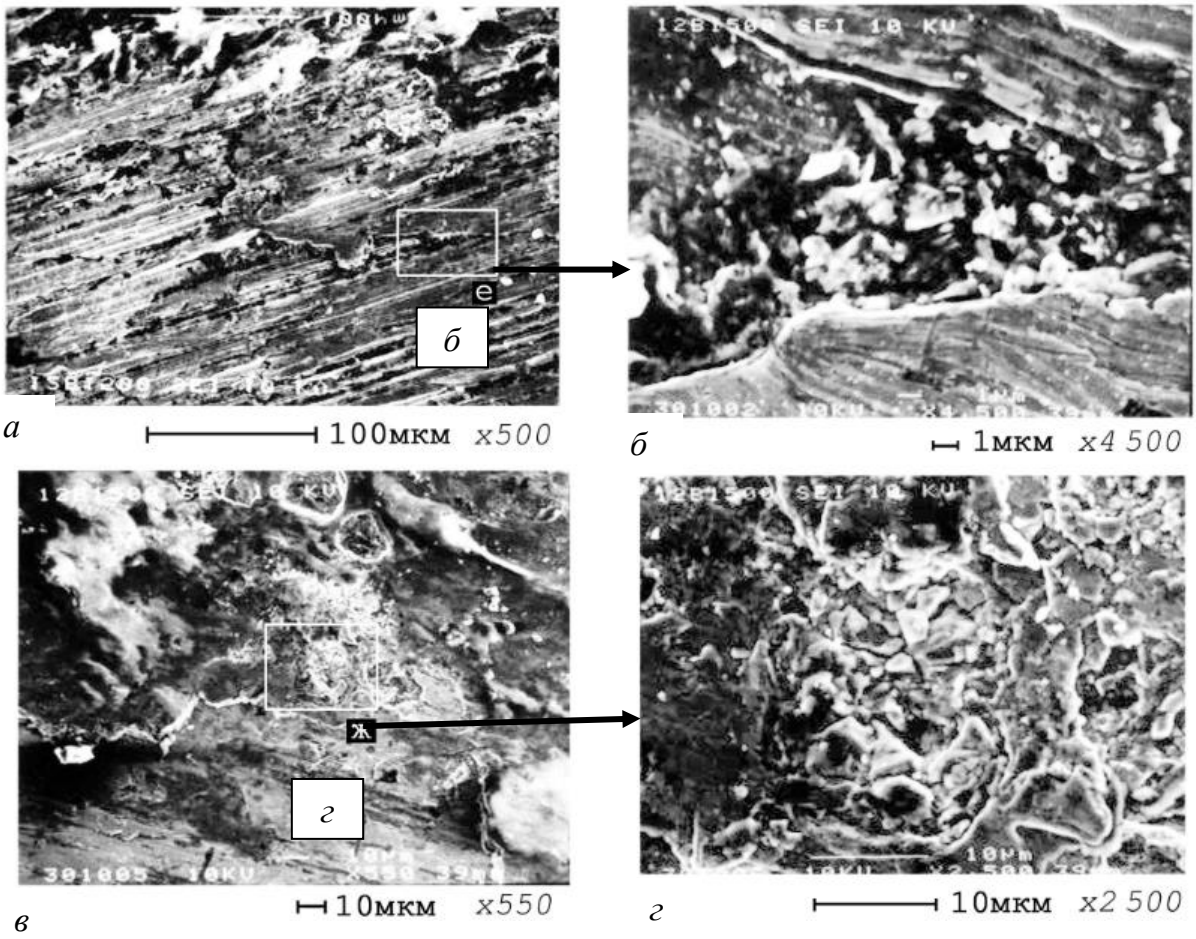
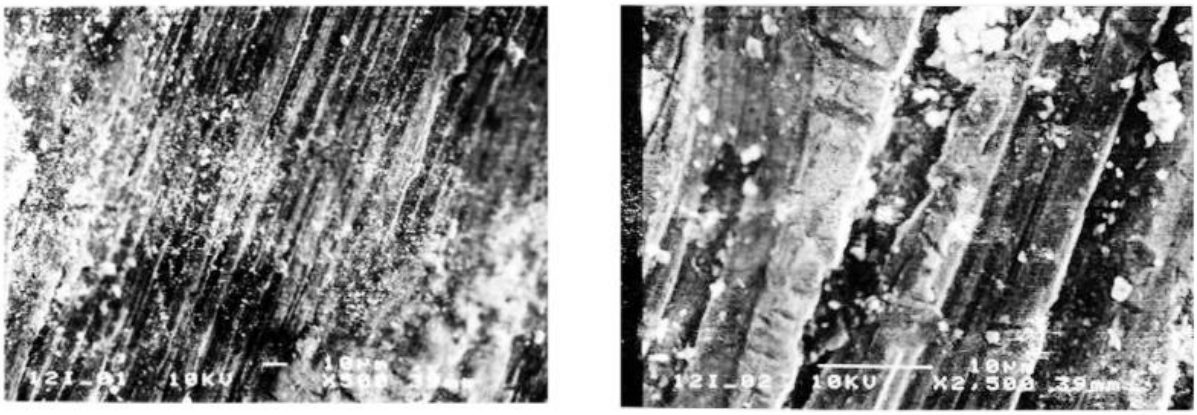


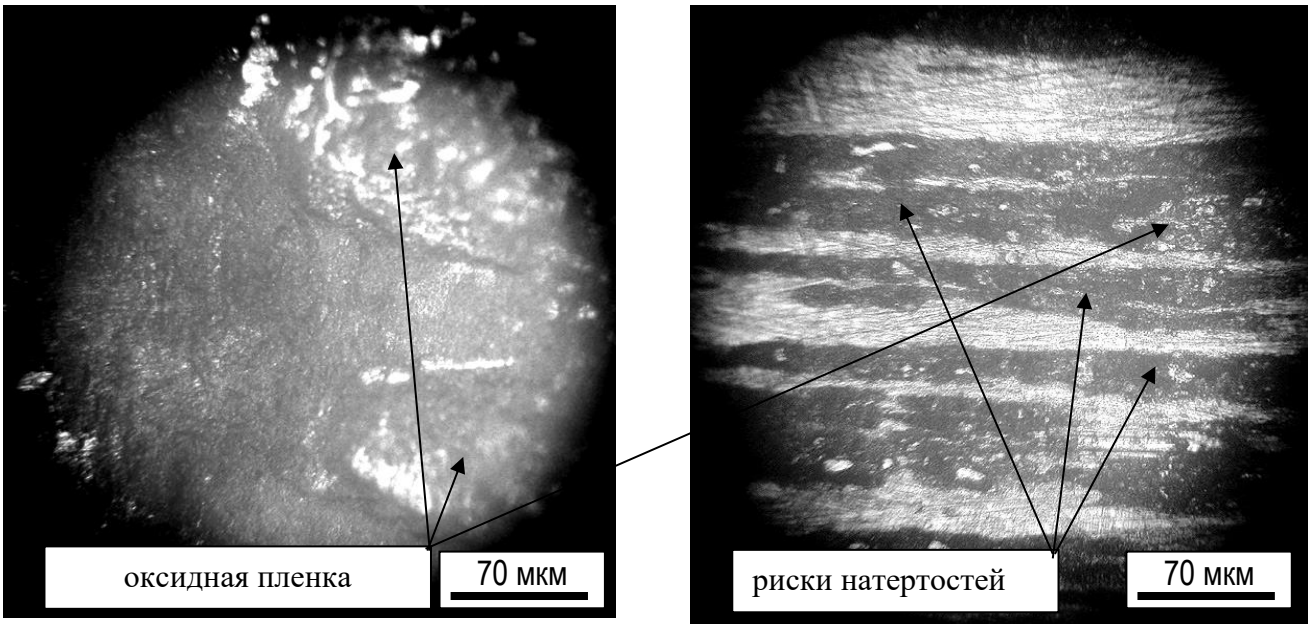
Рисунок 5.20 – Микрофотография дефектов на изношенных поверхностях образцов «Вал» без упрочнения

Исследования имплантированной поверхности после испытания на фреттинг-коррозию показали, что поверхностные дефекты имеют сравнительно небольшую ширину от 5 до 50 мкм и, развиваясь, образуют поверхность в виде совокупности ступенек, заполненных вторичными продуктами износа (см Рисунки 5.21, 5.22 б). Образованные ступеньки вытянуты вдоль направления скольжения и носят периодический характер. Плотной пленки оксидов на образце не обнаружено. Вместе с тем, визуальный осмотр показал, что оксид титана на поверхности все же присутствует, но в виде локальных пятен темного цвета внутри поверхностных дефектов (Рисунок 5.26 б). Следов развития усталостных трещин на контактных поверхностях не обнаружено.



а *б*

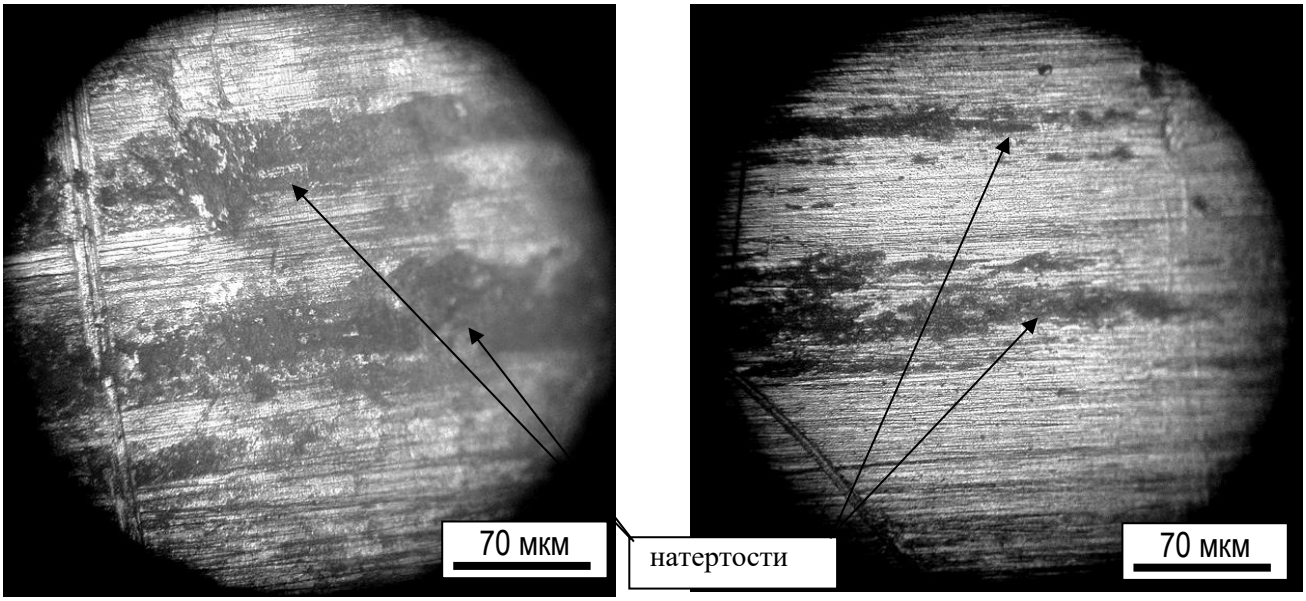
Рисунок 5.21 – Микрофотография дефектов на изношенных поверхностях образцов «Вал» после ионной имплантации азота (доза $D = 2 \cdot 10^{17}$ ион/см^2)



а *б*

а – исходная поверхность без упрочнения; *б* – ионная имплантация азота

Рисунок 5.22 – Микрофотография дефектов на изношенных поверхностях образцов «Вал» после испытания на фреттинг



а *б*

а – покрытие 0,5Ti+10TiN; *б* – покрытие (0,5Ti+10TiN) x2

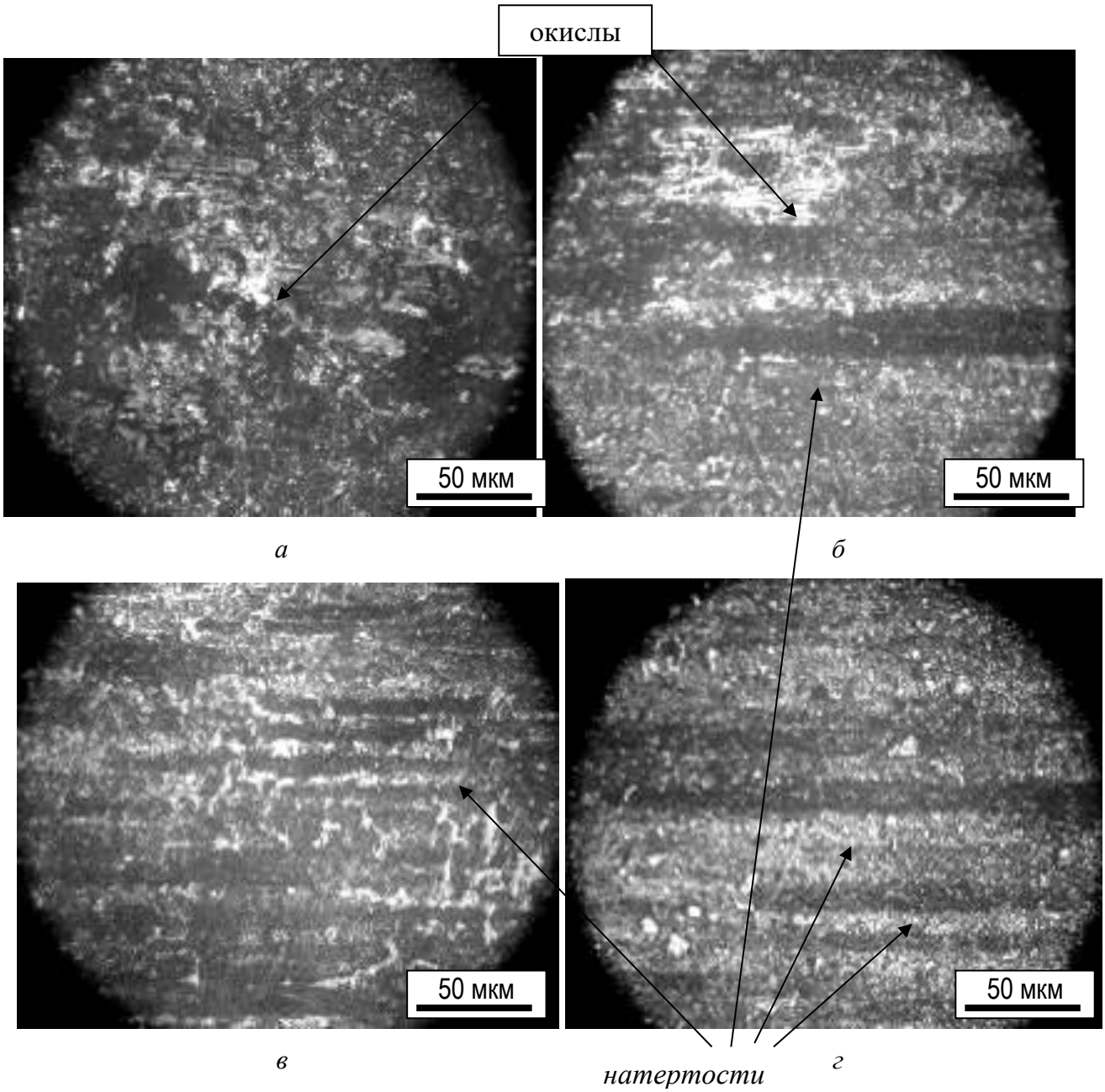
Обозначение покрытий приведены в соответствии с Таблицей 5.5

Рисунок 5.23 – Микрофотография дефектов на изношенных поверхностях образцов «Вал» после испытания на фреттинг

Износ образцов с нитридными покрытиями 0,5Ti+10TiN и (0,5Ti+10TiN) x2 (Рисунок 5.23 а, б) носит локальный характер с образованием единичных механических повреждений шириной до 30 мкм, заполненных оксидами темного цвета, предположительно оксид титана III (Ti_2O_3). При этом образец с большим количесвом слоев (0,5Ti+10TiN) x2 проявил себя более стойким к осислению, что, вероятно, связано более высокой износостойкостью и меньшими размерами поверхностных повреждений (Рисунок 5.19 г).

Еще более стойкими к окислению при фреттинг-корозии проявили себя десяти и двадцатислойные варианты покрытия на основе нитрида титана, соответственно (0,3Ti+5TiN)x5 и (0,3Ti+2,8TiN)x10 (Рисунки 5.18 в, 5.18 г). Контактная поверхность этих образцов темно-желтого цвета со следами приработки в виде светлых полос механического износа (натертостей) и рисок шириной до 10 мкм, вытянутых в направлении трения (Рисунок 5.24). Вторичных продуктов трения и следов оксидов титана внутри образованных рисок не обнаружено, что, вероятно, связано с незначительной величиной износа покрытия, в пределах шероховатости. Можно предположить, что в связи с небольшой глубиной образованных поверхностных дефектов, продукты износа покидают зону трения, не задерживаясь в них. Не смотря на меньшую толщину нитридных слоев по сравнению с вышеописанными вариантами нитрид-титановых покрытий

(Ti+TiN), эти образцы продемонстрировали максимальную износостойкость при принятых условиях испытания, практически без образования поверхностных дефектов (Рисунки 5.18 в, 5.18 г).



а, б – покрытие (0,3Ti+5TiN) x5; *в, г* – покрытие (0,3Ti+2,8TiN) x10

Обозначение покрытий приведены в соответствии с Таблицей 5.5

Рисунок 5.24 – Микрофотография дефектов на изношенных поверхностях образцов «Вал» после испытания на фреттинг

5.3.2 Исследование дефектности поверхности

Для исследования величины износа были проведены измерения диаметров валов по контактным поверхностям до и после испытания. Полученные значения не позволили определить изменение размера образцов, величина которого не превышала инструментальной погрешности 0,005 мм. Наблюдаемый незначительный по величине износ является характерным для процесса фреттинга и объясняется малой амплитудой взаимного смещения трущихся поверхностей, как правило менее 0,1 мм без заметного проскальзывания. Наибольшую опасность представляют возникающие поверхностные дефекты, которые, являясь локальными концентраторами напряжений, многократно снижают предел выносливости материала [49, 52-54]. В этой связи дефектность изношенной поверхности определяли, исследуя профиль шероховатости и его параметры: *Ra*, *Rmax* и *k*-критерий [54, 59], который показывает во сколько раз среднее арифметическое отклонение профиля поверхности *Ra* отличается от наибольшей высоты неровностей *Rmax*:

$$k = Ra\ (1 - Ra/Rmax) \in [0 \ldots Ra], \text{ мкм}, \qquad (5.5)$$

где *Ra* – среднее арифметическое отклонение профиля изношенной поверхности, мкм;

Rmax – наибольшая высота неровностей изношенной поверхности, мкм.

При $k \to 0$ наблюдается минимальная дефектность изношенной поверхности, соответствующей условию: $Rmax \to Ra$. В этом случае профиль шероховатости равномерный, без концентраторов напряжений в виде глубоких впадин профиля: рисок, царапин, трещин и др. В обратном случае, при $k \to Ra$, величина максимального отклонения профиля намного превышает среднее значение шероховатости (Rmax >> Ra), что может свидетельствовать о наличии в поверхности значительных дефектов.

Исследование шероховатости проводились путем снятия профилограмм с поверхности образцов до и после фреттинга по общепринятой методике ГОСТ 2789-73 на профилографе-профилометре Hemmelwerk T-500 с автоматическим расчетом основных параметров шероховатости и записью данных на компьютер. Заданные параметры измерения шероховатости: базовая длина $L_b = 15$ мм; длина отсечки $L_c = 0{,}8$ мм. Перед измерением с поверхности образцов были удалены окислы специальным антикоррозионным раствором по инструкции ПАО «ОДК-УМПО» с последующей ультразвуковой промывкой в деионизированной воде в течение 20 минут.

Расчеты величины *k*-критерия дефектности поверхности и его изменения в результате испытания на фреттинг-коррозию приведены в Таблице 5.6 и на Рисунке 5.25.

Таблица 5.6 – Результаты исследования шероховатости и дефектности поверхности

Вариант покрытия*	Измерение до фреттинга			Измерение после фреттинга		
	Ra_1	$Rmax_1$	k_1, мкм	Ra_2	$Rmax_2$	k_2, мкм
1 ВТ6, шлифование без покрытия	0,32	2,51	0,28	2,5	43,6	2,36
2 Ионная имплантация азота	0,32	3,68	0,29	0,58	5,28	0,52
3 0,5Ti+10TiN	0,22	3,13	0,20	0,69	10,2	0,64
4 (0,5Ti+10TiN) x2	0,23	2,48	0,21	0,49	5,09	0,44
5 (0,3Ti+5TiN) x5	0,69	5,26	0,60	0,85	5,09	0,71
6 (0,3Ti+2,8TiN) x10	0,78	4,98	0,66	0,79	5,98	0,69

* Число перед обозначением материала обозначает толщину его слоя в мкм

Изменение величины *k*-критерия позволяет определить склонность исследуемой поверхности к образованию поверхностных механических дефектов в результате фреттинг-коррозии. На гистограмме (Рисунок 5.25) видно, что все исследуемые варианты упрочнения являются эффективными способами защиты от фреттинга и способны многократно повысить фреттинг-стойкость исходной поверхности, от 2,7 до 8,1 раз.

Рисунок 5.25 – Изменение дефектности контактных поверхностей образцов «Вал» в результате испытания на фреттинг-коррозию

Наибольшую стойкость показали многослойные покрытия со сравнительно большой толщиной и количеством слоев: (0,3Ti+5TiN) x5 и (0,3Ti+2,8TiN) x10, что также подтверждается проведенными микроскопическим исследованием изношенной поверхности (Рисунок 5.24). Меньшая дефектность этих покрытий может быть связана с послойным характером износа нитридных слоев, толщина которых составляет 5,0 и 2,8 мкм соответственно, что заметно меньше, чем у других вариантов покрытий, которая достигает ≈ 10 мкм.

5.3.3 Исследование особенностей изнашивания многослойных покрытий

Для исследования изнашивания многослойных покрытий при фреттинг-коррозии были проведены испытания по схеме, показанной на Рисунке 5.26. Представленная схема моделирует трибосопряжение антивибрационных полок рабочих лопаток компрессора низкого давления ГТУ АЛ-31СТ, работающего в составе газоперекачивающего агрегата «Уфа-16Р». Отличительной особенностью этой схемы испытания является концентрация механической нагрузки, действующей вдоль линии контакта, что соответствует наиболее жесткому режиму испытания. Подробнее о методике и испытательном оборудовании изложено в п. 4.8 главы 8.

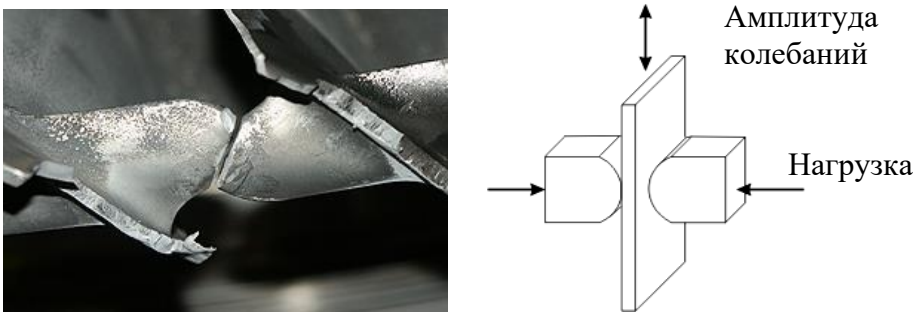
Геометрические размеры образцов, состояние контактирующих поверхностей и режимы испытания были согласованы с ОКБ «Мотор» ПАО «ОДК-УМПО» (г.Уфа). Испытания проводили при следующих режимах:

а) давления в контакте: p = 10±5,0 МПа (1±0,5 кгс/мм^2);

б) двойная амплитуда проскальзывания: 2Am = 0,1±0,01 мм;

в) частота относительного проскальзывания образцов: f = 550 Гц;

г) количество циклов (база испытания): $N = 5 \cdot 10^6$.



а *б*

а – износ антивибрационных полок рабочих лопаток компрессора низкого давления ГТУ;

б – схема испытания образцов на фреттинг

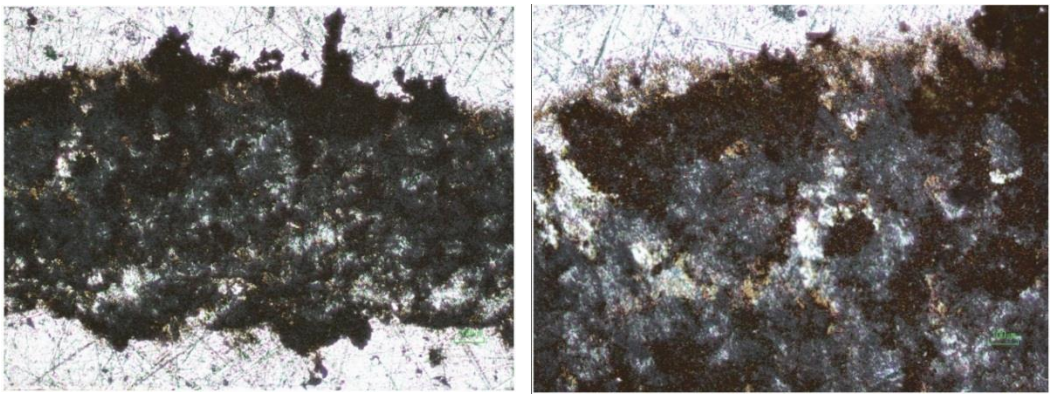
Рисунок 5.26 – Схема испытания на фреттинг антивибрационных полок

Образцы для испытания были изготовлены из титанового сплава ВТ6. На поверхности образцов было нанесено несколько вариантов защитных покрытий. Материал, толщина и количество пар слоев приведены в Таблице 5.7. В результате испытания на поверхности образцов было сформировано характерное для фреттинг-коррозии пятно контакта со следами окисления (Рисунки 5.27, 5.28). Изношенная поверхность в месте пятна контакта была исследована на микроскопе NIKON MA100N при увеличении от 50 до 200Х.

Таблица 5.7 – Результаты исследования шероховатости и дефектности поверхности

Вариант покрытия*	Толщина покрытия h, мкм	Глубина износа покрытия**, мкм
1 ВТ6, шлифование без покрытия	–	11,0±1,0
2 (0,5Ti+10TiN) x2	20±2	8,0±0,5
3 (0,3Ti+5TiN) x2	10±1	4,5±0,3
4 (0,5Ti+3TiN) x4	14±2	3,0±0,5
5 (0,3Ti+1,5TiN) x4	7±1	2,1±0,3

* Число перед обозначением материала обозначает толщину его слоя в мкм
** Режимы: p=10 МПа; $2Am$ = 0,1 мкм; $N = 5 \cdot 10^6$ циклов

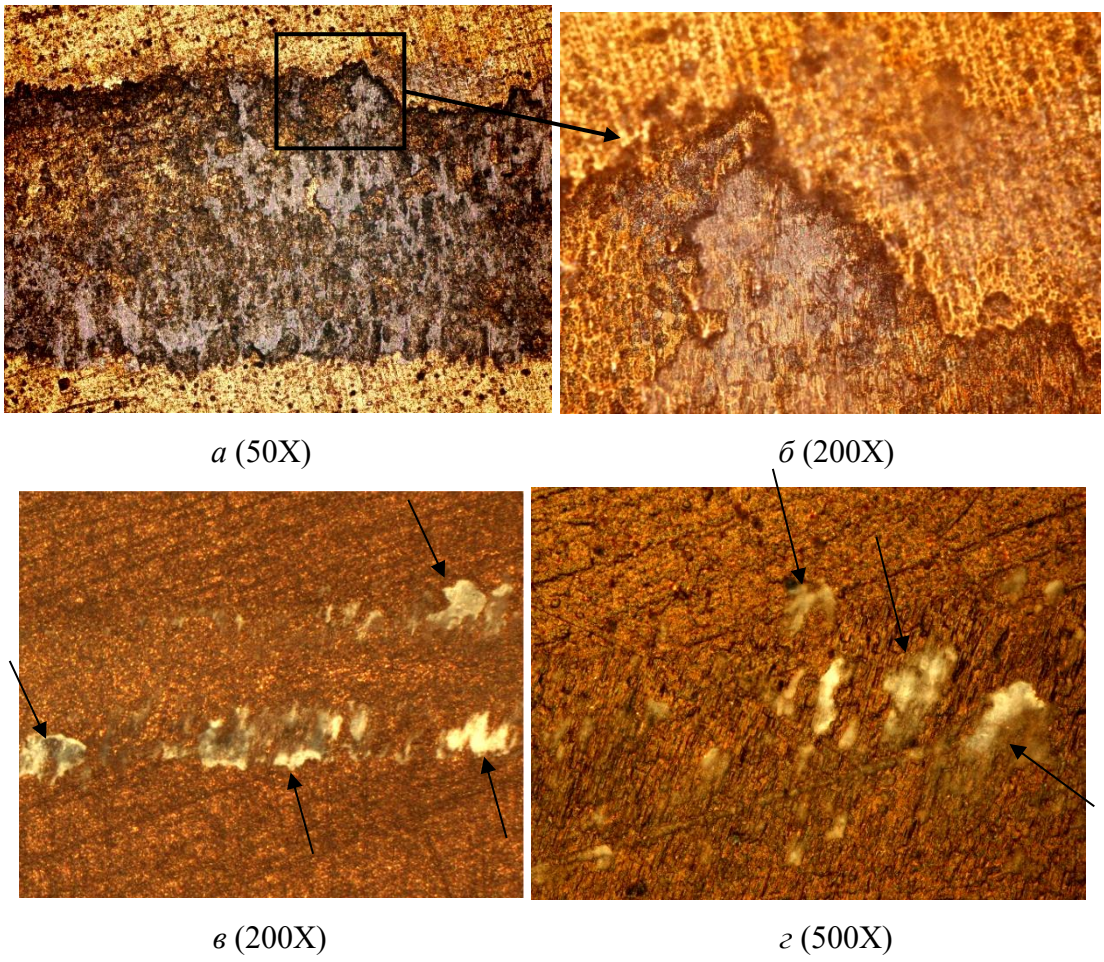


а (50Х) *б* (200Х)

Рисунок 5.27 – Вид изношенной поверхности образцов в исходном состоянии, без упрочнения, при различном увеличении

На контактных поверхностях всех образцов после испытания была образована дефектная поверхность, покрытая рыхлым бугристым слоем темно-коричневого, ближе к черному, цвета, предположительно монооксидом титана (оксид титана II, TiO), Рисунок 5.27. Особенностью из-

нашивания образцов с нанесенным многослойным покрытием нитрида титана, являлось образование в некоторых случаях на контактных поверхностях вторичных продуктов износа в виде порошка светлого цвета, предположительно двуокиси титана (оксид титана IV, TiO_2), легко удаляемый с поверхности при механическом воздействии. Образование различных оксидов при фреттинг-коррозии предположительно связано с окислением различных титановых сплавов, отличающихся по химическому составу.



а (50Х) *б* (200Х)

в (200Х) *г* (500Х)

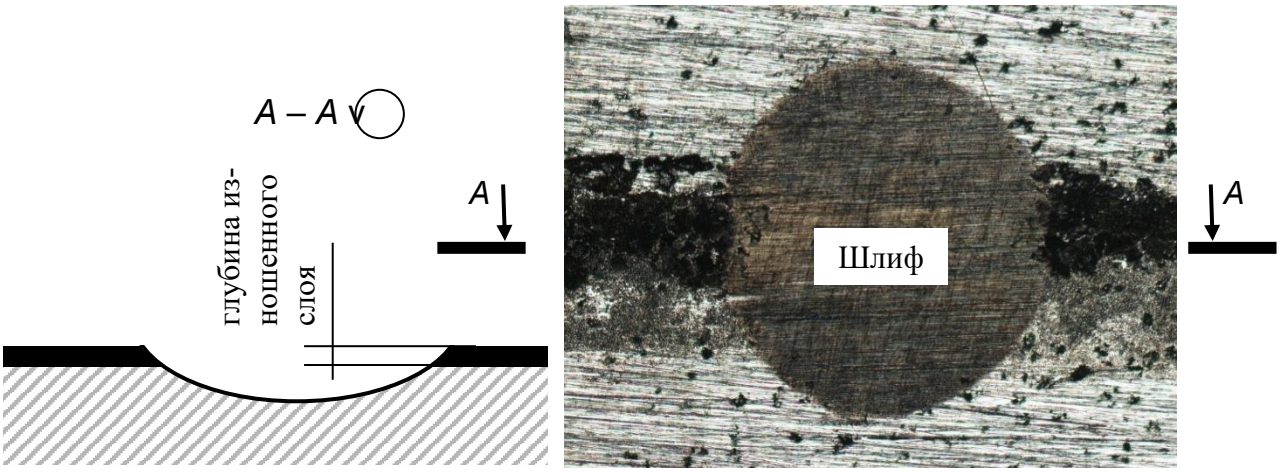
Стрелками показаны образованные оксиды титана в виде порошка светлого цвета

Рисунок 5.28 – Пример изношенной поверхности образцов с многослойным покрытием типа (Ti+TiN) при различном увеличении

Пара трения исходных образцов была изготовлена из промышленного (α+β)-титанового сплава ВТ6, имеющего в своей структуре два типа кристаллических решеток: ГПУ и ОЦК. При нанесении многослойных покрытий был использован технический α-сплав ВТ1-0, имеющий ГПУ решетку с более высокими антифрикционными свойствами, например меньшим коэффициентом трения, по сравнению со сплавами с гране- и объемоцентрированными решетками, что

неоднократно подтверждалось экспериментально [391-391].

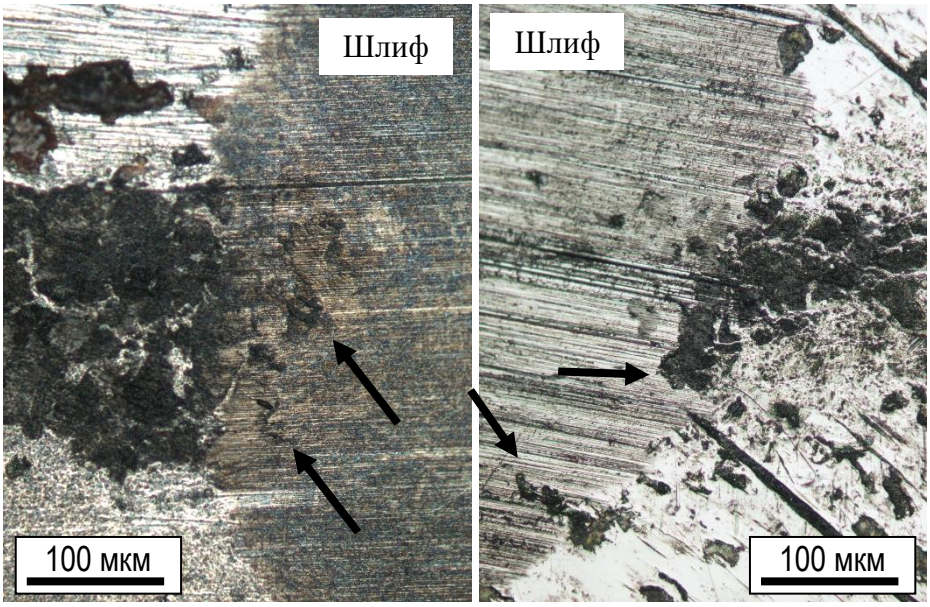
Для определения глубины повреждений каждого образца к сформированному пятну контакта был изготовлен сферический микрошлиф по методике, описанной в п. 4.2, глава 4. Фотографии микрошлифов показаны на Рисунках с 5.29 по 5.34.



а *б* (50Х)

а – схема измерения; *б* – вид сферического шлифа

Рисунок 5.29 – Изношенная поверхность образца в исходном состоянии

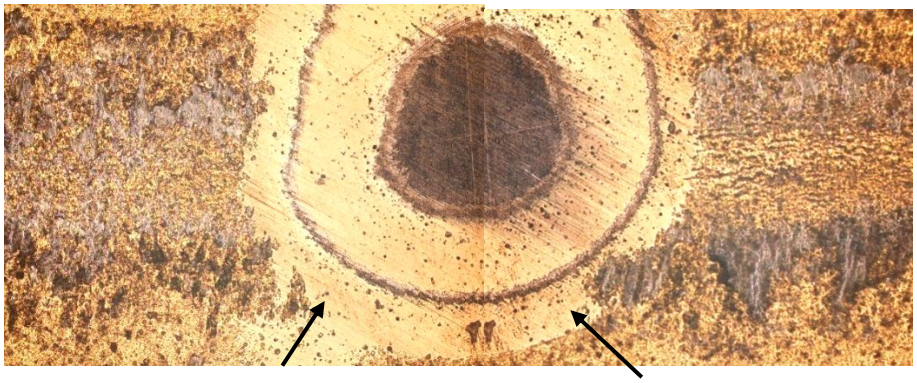


а (200Х) *б* (200Х)

Стрелками указаны поверхностные дефекты, возникшие при испытании

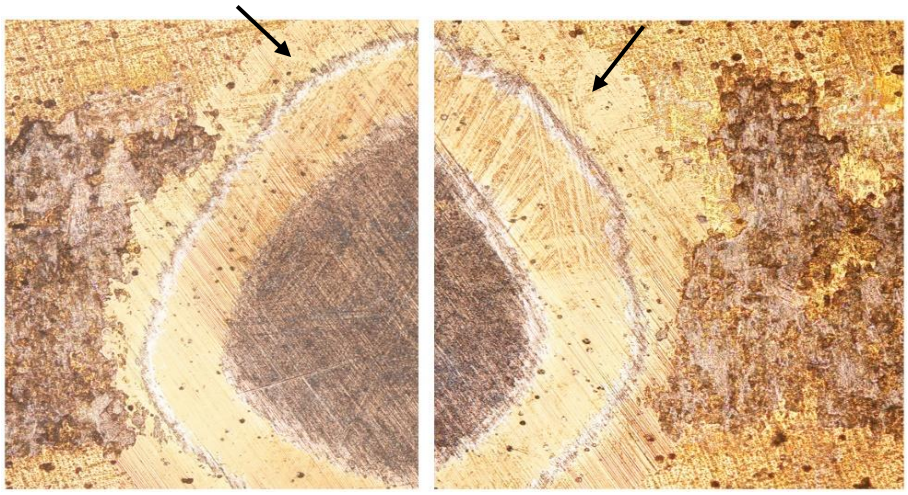
Рисунок 5.30 – Сферический шлиф к изношенной поверхности образца в исходном состоянии, увеличение 200Х

На Рисунках 5.29 и 5.30 видно, что на поверхности образцов без упрочнения протекает интенсивная фреттинг-коррозия с образованием различных оксидов (в виде темно-бурых пленок толщиной до 5 мкм), заполняющих впадины шероховатостей и изношенного материала (Рисунок 5.30 а). Основной вид износа – окислительный в условиях интенсивного циклического знакопеременного воздействия. На поверхности образуются характерные лунки износа с единичными микротрещинами, заполненных вторичными продуктами изнашивания материала (Рисунок 5.30). Глубина износа поверхности достигает от 10 до 12 мкм.



Стрелками показан внешний изнашиваемый слой TiN

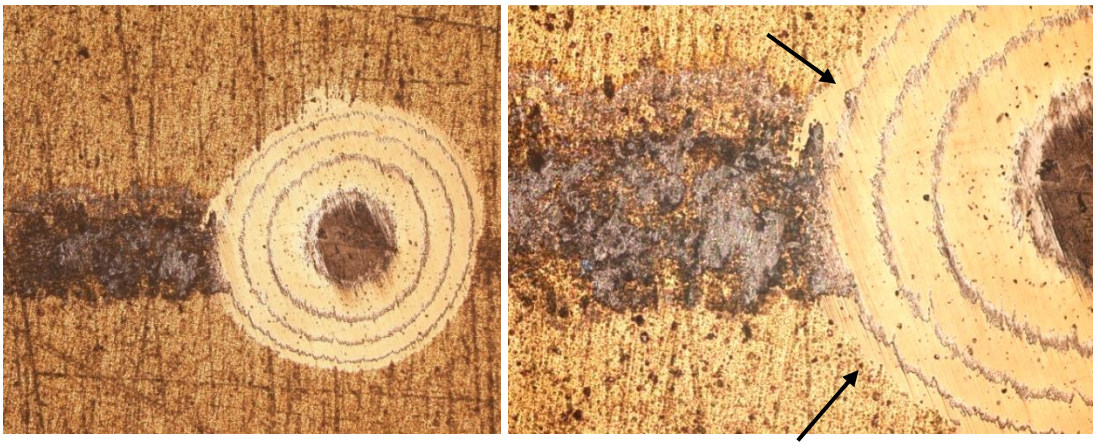
Рисунок 5.31 – Сферический шлиф к изношенной поверхности образца с покрытием (0,5Ti+10TiN) x2, увеличение 200X



а (200X) *б* (200X)

Стрелками показан внешний изнашиваемый слой TiN

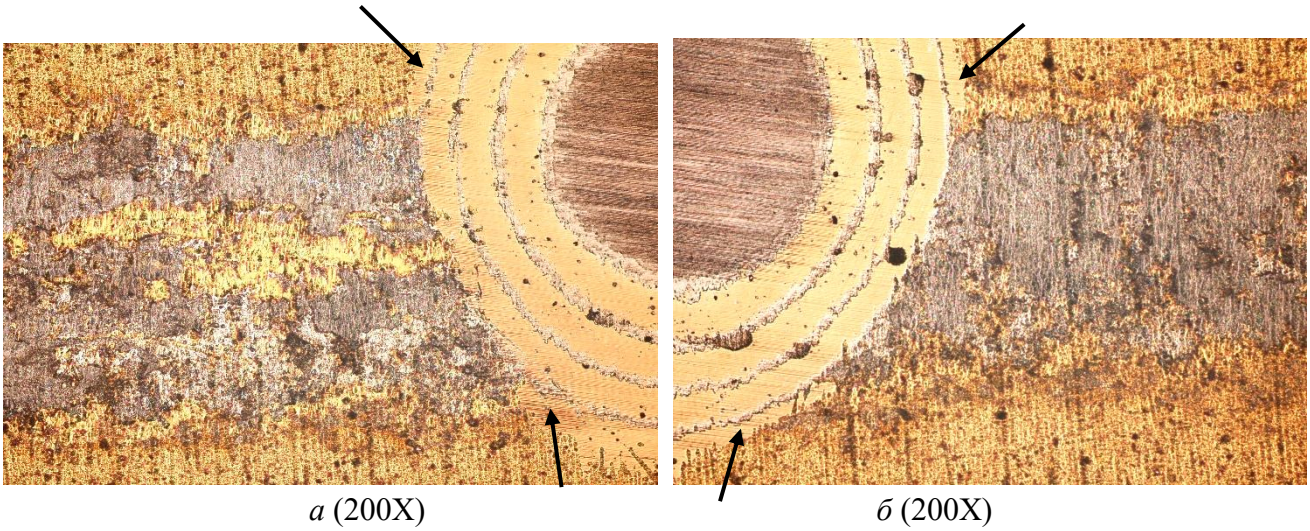
Рисунок 5.32 – Сферический шлиф к изношенной поверхности образца с покрытием (0,3Ti+5TiN) x2



а (50Х) *б* (200Х)

Стрелками показан внешний изнашиваемый слой TiN

Рисунок 5.33 – Сферический шлиф к изношенной поверхности образца с покрытием (0,5Ti+3TiN) х4

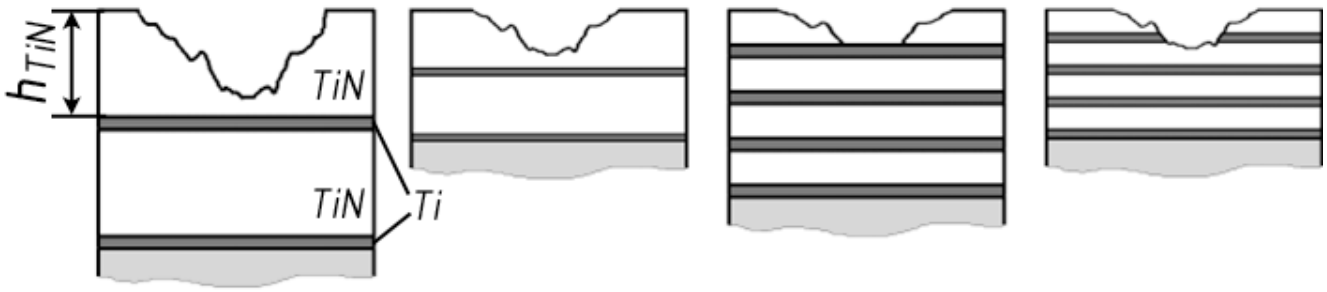


а (200Х) *б* (200Х)

Стрелками показан внешний изнашиваемый слой TiN

Рисунок 5.34 – Сферический шлиф к изношенной поверхности образца с покрытием (0,3Ti+1,5TiN) х4

Фреттинг-износ образцов с многослойными покрытиями на основе нитрида титана протекает по одному механизму, образуя пятно контакта с вытянутыми вдоль направления трения механическими бороздками, покрытыми оксидами и вторичными продуктами износа (Рисунки 5.31-5.34). Локально, в местах действия максимального проскальзывания, происходит механический износ верхнего слоя нитрида титана, после чего в зону трения из нижележащего слоя покрытия поступает титан (светлые участки в зоне трения), образуя оксиды титана светлого цвета (Рисунок 5.28).



h_{TiN} = 10 мкм | h_{TiN} = 5 мкм | h_{TiN} = 3 мкм | h_{TiN} = 1,5 мкм

а | *б* | *в* | *г*

Варианты покрытий: *а* – (0,5Ti+10TiN) x2; *б* – (0,3Ti+5TiN) x2; *в* – (0,5Ti+3TiN) x4; *г* – (0,3Ti+1,5TiN) x4

Темные полосы – слои Ti, светлые – TiN, подложка – сплав ВТ6

h_{TiN} – толщина нитридных слоев

Рисунок 5.35 – Сравнительная схема износа исследуемых покрытий на фреттинг

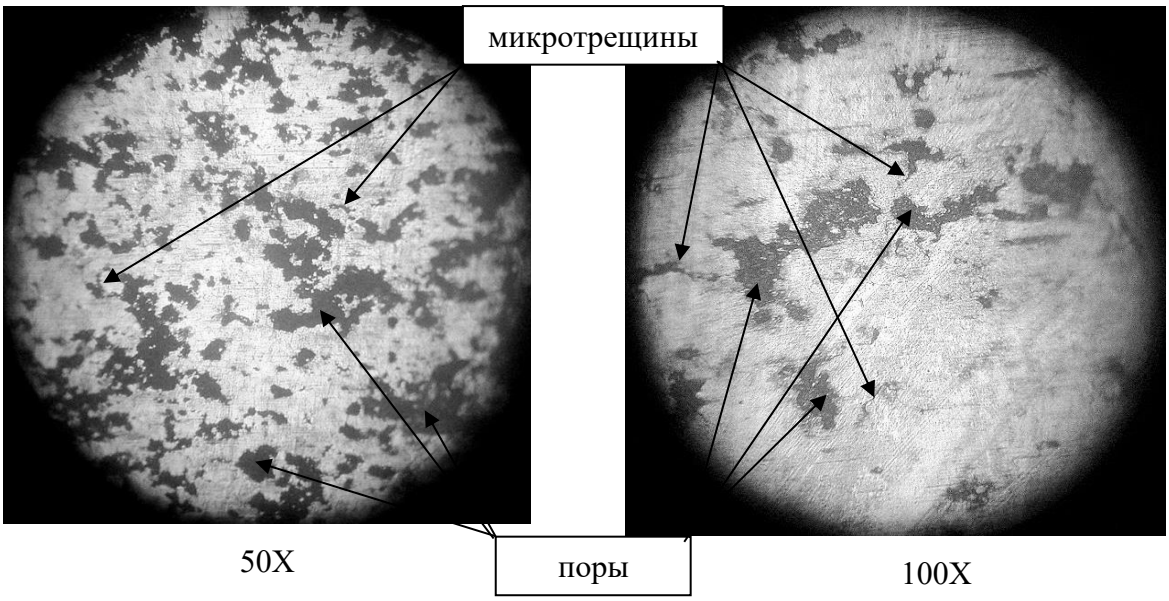
Глубина фреттинг-износа исследуемых покрытий, измеренного на сферических шлифах, приведена в Таблице 5.7 и схематично показана на Рисунке 5.35. Анализ полученных результатов позволяет заключить, что при принятых режимах испытания после $5 \cdot 10^6$ циклов износ испытываемых многослойных покрытий фактически ограничен толщиной верхнего нитридного слоя не зависимо от его толщины, от 1,5 до 10 мкм. Это может быть объяснено тем, что по мере износа внешнего нитридного слоя в зону трения начинают попадать изношенные частички нижележащего слоя титана (на Рисунке 5.35 показаны темными полосками), которые, окисляясь, выступают в качестве твердой смазки и уменьшают износ нижележащих нитридных слоев. Применение оксидов титана в роле твердых смазок известно из литературы [163] и широко применяется в технике.

Проведенное металлографическое исследование сферических шлифов в области износа недопустимых поверхностных дефектов (следов схватывания, микротрещин, сколов, отслаивания покрытия и др.) не выявило, что подтверждает эффективность применения многослойных ионно-плазменных покрытий типа (Ti+TiN) для защиты поверхности деталей от износа в условиях фреттинга и фреттинг-коррозии.

5.3.4 Испытания на стойкость при трении скольжения

В практике производства ГТД для повышения фреттинг-стойкости применяют такие методы как, поверхностная пластическая деформация и нанесение специальных покрытий [6, 12,

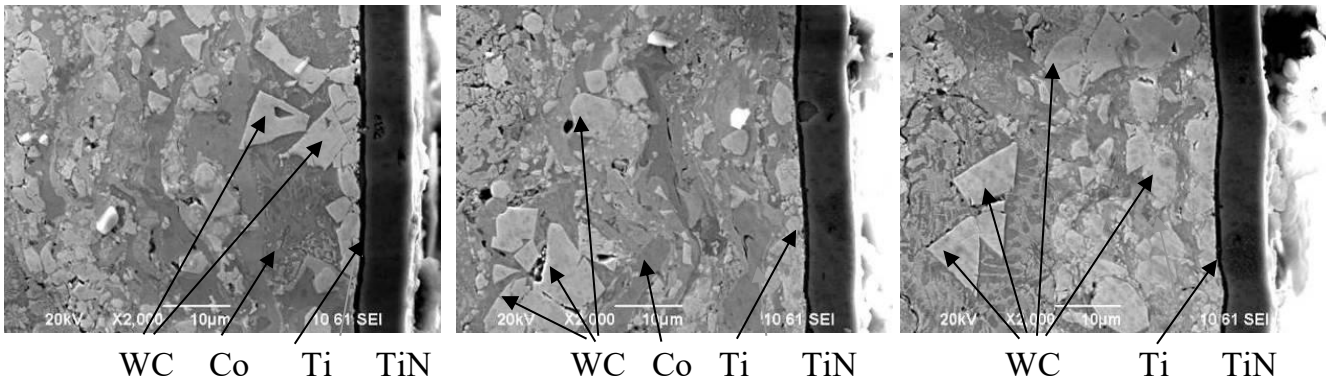
14, 21, 52, 54, 59, 105, 127]. Исследование действующей технологии производства титановых лопаток компрессора ГТУ показало, что рабочие лопатки с антивибрационными полками (1-я и 2-я ступень КНД) изготавливают из двухфазного (α+β)-титанового сплава ВТ-6 при этом на торцы бандажных полок наносят высокотвердое покрытие на основе карбида вольфрама с общей толщиной 0,06…0,18 мм. Несмотря на то, что детонационный метод нанесения покрытий обеспечивает по сравнению с другими газотермическими методами напыления повышенную адгезионную прочностью сцепления с основой, тем не менее, применительно к лопаткам КНД это покрытие оказалось недостаточно работоспособным [54, 59]. При испытании на фреттинг-коррозию в местах механического контакта было выявлено возникновение мелких трещин и объединение существующих в покрытии пор, проводящих к выкрошиванию материала покрытия и преждевременному износу (Рисунок 5.36).



Режимы испытания указаны в пункте 5.3.1

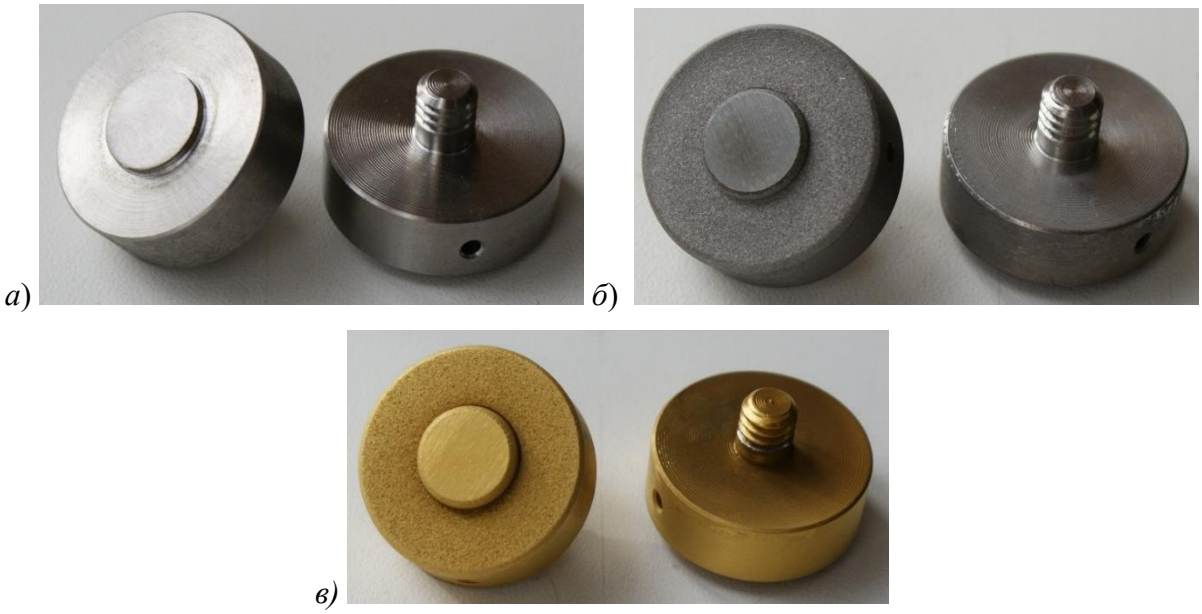
Рисунок 5.36 – Микрофотографии изношенной поверхности образцов с твердым покрытием WC + Co (30%) после испытания на фреттинг

С целью повышения фреттинг-стойкости антивибрационных полок лопаток ГТД и паровых турбин с твердым покрытием было предложено дополнительно нанести двухслойное ионно-плазменное покрытие системы Ti+TiN толщиной 10±1 мкм, хорошо проявившее себя при испытании на фреттинг-коррозию (пункты 5.3.1, 5.3.2). Для испытания были изготовлены образцы с твердым покрытием WC+Co (30%) поверх которого было нанесено покрытие Ti+TiN. Сформированная таким образом микроструктура поверхности с покрытием показана на Рисунке 5.37. Внешний вид образцов с покрытием показан на Рисунке 5.38.



а *б* *в*

Рисунок 5.37 – Микроструктура многослойного покрытия (WC+Co (30%)) + (Ti+TiN)



а) *б*)

в)

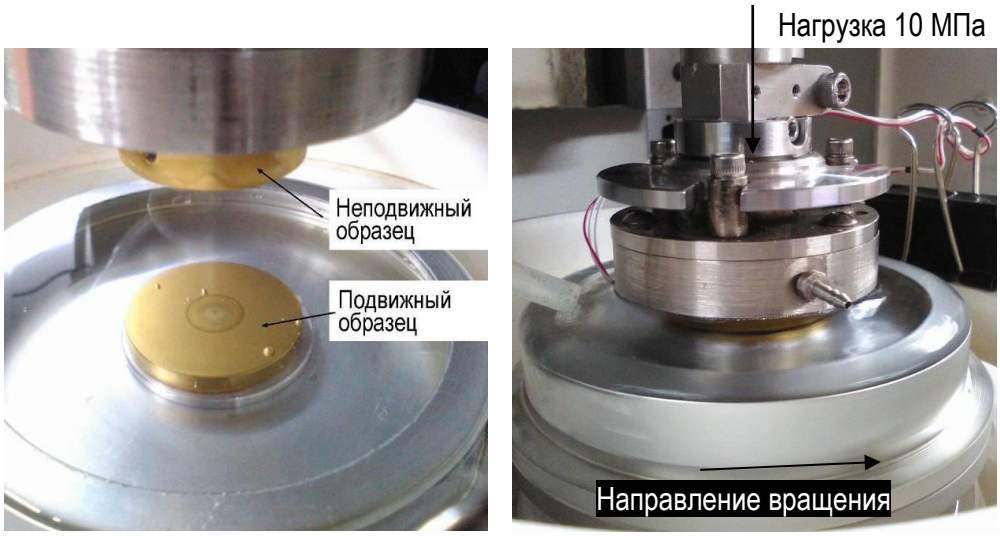
а – исходное состояние, шлифование; *б* – WC+Co(30%); *в* – (WC+Co (30%)) + (Ti+TiN)

Рисунок 5.38 – Внешний вид образцов из сплава ВТ6, подготовленных для испытания на трение скольжения

Испытание на трение скольжения были проведены на установке трения CETR, установленной в Лаборатории водяных турбин (Сектор натурных испытаний и материалов АО «Силовые машины-ЛМЗ»). Образцы были установлены без дополнительной доработки. При креплении резьбовой части для предотвращения возможного схватывания при трении использовали графитовую смазку «Molykote». Для контроля температуры в зоне трения в неподвижный образец была установлена термопара с выводом на компьютер. Испытания проводили при постоянном давлении p = 10 МПа (1 кгс/мм^2) и постоянной линейной скорости вращении подвижного образца v = 0,1 м/с на среднем радиусе пятна контакта. Испытание проводили при подаче в зону трения

проточной воды нормальной температуры.

Схема установки образцов и проведения испытания показана на Рисунке 5.39. При испытании регистрировали следующие параметры трения: температура в зоне контакта *Tm*, коэффициент трения COEF-T, величина взаимного сближения *Z*, время испытания *t*. Параметры трения выводились на экран компьютера в виде временных графиков, показанных на Рисунках 5.41-5.43. Результаты испытания приведены в Таблице 5.8. Внешний вид изнашиваемых образцов показан на Рисунке 5.40.



а *б*

а – схема установки образцов на машине трения; *б* – схема испытания

Рисунок 5.39 – Испытание на износостойкость во влажной среде

Таблица 5.8 – Результаты испытания образцов

Вариант покрытия	Нагрузка *P*, Н	Частота вращ-я *n*, об/мин	Общее время испытания t, сек	Величина установившегося износа ΔZ, мм	Время установившегося износа Δt, с	Скорость равномерного износа *J*=3600·ΔZ/Δt, мкм/ч
Без покрытия	932,0	247,30	1035*	0,310	1320*	845,5
WC+Co	781,3	379,34	7200	0,005	5600	3,2
(WC+Co)+ +TiN	781,3	379,34	7200	0,002	8000	0,9

* Преждевременное снятие образца с испытаний по причине адгезионного схватывания и остановки испытания

а *б* *в*

а – без покрытия, *t* = 0,33 ч; *б* – WC+Co(30%), *t* = 2 ч;

в – (WC+Co (30%)) + (Ti+TiN), *t* = 2 ч

Рисунок 5.40 – Вид образцов после испытания на трение

На графиках (Рисунки 5.41-5.43) видно, что в начальный период испытаний (в течение 60-120 сек) наблюдается приработка образцов, которая регистрируется в виде их сближения и уменьшении величины *Z*. Приработка, как правило, вызывается неравновесной шероховатостью и наличием на поверхности посторонних частиц, например, микрокапельной фазы материала покрытия. При расчете скорости равномерного износа *J*, мм/час период приработки не учитывали. Время Δt и величину установившегося износа ΔZ определяли по линейному участку графиков.

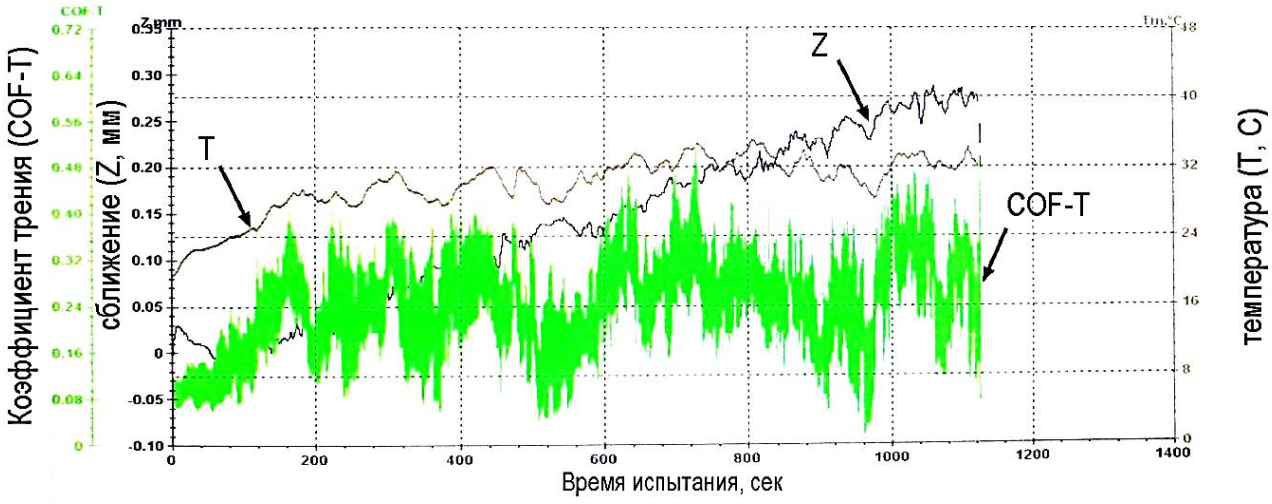


Рисунок 5.41 – Результаты испытания образцов ВТ6, без покрытия

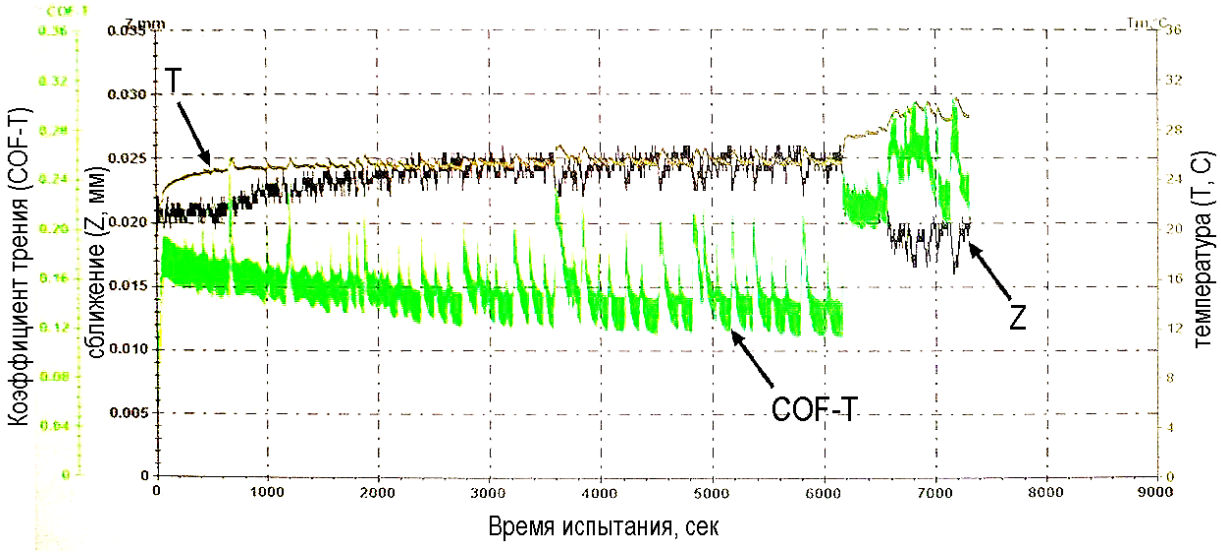


Рисунок 5.42 – Результаты испытания образцов ВТ6 с покрытием WC+Co(30%)

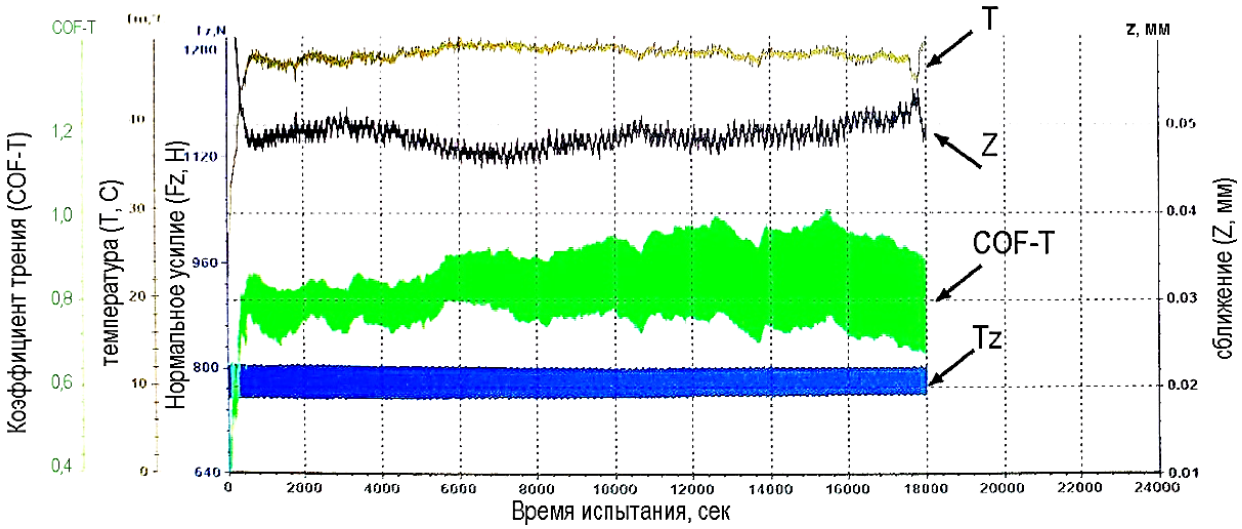


Рисунок 5.43 – Результаты испытания образцов с покрытием (WC+Co(30%)) + (Ti+TiN)

В процессе работы образец без покрытия был преждевременно снят с испытаний. После 20 минут трения произошло заклинивание установки и ее аварийный останов вследствие значительного износа образца (Рисунок 5.40 а). Общая наработка образцов с покрытиями до прекращения испытания составила ≈ 11 часов без значительного износа. Внешний вид контактной поверхности испытываемых образцов с покрытиями показан на Рисунках 5.40 и 5.40 в.

Износ образцов оценивали по изменению их массы, для чего в течение испытаний изнашивание останавливали, образцы сушили теплым воздухом, обезжиривали и взвешивали. Динамика изнашивания по уносу материала из зоны трения показана на Рисунке 5.44. На графике

видно, что образцы с покрытием нитрида титана за первые 2...4 часа испытания обеспечивают необходимую приработку контактных поверхностей и формируют площадку контакта (Рисунок 5.40 в), необходимую для обеспечения равномерного распределения нагрузки по пятну контакта. На образцах с твердым покрытием без покрытия (Ti+TiN) в процессе испытания на поверхности контакта наблюдается заметный износ материала (Рисунок 5.40 б) в виде кольцевой дорожки с грубой шероховатостью, что, вероятно, является следствием хрупкого разрушения карбида вольфрама. Наличие заметного износа также подтверждается скачкообразным сближением образцов, что отражается на графике (Рисунок 5.42) в виде резкого изменения величины Z и коэффициента трения COF-T при $t \approx 6200$ с.

В результате испытаний установлено, что последовательное нанесение покрытий карбида вольфрама и нитрида титана может многократно (более чем в 10 раз) повысить износостойкость титанового сплава ВТ6 при заданных условиях трения скольжения. При этом нанесенное многослойное покрытие (Ti+TiN) обеспечивает наиболее благоприятную приработку контактных поверхностей, которая сопровождается практически нулевой потерей массы в течение первых трех часов испытания (Рисунок 5.44), обеспечивает формирование гладкой площадки фактического контакта (Рисунок 5.40в) и минимальную скорость износа покрытия 0,9 мкм/ч (Таблица 5.8).

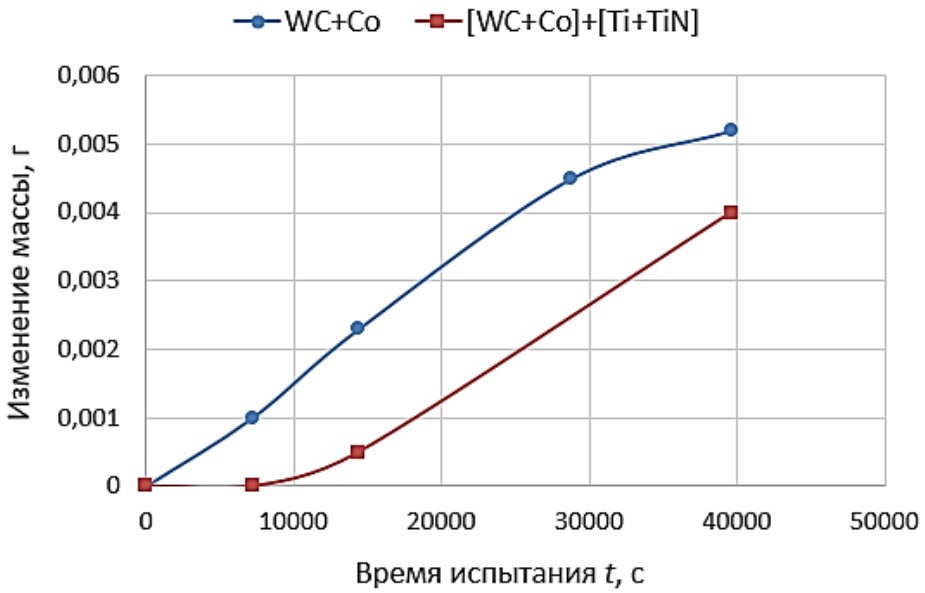


Рисунок 5.44 – Изменение суммарной массы образцов с покрытиями в процессе испытания на износостойкость во влажной среде

5.4 Испытание на многоцикловую усталость

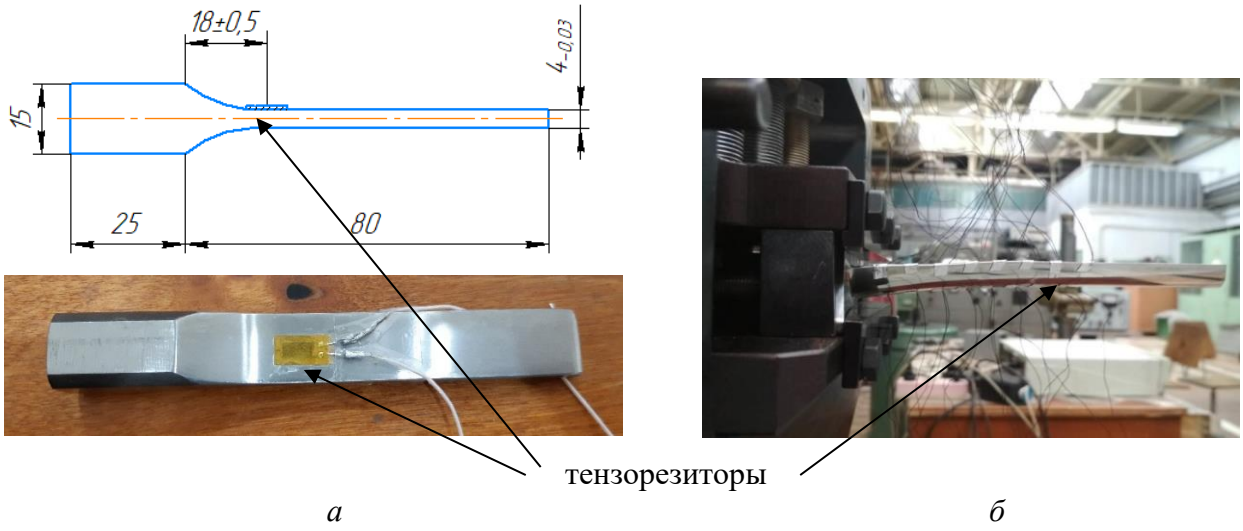
Обеспечение усталостной прочности является одним из основных требований к изготовлению и ремонту лопаток газовых и паровых турбин в течение всего их жизненного цикла. В этой связи проведение испытаний с определением или подтверждением контрольного уровня длительной прочности является обязательным для принятия решения о возможности применения упрочняющей обработки с нанесением защитных покрытий.

Испытания на усталость проводили в соответствии с ГОСТ 25.502-79 «Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость» и ОСТ 1 00303-79 «Лопатки газотурбинных двигателей. Периодические испытания на усталость». Испытания проводили на воздухе по первой изгибной форме колебаний при симметричном цикле нагружения в диапазоне от 350 до 600 МПа. Условия проведения испытаний – нормальные, принятая база испытаний $N = 2 \cdot 10^7$ циклов. В ходе испытаний строились зависимости величины механических напряжений от количества циклов до разрушения (появления усталостной трещины) или до достижения принятой базы испытаний, что наступит раньше.

5.4.1 Испытания образцов

Объектами для проведения усталостных испытаний являлись лабораторные образцы (Рисунок 5.45), имитирующие напряженно-деформированное состояние рабочих лопаток последних ступеней паровых турбин и рабочих лопаток компрессора ГТД АЛ-31СТ из титанового α+β-сплава ВТ6. Перед нанесением защитных покрытий испытываемые образцы проходили термическую обработку: нагрев до 950±10 °С (Тпп α→β) в течение 20 мин и последующая выдержка при 675±10 °С в течение 4 ч в контролируемой среде с последующим полированием войлочными кругами до шероховатости *Ra* 0,8. Для контроля при испытаниях заданного уровня напряжений образцы и лопатки препарировались фольговыми тензорезисторами типа КФ5П1-5-100 с базой 5 мм (Рисунок 5.45). Испытания проводили совместно с СКБ «Турбина» АО «СМ-ЛМЗ», лабораторией прочности ПАО «ОДК-УМПО» и ООО «НПП УАСТ» на вибрационном электродинамическом стенде ВЭДС-1500 с дистанционным контролем и регистрацией параметров испытания на базе испытания $N = 2 \cdot 10^7$ циклов и вероятности разрушения $P = 50\%$. Методика проведения усталостных испытаний изложена в п. 4.11, глава 4.

Результаты проведения усталостных испытаний образцов после различных вариантов обработки приведены в Таблицах 5.9. Экспериментальные данные и построенные на их основе усталостные кривые, зависимости механическиъх напряжений от количества циклов до разрушения $\sigma = f(N)$, приведены в Приложении Д, Рисунках 5.46.



а *б*

а – образец; *б* – лопатка

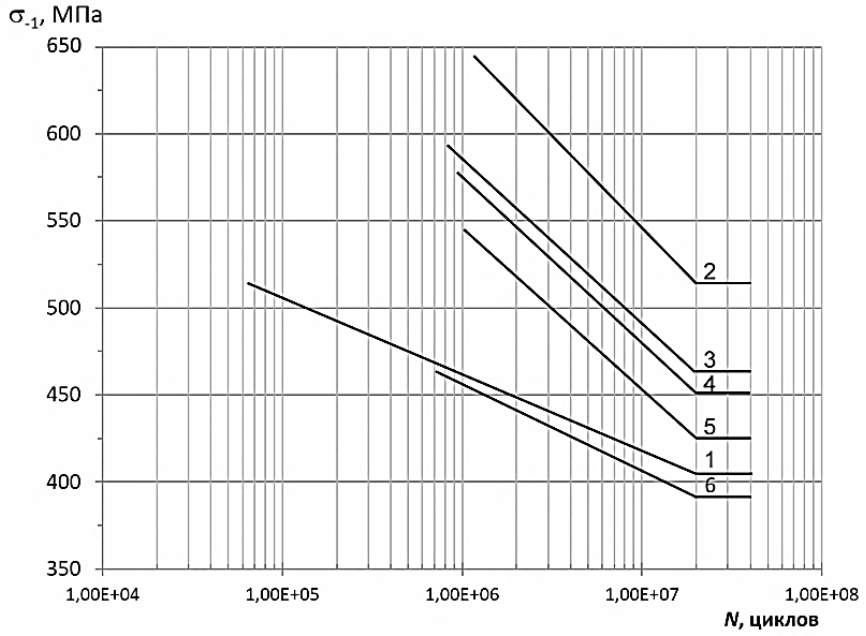
Рисунок 5.45 – Усталостные испытания

Таблица 5.9 – Результаты усталостных испытаний

Вариант обработки[1]	Толщина *h*, мкм	Предел выносливости[2] σ_{-1}, МПа	Относительное изменение[3] $\Delta\sigma$
1 Исходное состояние, полирование	–	405±26	–
2 Ионная имплантация азота (и.и.)	–	511±18	26,2%
3 и.и. + 0,5Ti+10TiN	10,5±1,5	470±25	16,0%
4 и.и. + (0,3Ti + 2,5Ti*N) x5	14±1,6	450±26	11,1%
5 и.и. + (0,5Ti+10Ti*N) x2	21±2,2	425±25	4,9%
6 и.и. + (0,5Ti+10Ti*N) x3	31,5±2,5	387±21	-4,4%

Примечания – 1) Ti – сплав ВТ1-0, Ti* – сплав ВТ20 (TiAlZrVMo); V – сплав ВнМ-1; 2) На базе испытания $N = 2 \cdot 10^7$ циклов и вероятности разрушения $P = 50\%$; 3) $\Delta\sigma = (\sigma_{-1} - \sigma_{исх})/\sigma_{исх}$, где $\sigma_{исх}$ – предел выносливости исходного образца, без упрочнения

Установлено, что проведенная ионная имплантация азота увеличивает предел выносливости образцов после полирования на 26,2%, что может выть связано с дислокационным упрочнением поверхности ионами азота и формированием в ней остаточных напряжений сжатия. Последующее нанесение покрытий приводит к некоторому снижению предела выносливости. При этом установлена линейная зависимость изменения относительной величины предела выносливости (σ_{-1}) от толщины наносимого покрытия на образцы и лопатки компрессора ГТД из титанового сплава ВТ6 (Рисунок 5.47). Результаты испытаний лопаток приведены в п. 5.4.2.



Усталостные кривые каждого варианта приведены в Приложении Д

Рисунок 5.46 – Усталостные кривые (P = 50%) образцов с различными вариантами обработки, $N = 2 \cdot 10^7$ циклов (Обозначение покрытий приведены в соответствии с Таблицей 5.9)

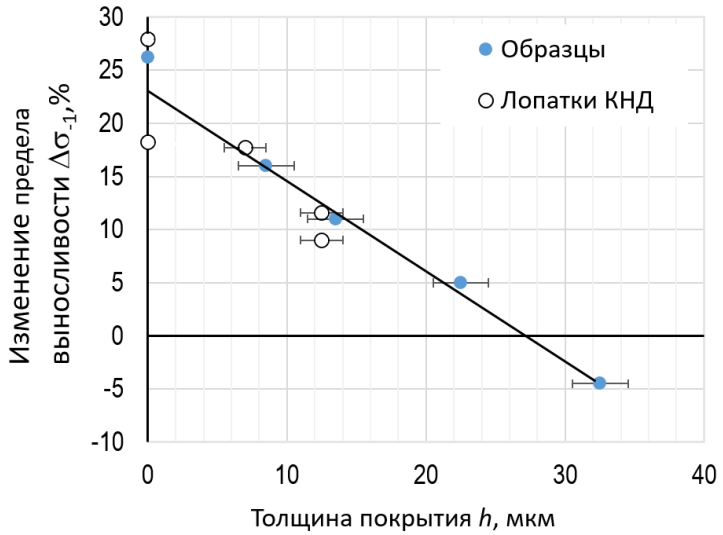


Рисунок 5.47 – Изменение относительной величины предела выносливости от толщины покрытия (h = 0 мкм соответствует ионной имплантации азота дозой $D = 2 \cdot 10^{17}$ ион/см^2)

Наиболее вероятной причиной снижения σ_{-1} является возникновение остаточных напряжений растяжения в поверхности основного материала вследствие нанесения на него ионно-плазменных покрытий различной толщины. В пункте 2.1 главы 2 показано, что при

нанесении ионно-плазменных покрытий в основном материале детали на границе с покрытием возникают отаточные напряжения растяжения, величина которых прямо порпорциональна толщине покрытия, что подтверждается при исследовании усталостной прочности деталей с различной толщиной покрытия (Рисунок 5.47).

5.4.2 Испытания рабочих лопаток с износостойкими покрытиями

Объектами для проведения усталостных испытаний являлись рабочие лопатки компрессора низкого давления (КНД) газотурбинной установки АЛ-31СТ, изготовленные по технологии ПАО «ОДК-УМПО» из титанового сплава ВТ6. Для контроля заданного уровня напряжений лопатки препарировались фольговыми тензорезисторами типа КФ5П1-5-100 с базой 5 мм, как это показано на Рисунках 5.48 и 5.45 б. Испытания проводили совместно с лабораторией прочности ПАО «ОДК-УМПО» на вибрационном электродинамическом стенде ВЭДС-400 с дистанционным контролем и регистрацией параметров испытания. Испытания проводили методом «Лестницы» в соответствии с методикой ОСТ 1 00303-79 «Лопатки газотурбинных двигателей. Периодические испытания на усталость» на базе испытания $N = 2 \cdot 10^7$ циклов и вероятности разрушения $P =$ 50%. Методика проведения усталостных испытаний изложена в п. 4.11, глава 4.

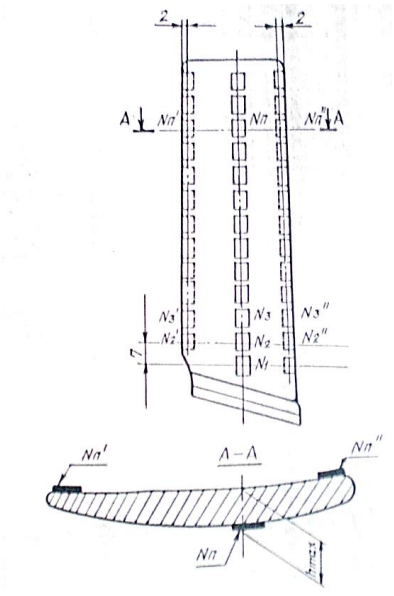


Рисунок 5.48 – Схема установки тензорезисторов (N_i) на рабочей лопатке КНД

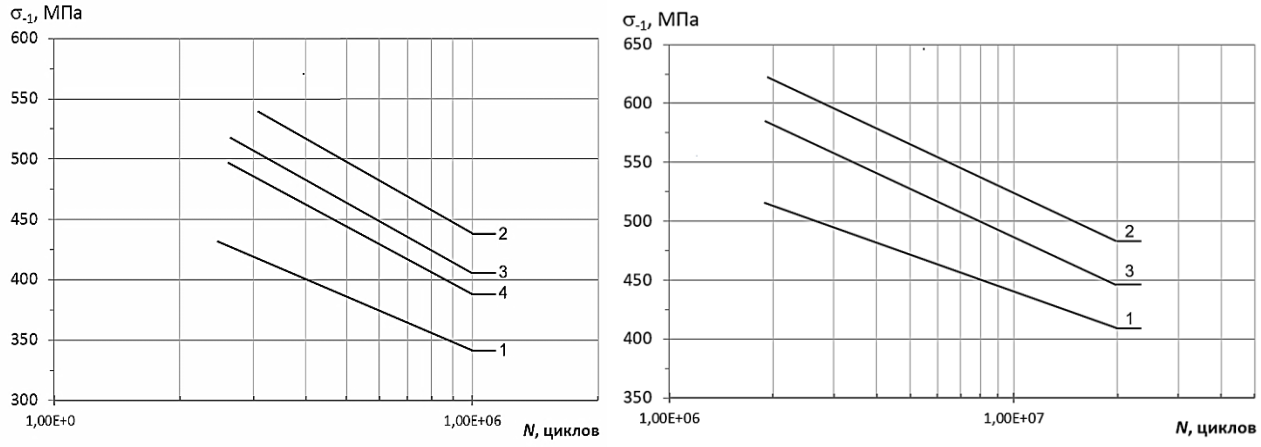
Результаты проведения усталостных испытаний рабочих лопатк КНД после различных вариантов обработки приведены в Таблице 5.10. Экспериментальные данные и построенные на

их основе зависимости механических напряжений от количества циклов до разрушения $\sigma = f(N)$ приведены в Приложении Д и на Рисунке 5.49.

Таблица 5.10 – Результаты усталостных испытаний

Вариант обработки[1]	Толщина h, мкм	Предел выносливости[2] σ_{-1}, МПа	Относительное изменение[3] $\Delta\sigma$
Рабочие лопатки КНД 1 ст.			
1 Исходное состояние, полирование	–	344±16	–
2 Ионная имплантация азота (и.и.)	–	440±27	27,9%
3 и.и. + (0,3(V,Ti) + 2,5(V,Ti)N)x2	7±1	405±26	17,7%
4 и.и. + (0,3(V,Ti) + 2,5(V,Ti)N)x5	12,5±1,5	384±21	11,6%
Рабочие лопатки КНД 2 ст.			
1 Исходное состояние, полирование	–	411±29	–
2 Ионная имплантация азота (и.и.)	–	486±28	18,2%
3 и.и. + (0,3Ti+2,5Ti*N) x5	12,5±1,5	448±32	9,0%

Примечания – 1) Ti – сплав ВТ1-0, Ti* – сплав ВТ20 (TiAlZrVMo); 2) На базе испытания $N = 2 \cdot 10^7$ циклов и вероятности разрушения $P = 50\%$; 3) Изменение относительно исходного варианта обработки: $\Delta\sigma = (\sigma_{-1} - \sigma_{исх})/\sigma_{исх}$, где $\sigma_{исх}$ – предел выносливости σ_{-1} исходного образца, без упрочнения



а *б*

а – РКНД 1 ст., *б* – РКНД 2 ст.

Усталостные кривые каждого варианта приведены в Приложении Д

Рисунок 5.49 – Усталостные кривые ($P = 50\%$) титановых лопаток КНД из сплава ВТ6 с износостойкими покрытиями, $N = 2 \cdot 10^7$ циклов (Обозначение покрытий даны в соответствии с Таблицей 5.10)

Установлено, что проведенная ионная имплантация азота увеличивает предел выносливости лопаток после полирования на 18%, что является весьма значимым результатом для лопаток компрессора [54, 133, 105-108]. При этом меньшая величина упрочнения по сравнению с испытанными образцами (Таблица 5.9), вероятно, связана с конструктивными особенностями пера лопатки, наличием входной и выходной кромки с малыми радиусами скругления $R \approx 0{,}2$ мм, которые являются концентраторами механических напряжений. Последующее нанесение на перо лопатки ионно-плазменного покрытия приводит к некоторому снижению предела выносливости, также, как и в случае испытания образцов, при этом итоговая величина предела выносливости лопаток с покрытием превышает их исходное состояние на 9% (Таблица 5.10).

5.4.3 Фрактографическое исследование лопаток и образцов с покрытиями после испытания на многоцикловую усталость

После проведения испытаний лопатки были направлены на проведение капиллярного дефектоскопического контроля трещин (ЛЮМ-1ОВ). Работы проводились совместно с отделом главного металлурга ПАО «ОДК-УМПО» и ОКБ «Мотор». Внешний вид лопаток с покрытиями показан на Рисунках 5.50 и 5.51. Установлено, что все выявленные трещины имели усталостный характер и располагались в корневом сечении пера лопаток вдоль замка со стороны спинки и выходной кромки пера. Места характерного расположения трещин показаны на Рисунке 5.52.

а *б*

а – РКНД 1 ст., *б* – РКНД 2 ст.

Рисунок 5.50 – Рабочие лопатки КНД с износостойким покрытием

а *б*

а – со стороны спинки; *б* – со стороны корыта

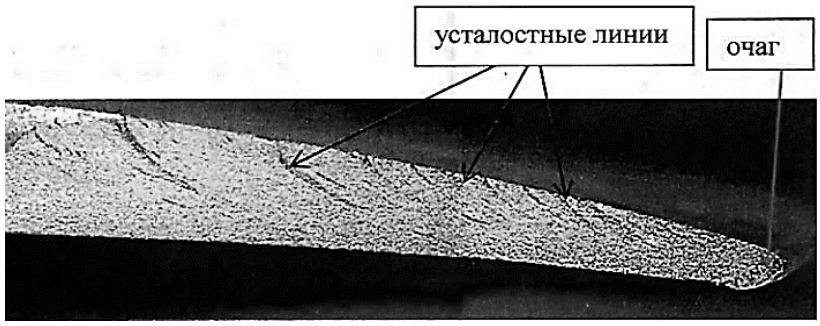
Стрелками показаны характерные места возникновения усталостных трещин

Рисунок 5.51 – Рабочие лопатки 1-й ступени КНД с износостойким покрытием

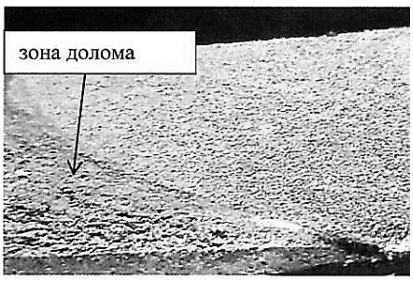
Для проведения фактографического исследования было проведено вскрытие трещин. Поверхности изломов имеют светло-серый цвет без видимого окисления и характерных ему цветов побежалости. Началом разрушения является поверхность пера лопатки со стороны спинки или выходной кромки. Характер излома хрупкий с наличием характерных усталостных линий и зоны долома.

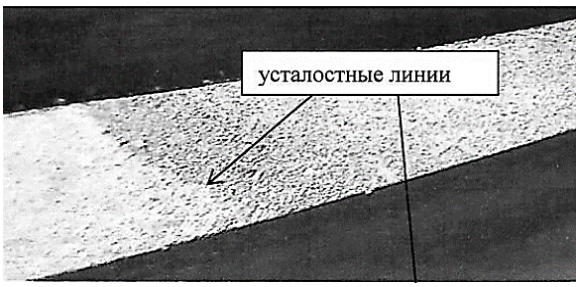
а *б*

Рисунок 5.52 – Пример расположения усталостных трещин на лопатках после усталостных испытаний, выявленные при проведении капиллярного контроля ЛЮМ-1ОВ



а (20Х)





б (50Х) *в* (25Х)

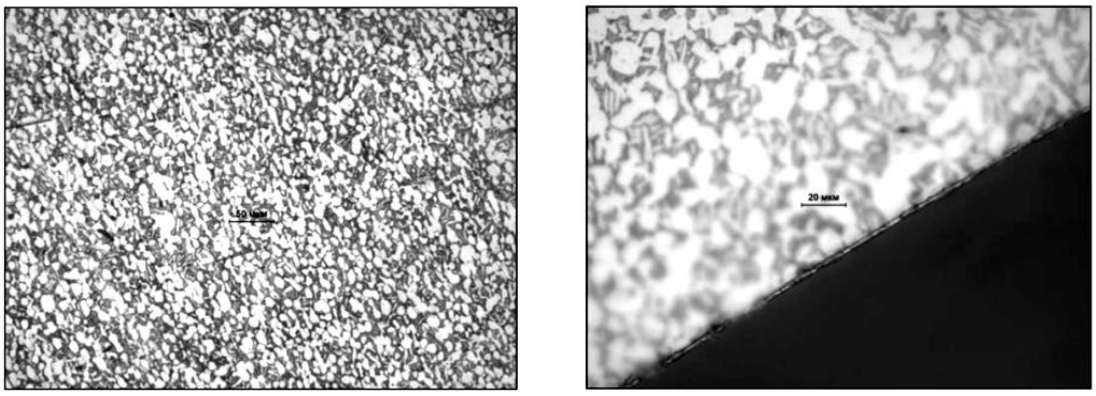
Рисунок 5.53 – Излом направляющей лопатки компрессора ГТД в исходном состоянии, полирование войлочными кругами без упрочнения

На Рисунках 5.53 и 5.54 показаны примеры разрушения лопатки с очагом, расположенным в области выходной кромки. Усталостные линии, расположенные близко к очагу разрушения, имеют вид нечетких колец и по мере развития трещины приобретают вид площадок. Дефектов материала металлургического характера на поверхностях излома не обнаружено.

Из материала лопаток с покрытием вне области усталостного разрушения (в зоне максимальной толдщины C_{max}) были изготовлены микрошлифы, показанные на Рисунке 5.55. Микроструктура основного материала, сплав ВТ6, двухфазная (α+β), соответствует типу 2б по шкале микроструктур по ОСТ 1.90002 для титановых сплавов.

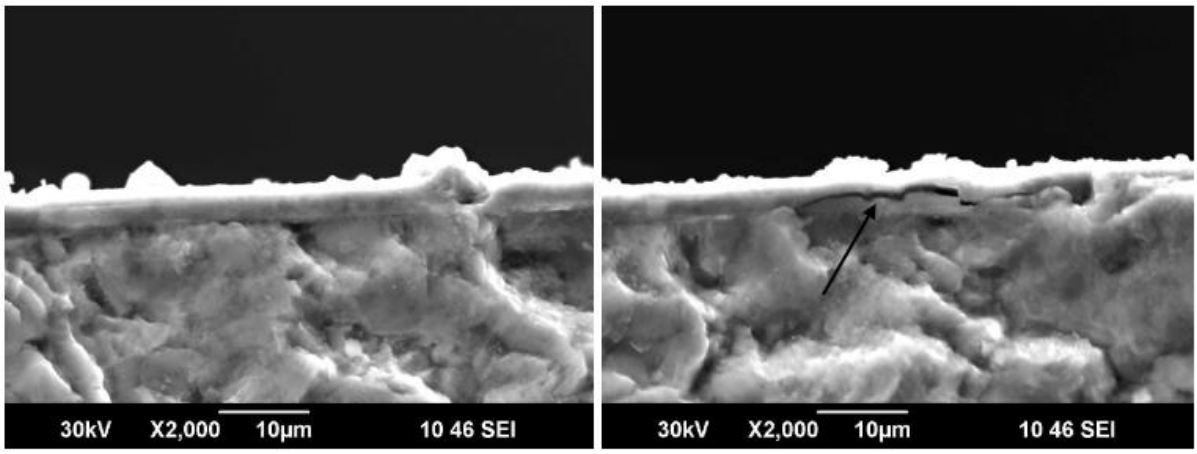
Пример разрушения покрытия ((V, Ti)+(V, Ti)N)x2 в результате многоцикловых усталостных испытаний показан на Рисунках 5.56 – 5.57. Покрытие имеет четыре слоя без внутренних дефектов в виде пор или трещин. В структуре покрытия присутствует «микрокапельная фаза» в виде глобулярных включений титана размерами ≈ 0,5 мкм, образующихся в покрытии в процессе его нанесения. На Рисунках 5.56 – 5.58 стрелками показаны места хрупкого разрушения покрытия с образованием трещины. При этом хорошо видно, что трещина в покрытии распространяется преимущественно вдоль пластичного (V, Ti)-слоя, по границе с ниже лежащим нитридным слоем, образуя характерные ступеньки, без перехода в основной металл.

Рисунок 5.54 – Излом лопатки (20Х) с нанесенным покрытием типа Ti+TiN толщиной h = 6...8 мкм



а *б*

Рисунок 5.55 – Микроструктура материала пера лопатки КНД из титанового сплава ВТ6 с нанесенным покрытием нитрида титана (толщина h = 6…8 мкм) вне усталостного излома

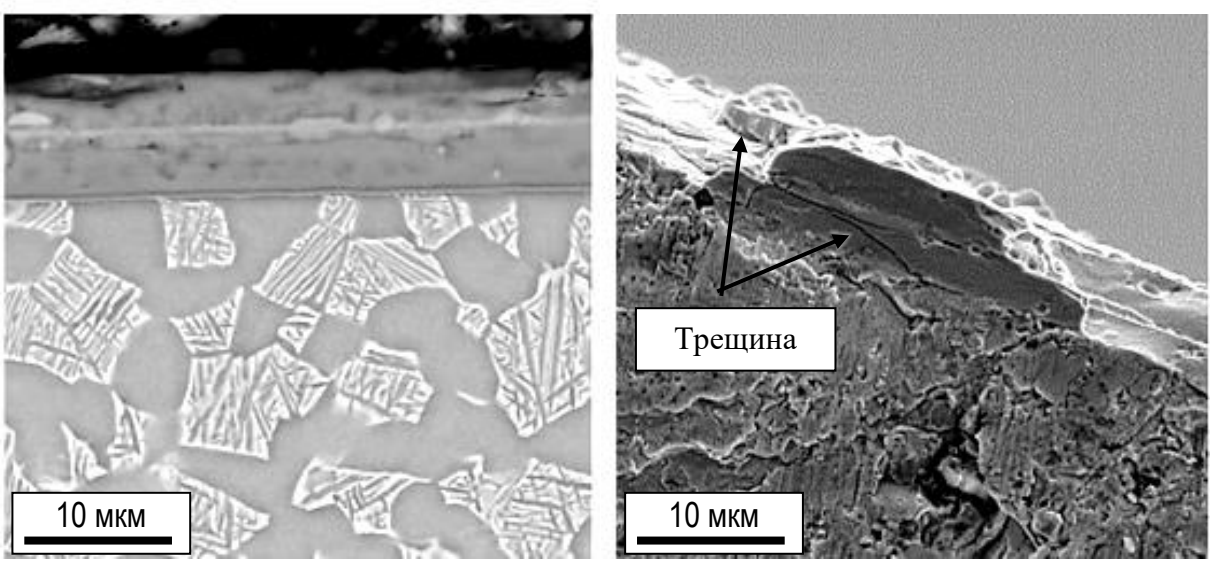


а *б*

а – область входной кромки; *б* – область очага усталостной трещины;

Рисунок 5.56 – участок развития усталостной трещины в основном материале под покрытием ((V, Ti)+(V, Ti)N)x2 толщиной h = 6...8 мкм

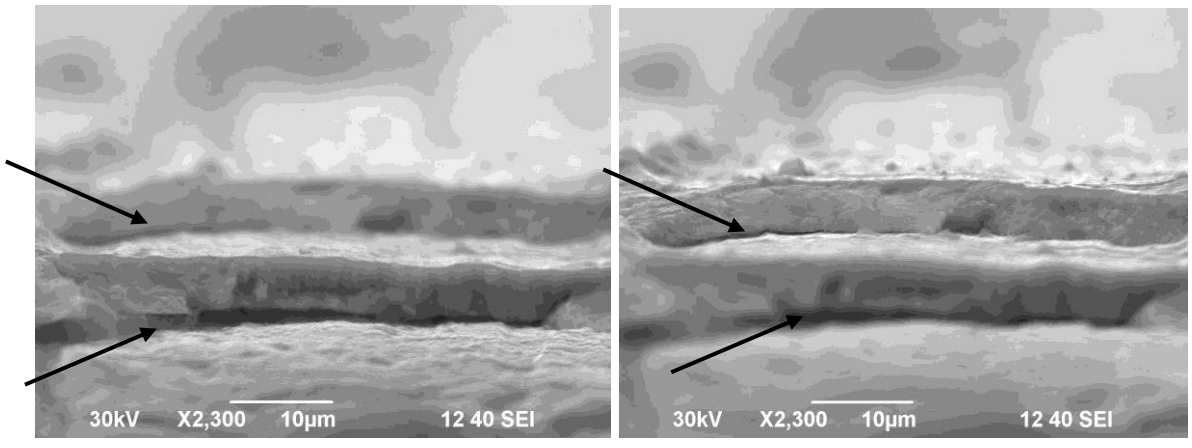
Сцепление покрытия с основой удовлетворительное, без образования сколов и расслоений. Таким образом, по характеру разрушения материала поверхности можно утверждать, что прочность адгезии покрытия превышает когезионную прочность материала покрытия на изгиб.



а *б*

а – в области C_{max}; *б* – в области долома со стороны спинки

Рисунок 5.57 – Микроструктура материала поверхности пера лопатки КНД с упрочнением: ионная имплантация + покрытие ((V, Ti)+(V, Ti)N)x2, *h* = 6...8 мкм



а *б*

Стрелками показаны трещины

Рисунок 5.58 – Ступенчатый характер излома многослойного ионно-плазменного покрытия ((V, Ti)+(V, Ti)N)x2 при испытаниях на многоцикловую усталость

5.5 Металлографическое исследование образцов с покрытиями

Исследование проводили на образцах с многослойными ионно-плазменными покрытиями, повышающими стойкость к газоабразивному износу (от 4,7 до 12,9 раза, пункт 5.1, глава 5), каплеударной эрозии (от 1,5 до 2,9 раза, пункт 5.2, глава 5) и фреттинг-коррозии (от 2,7 до 7,1 раза, пункт 5.3, глава 5) при одновременном увеличении циклической долговечности от 11 до 17% (пункт 5.4, глава 5). Варианты обработки образцов приведены в Таблице 5.11.

Таблица 5.11 – Варианты обработки образцов из сплава ВТ6

Вид обработки поверхности	Количество слоев	Толщина покрытия h, мкм
1 Исходное состояние, полирование	–	–
2 Ионная имплантация азота (и.и.)	–	–
3 и.и. + 0,5Ti+10TiN	2	7…10
4 и.и. + (0,3Ti + 2,5Ti*N) x5	10	12...15
5 и.и. + (0,3(V,Ti) + 2,5(V,Ti)N)x2	4	6...8
5 и.и. + (0,3(V,Ti) + 2,5(V,Ti)N)x4	8	12...15

Примечания – 1) Ti – сплав ВТ1-0, Ti* – сплав ВТ20 (TiAlZrVMo), V – сплав ВнМ-1; число перед материалом покрытия показывает толщину его слоя в мкм; 2) Исходное состояние – отжиг (550 °С, 2 ч, воздух) + полирование войлочными кругами

Исследования проводили на специально приготовленных торцевых, наклонных сферических шлифах и фольгах. Подробнее о подготовке образцов и методиках металлографических исследований изложено в главе 2.

Металлографическое исследование образцов включало в себя:

а) исследования микро- и субструктуры основного материала и материала покрытия по методикам растровой электронной микроскопии (РЭМ) и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ);

б) исследование покрытия на сферических шлифах с измерением толщины и количества его отдельных слоев;

в) исследование элементного состава материала поверхности;

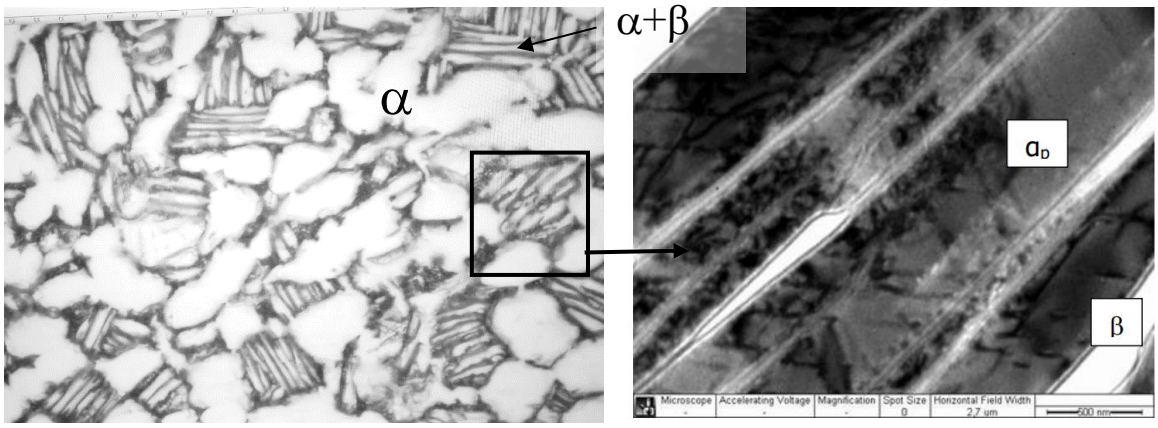
г) измерение микротвердости алмазными наконечниками типа Виккерс при нагрузке до 50 г и выдержке 15 с на приборе ПМТ-3М.

5.5.1 Исследование образцов в исходном состоянии и после ионной имплантации

Микроструктура материала поверхности

Исследования образцов из титанового сплава ВТ6 проводились совместно с НИИ «Физики перспективных материалов» ФГБОУ ВО «УУНиТ» (г. Уфа), проекты РНФ №19-79-10108 и №16-19-10356.

В исходном состоянии (закалка+отжиг, пункт 4.1.1, глава 4) микроструктура образцов из сплава ВТ6 представляет собой мелкозернистую смесь (α+β)–фаз в виде пластин α-титана (ГПУ кристаллическая решетка) по границам которых наблюдаются тонкие пластины β-титана (ОЦК кристаллическая решетка) с частично мелкими глобулами α-фазы 5-7 мкм. Толщина пластин α-Ti не превышает 0,5 мкм, β-Ti – не более 0,1 мкм (Рисунок 5.59 а). Дислокационная структура представлена хаотично распределенными дислокациями и отдельными сетчатыми структурами (Рисунки 5.59 б, и 5.60). Плотность дислокаций не превышает величину $5 \cdot 10^{12}$ м$^{-2}$.



а *б*

а – съемка во вторичных электронах РЭМ; *б* – дислокационная структура, ПЭМ

Рисунок 5.59 – Микроструктура титанового (α+β)-сплава ВТ6 в исходном состоянии

На Рисунках 5.60 и 5.61 представлены ПЭМ-изображения приповерхностного слоя образцов из сплава ВТ6 в исходном состоянии и после ионной имплантации азота (и.и. N^+) с дозой облучения $D = 2 \cdot 10^{17}$ ион/см^2. Анализ этих микроструктур позволил выявить следующие изменения. При имплантации, вследствие ударного воздействия ионов с высокой кинетической энергией и протекающей радиационно-стимулированной диффузии легируемых частиц, происходит формирование неравновесного состояния материала поверхности с большим количеством дефектов кристаллического строения. Наблюдается заметное разупорядочение

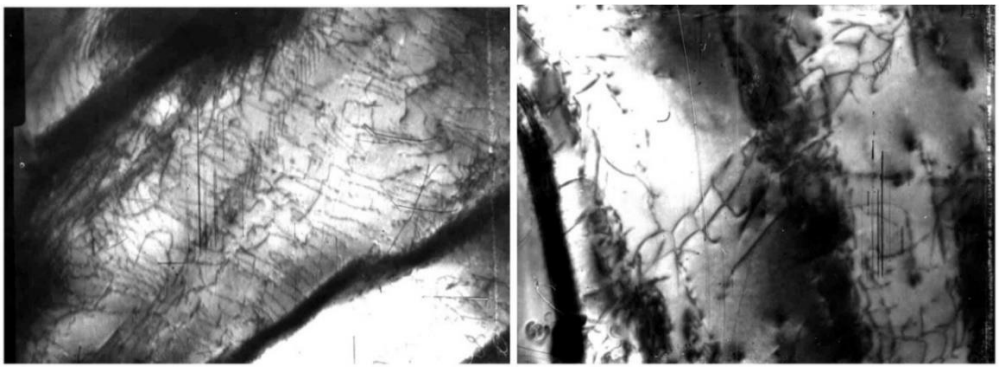
структуры и формирование блоков с высокой плотностью дислокаций (Рисунок 5.61). По результатам рентгеноструктурного анализа (РСА) было обнаружено заметное уменьшение размеров области когерентного рассеивания (ОКР), с 93 до 42 нм, сопровождаемое многократным увеличением общей плотности дислокаций (ρ) с $0{,}05 \cdot 10^{14}$ до $1{,}7 \cdot 10^{14}$ м$^{-2}$ (Таблицу 5.12) и размытием рефлексов, показанных на дифракционной картине (Рисунок 5.62).

Таким образов в результате проведения ионной имплантации азота субструктура сплава ВТ6 претерпевает существенные изменения. В поверхности формируются пересыщенные твердые растворы внедрения азота, повышается на несколько порядков плотность дислокаций, вследствие чего возникают внутренние локальные напряжения (пункт 5.7).

Таблица 5.12 – Результаты рентгеноструктурного анализа образцов из сплава ВТ6

Вид обработки поверхности	ОКР*, нм	Плотность дислокаций ρ, 10^{14} м$^{-2}$
1 Механическая обработка	–	0,35
2 Исходное состояние (исх.)	93	0,05
3 исх. + ионная имплантация N^+, $D = 2 \cdot 10^{17}$ ион/см^2	42	1,75

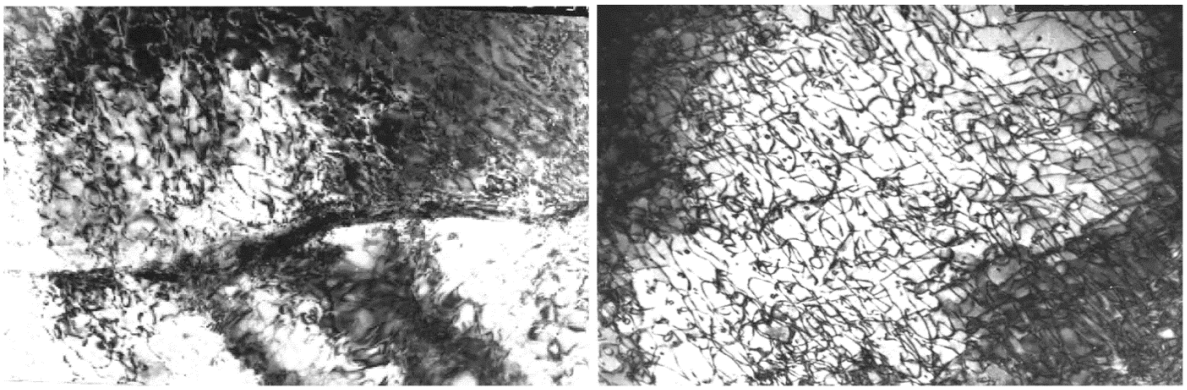
* – Область когерентного рассеивания



а *б*

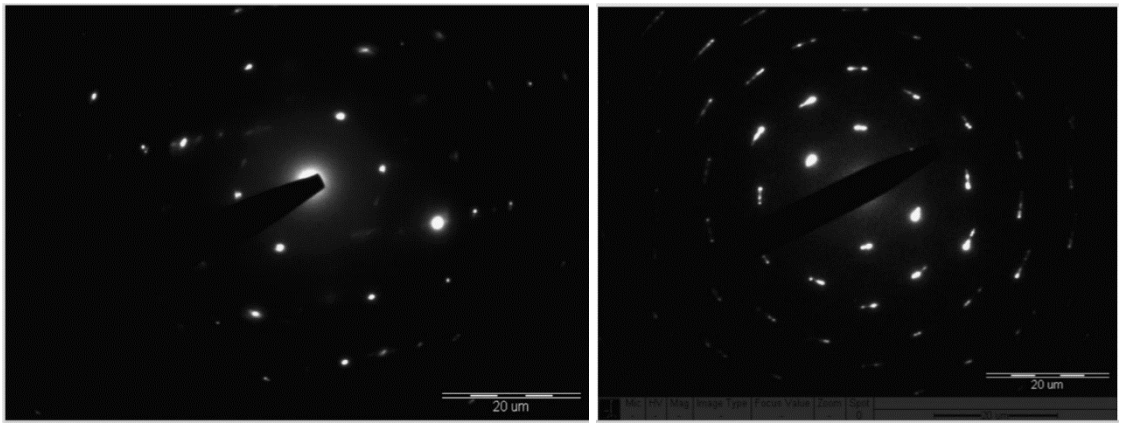
а – после механической обработки (ρ = $3{,}5 \times 10^{13}$ м$^{-2}$); *б* – после термообработки, в отожженном состоянии (ρ = $5{,}0 \times 10^{12}$ м$^{-2}$)

Рисунок 5.60 – Микроструктура материала поверхности образца из сплава ВТ6 (80 000 Х)



а *б*

Рисунок 5.61 – Микроструктура материала поверхности образца из сплава ВТ6 (80 000Х) после ионной имплантации азота $D = 2 \cdot 10^{17}$ ион/см^2 ($\rho = 1{,}75 \times 10^{14}$ м$^{-2}$)



а *б*

а – исходное состояние; *б* – после ионной имплантации азота $D = 2 \cdot 10^{17}$ ион/см^2

Рисунок 5.62 – Размытие рефлексов на дифракционной картине, наблюдаемое вследствие проведения ионной имплантации азота

Элементный состав материала поверхности

Исследование химического состава поверхности образцов после ионной имплантации и постимплантационного отжига проводили на специально изготовленных наклонных шлифах с помощью приставки Oxford INCA к РЭМ JEOL JSM-6490LV. Методика и определения элементного состава описана в п. 4.3, глава 4. Результаты исследования концентрации элементов в поверхностном слое упрочненного образца из титанового сплава ВТ6 после имплантации ионов азота и постимплантационного отжига, приведены на Рисунке 5.63. После проведения ионной имплантации исследуемых образцов в поверхностном слое толщиной до 30 нм наблюдается максимальная концентрация азота, от 20 до 50 ат.%. Далее, по глубине поверхности до 300-350 нм содержание азота уменьшается до величины 1,5...2,0%, что превышает норму для химического

состава сплава ВТ6 в 30 раз (не более 0,05% в соответствии с ГОСТ 19807-91). Наличие пика и наблюдаемое распределение концентрации азота являются характерными для ионной имплантации и объясняется процессами радиационно-стимулированной диффузии и «*эффектом дальнодействия*» [105-107,129], а также подтверждают сделанные ранее теоретические выводы о закономерностях распределения имплантированной примеси в поверхность лопаток газовых и паровых турбин при принятых режимах обработки, пункт 3.4, глава 3.

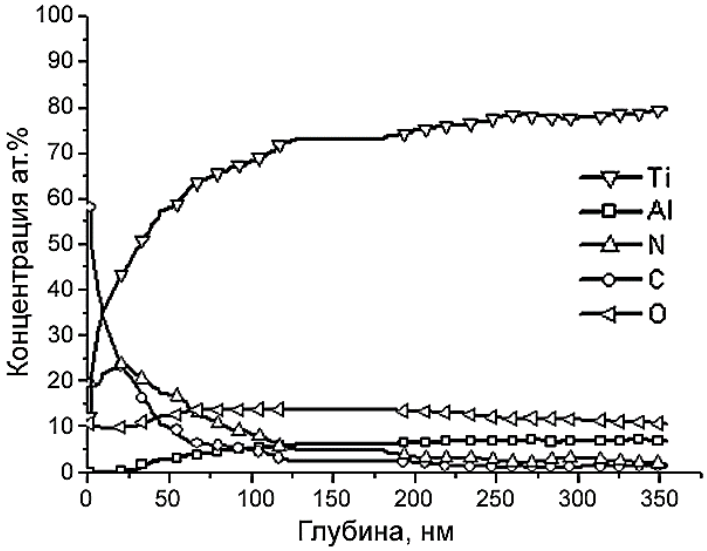
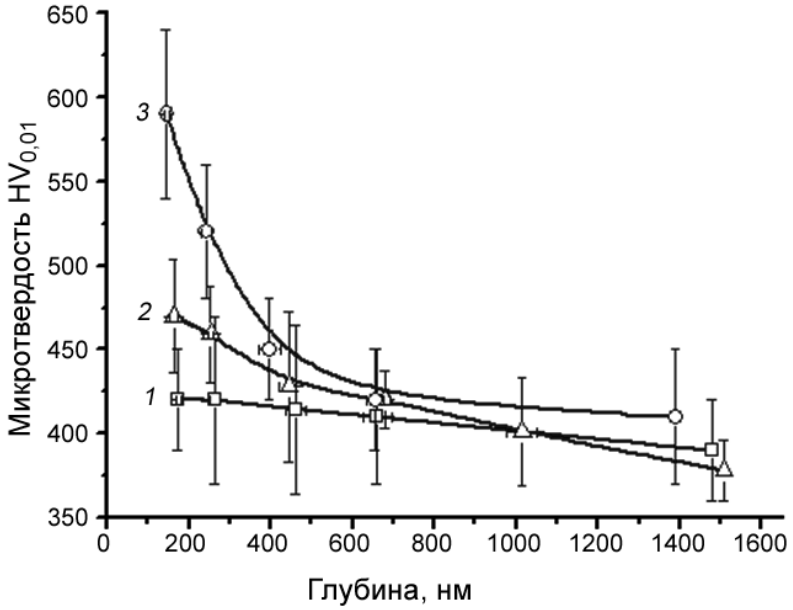


Рисунок 5.63 – Профиль распределения концентрации химических элементов в поверхностном слое образца из титанового сплава ВТ6 после ионной имплантации азота по режиму: (доза $D(N_2)$=$2\cdot10^{17}$ ион/см^2, постимплантационный отжиг: вакуум, 450±20 °С, 4 ч

Микротвердость материала поверхности

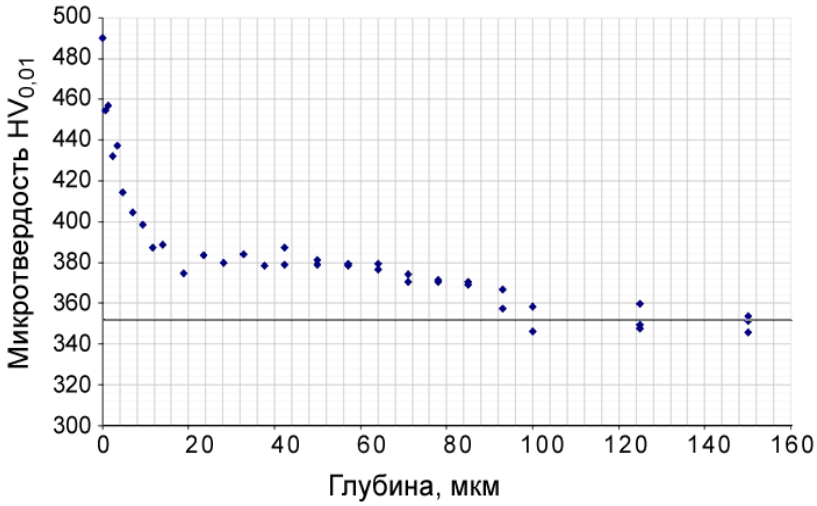
Для проведения исследования к упрочненной поверхности были изготовлены наклонные шлифы под постоянным углом 5°. Измерение микротвердости проводили по глубине на приборе ПМТ-3М алмазными наконечниками типа Виккерс при нагрузке до 10 г и выдержке 15 с. Результаты исследования микротвердости поверхностного слоя после различной обработки представлены на Рисунках 5.64, 5.65. На графиках показано распределение микротвердости упрочненного материала образцов из сплава ВТ6 по глубине поверхности. Установлено, что ионная имплантация с последующей термической обработкой позволяет увеличить микротвердость исходного образца на 40%, с 420 до 585 $HV_{0,01}$. Наибольший прирост микротвердости (более 10%) наблюдается в поверхностном слое толщиной до 500 нм, при этом эффект от упрочнения сохраняется до глубины ≈ 1000 нм. Наблюдаемое увеличение глубины упрочненного слоя может быть связано не только с повышенным содержанием имплантированного азота и формированием нитридных

фаз (Рисунок 5.63), но также с повышением плотности дислокаций (Таблица 5.13) и перестройкой исходной микроструктуры материала (Рисунок 5.59).



1 – исходное состояние, полирование; *2* – ионная имплантация азота, доза $D(N_2) = 10^{17}$ ион/см^2; *3* – ионная имплантация азота, доза $D(N_2) = 10^{18}$ ион/см^2

Рисунок 5.64 – Микротвердость материала поверхности образцов из ВТ6 при различных режимах ионной имплантации азота



Горизонтальной линией показан уровень средней величины микротвердости поверхности до упрочнения

Рисунок 5.65 – Микротвердость материала поверхности рабочей лопатки из сплава ВТ6 после ионной имплантации азота по режиму: доза $D(N_2) = 2 \cdot 10^{17}$ ион/см^2; постимплантационный отжиг: 450±20 °С; 4 ч

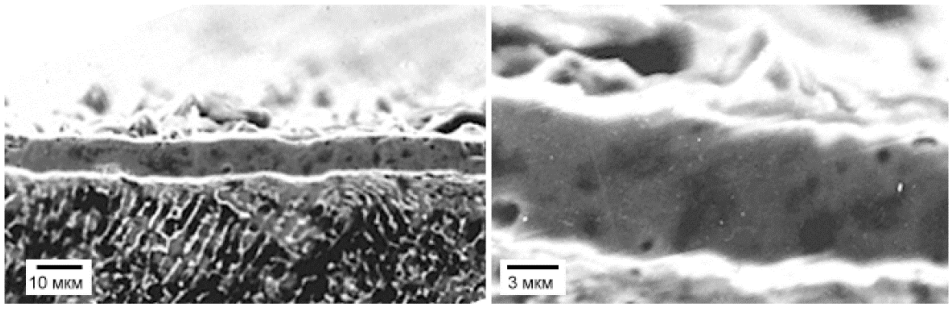
Наблюдаемый «*эффект дальнодействия*» (подробнее об этом эффекте изложено в пункте 3.4 главы 3 Приложения Б), выраженный в повышении микротвердости материала поверхности на глубина значительно большей глубины имплантации азота, также установлен на образце, вырезанном из рабочей лопатки паровой турбины из сплава ВТ6, после проведения ионной имплантации и постимплантационного отжига (Рисунок 5.65), что подтверждает приведенные выше результаты.

5.5.2 Исследование многослойных покрытий типа Ti + TiN

Микроструктура и элементный состав материала покрытия

Исследование микроструктуры проводили на образцах, вырезанных из пера рабочих лопаток последних ступеней паровых турбин из сплава ВТ6, в исходном отожженном состоянии, после электролитно-плазменного полирования (ЭПП) и ионной имплантации азота (и.и.) с дозой облучения $D(N_2) = 2 \cdot 10^{17}$ ион/см^2, совмещенной в одном вакуумном объеме с нанесением покрытия (Ti+TiN). Нанесение покрытия сопровождалось нагревом поверхности до 450±20 °С, выдержке при этой температуре ≈ 2,5 часа и последующим медленным остыванием вместе с установкой.

Микрофотография поверхности с двухслойным покрытием Ti+TiN общей толщиной h = 7...10 мкм приведена на Рисунке 5.66. Покрытие состоит из двух слоев: первый нанесенный слой – титан (Ti) толщиной ≈ 0,5 мкм; второй слой – нитрид титана (TiN). Нанесенные слои представляют собой плотные пленки без видимой пористости и возможных дефектов типа расслаиваний и сколов. Покрытие плотно прилегает к основному материалу, изменений микроструктуры в поверхности вследствие нанесения покрытия не наблюдается (Рисунок 5.66 а).

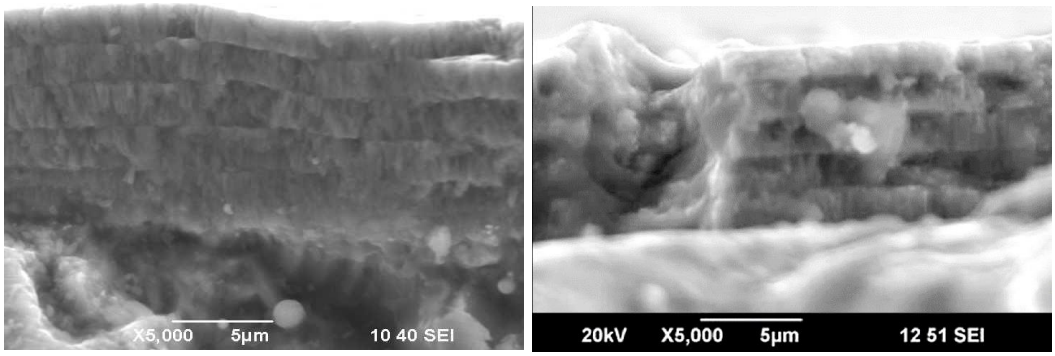


а *б*

а – 500X; *б* – 1500X

Рисунок 5.66 – Микроструктура двухслойного покрытия Ti+TiN на поверхности образца во вторичных электронах (РЭМ)

На Рисунке 5.67 показаны изломы десятислойного покрытия (Ti+TiN)x5 общей толщиной $h \approx 12$ мкм. На поверхности изломов хорошо видна структура многослойного покрытия, в виде чередующихся пар слоев (Ti+TiN), наносимых с двух электродуговых испарителей: α-сплав ВТ1-0 и псевдо α-сплав ВТ20.



а *б*

Рисунок 5.67 – Микроструктура многослойного покрытия (Ti+(TiAlZrVMo)N)x5 на поверхности образца, изображение изломов во вторичных электронах (РЭМ, 500Х)

Характер разрушения покрытия – хрупкий, что позволяет наблюдать столбчатое строение его нитридных слоев. На Рисунке 5.67 видно, что слои TiN состоят из вытянутых по нормали к поверхности зерен характерной толщиной 0,1...0,3 мкм и высотой ≈ 2,5 мкм, равной всей толщине нитридного слоя. Промежуточные титановые слои толщиной от 0,3 до 0,5 мкм хорошо видны на сферических шлифах, изготовленных к поверхности. На фотографиях (Рисунки 5.67 и 5.68) видно, что все титановые и нитридные слои покрытия образуют непрерывные пленки постоянной толщины, плотно прилегающие друг к другу и к поверхности.

На сферических шлифах (Рисунки 5.68 и 5.69), хорошо заметны отдельные неровности поверхности в виде впадин и выступов, при этом многослойное покрытие, повторяя профиль шероховатости, остается сплошным, без образования возможных расслоений, трещин и проч. дефектов, что свидетельствует о его высокой когезионной и адгезионной прочности. До увеличения 5000Х покрытие является визуально беспористым (Рисунок 5.69 б), при этом в его микроструктуре наблюдаются светлые сферические микрочастицы титана с размерами до 1 мкм, известные как «*капельная фаза*», сопутствующая процессу нанесениям ионно-плазменных покрытий электродуговыми испарителями [110, 128].

Исследования дислокационной структуры проводили на специально изготовленных тонких фольгах на просвет методом ПЭМ на растровом электронном микроскопе JEOL JSM-6490LV. Результаты проведенных электронно-микроскопических исследований покрытий, что плотность дислокаций в ионно-модифицированном слое материала после нанесения покрытия, совмещенного с нагревом (вакуум; 410±50 °С; 2,5 часа), составляет $\rho=1{,}8\times10^{14}$ м$^{-2}$ (Рисунок 5.72).

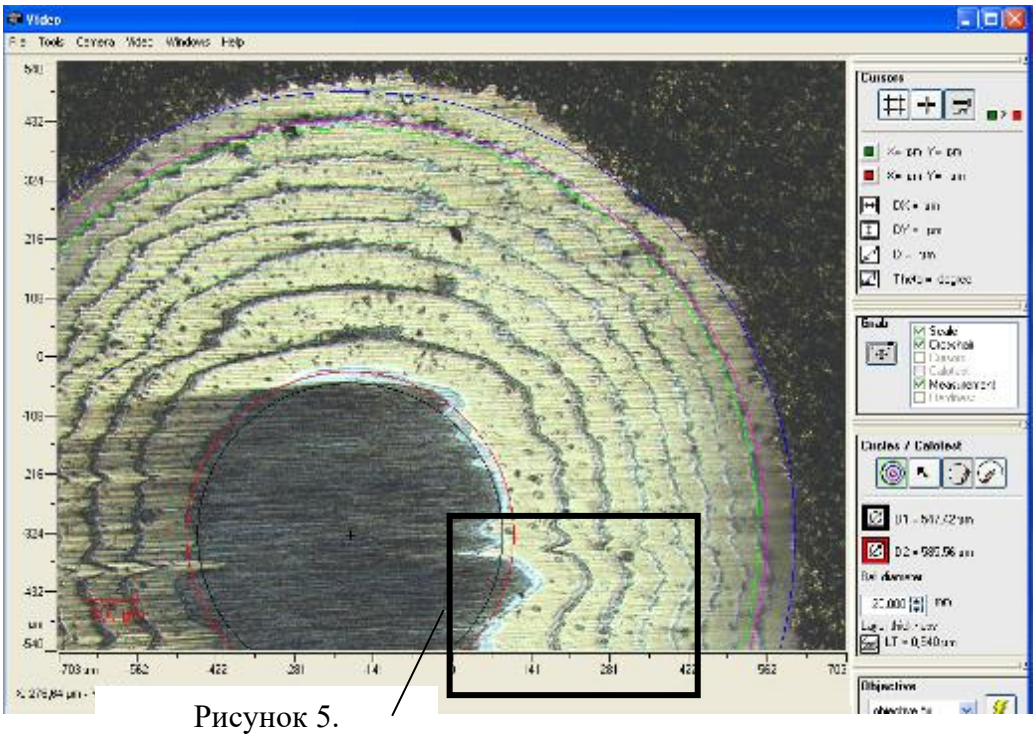
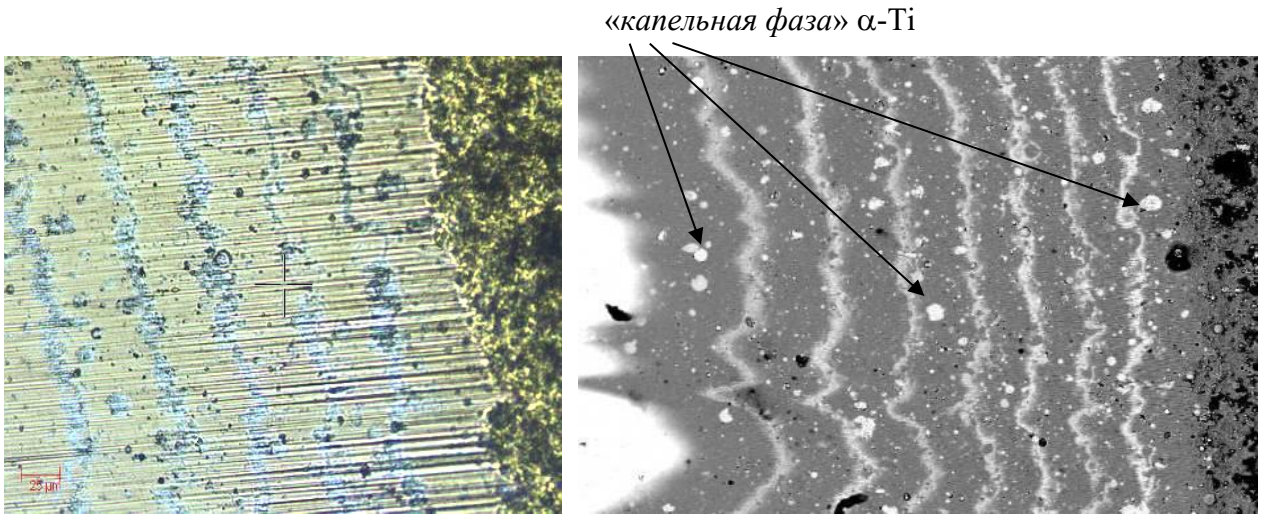


Рисунок 5.

Рисунок 5.68 – Пример изображения части сферического шлифа к поверхности с многослойным покрытием (Ti+(TiAlZrVMo)N)x8 в оптическом микроскопе системы металлографического анализа «Calotest»

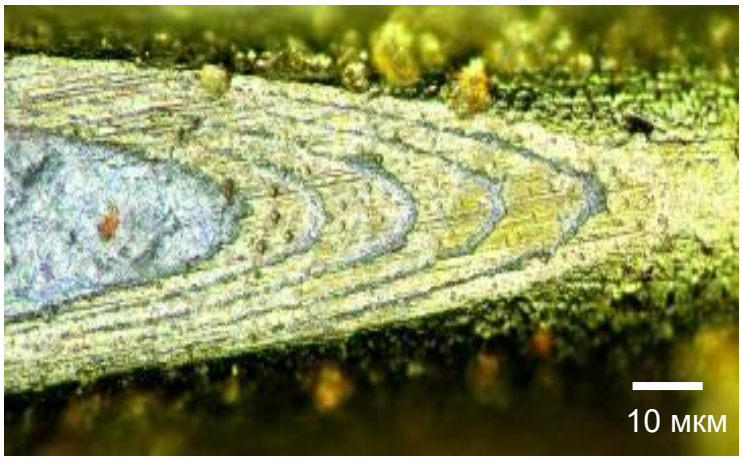


а *б*

а – оптическое изображение части сферического шлифа, 1000X;

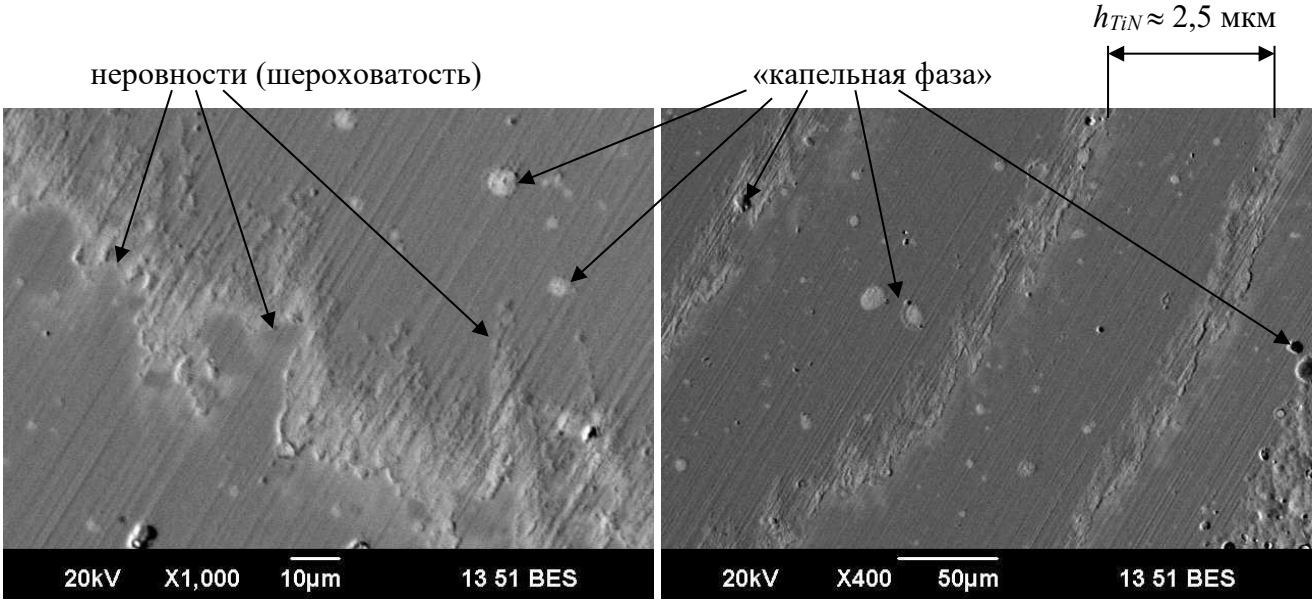
б – изображение части сферического шлифа во вторичных электронах (РЭМ, 5000X)

Рисунок 5.69 – Макроструктура многослойного покрытия (Ti+(TiAlZrVMo)N)x8



Видны отпечатки замеров микротвердости

Рисунок 5.70 – Макроструктура многослойного покрытием (Ti+(TiAlZrVMo)N)x5 на выходной кромке рабочей лопатки компрессора ГТД, наклонный шлиф

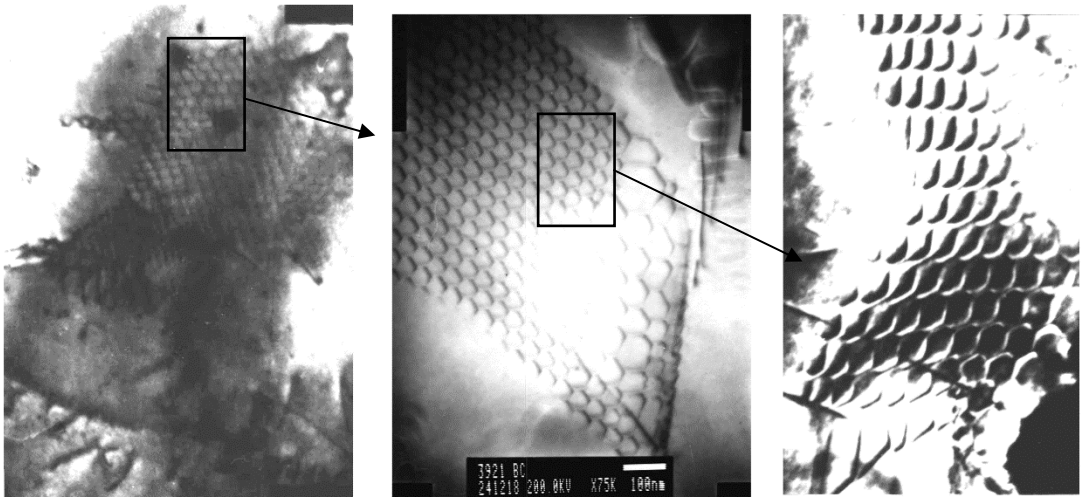


а (1000X) *б* (400X)

h_{TiN} – толщина нитридного слоя

Рисунок 5.71 – Отдельные элементы макроструктуры многослойного покрытия типа (Ti+(TiAlZrVMo)N) в отраженных электронах (РЭМ)

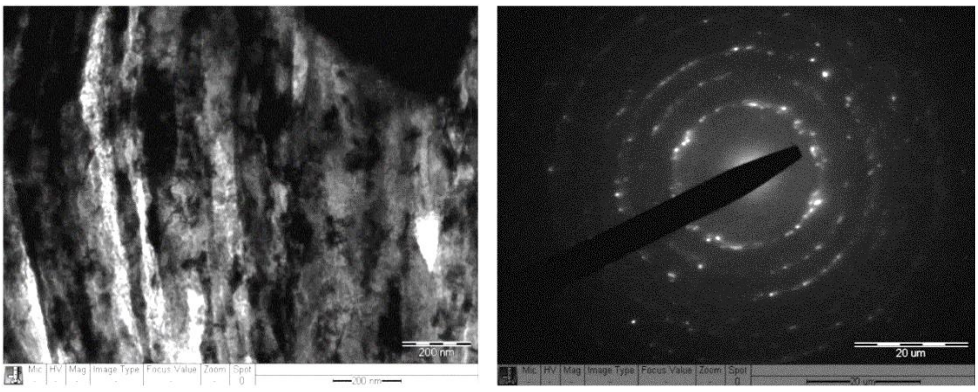
Сравнивая исходную микроструктуру ионно-модифицированного слоя, без термообработки (Рисунок 5.63, п. 5.2.1), и полученную после нанесения покрытия, можно заметить, что в результате нагрева в приповерхностном ионно-модифицированном слое наблюдается процесс полигонизации – изменение конфигурации дислокационных образований, без существенного изменения их исходной плотности, $\rho = 1{,}75 \times 10^{14}$ м$^{-2}$ (Таблица 5.12).



а (40 000Х) *б* (80 000Х) *в* (120 000Х)

Упрочняющая обработка: и.и. + нанесение покрытия (0,5Ti+10TiN)
при температуре 410±50 °С, t = 150 минут, ρ = 1,8×10^{14} м$^{-2}$
Рисунок 5.72 – Рабочая лопатка компрессора ГТД из сплава ВТ6

Нанесенное на ионно-модифицированную поверхность двухслойное покрытие (0,5Ti+10TiN), представляет собой плотную микрокристаллическую структуру нитрида титана размером 80-140 нм (Рисунок 5.73 а) в которой наблюдаются тонкие дислокационные сетки высокой плотности и микропористость размером до 10-15 нм, которая может являться эффективным барьером движения дислокаций, и, как следствие, обеспечивать дополнительное упрочнение покрытия. Размытие рефлексов на дифракционной картине (Рисунок 5.73 б) свидетельствует о наличии в покрытии внутренних напряжений, вызванных наличием дислокационных скоплений и локальных деформаций микроструктуры.

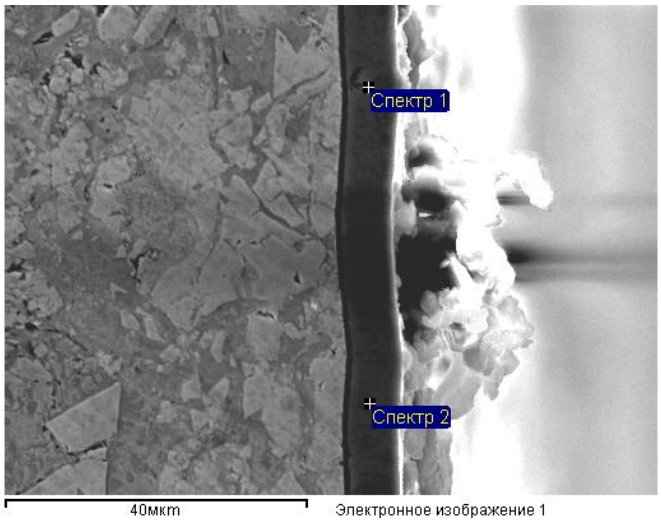


а *б*

Рисунок 5.73 – Микрокристаллическая структура покрытия Ti+TiN,
нанесенного на титановый сплав ВТ6, ПЭМ

Элементный состав материала покрытия

Определение концентрации химических элементов в различных слоях многослойных покрытий проводили на специально изготовленных наклонных и сферических шлифах с помощью приставки Oxford INCA к РЭМ JEOL JSM-6490LV. Методика и определения элементного состава описана в п. 4.3, глава 4. Результаты исследования представлены на Рисунках 5.74-5.76 и в Таблицах 5.13, 5.14.



Контактная поверхность антивибрационной полки рабочей лопатки КНД ГТД
Рисунок 5.74 – Схема определения элементного состава трехслойного покрытия ВК25+Ti+TiN, нанесенного на сплав ВТ6

Таблица 5.13 – Элементный состав покрытия Ti+TiN в весовых % (к Рисунку 5.74)

Спектр	N	Ti
Спектр 1	7,57	92,43
Спектр 2	11,89	88,11
Среднее	9,73±3,02	90,27±2,16

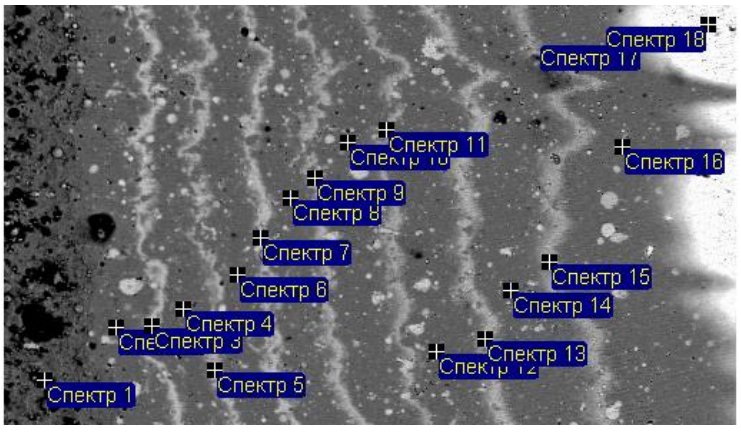


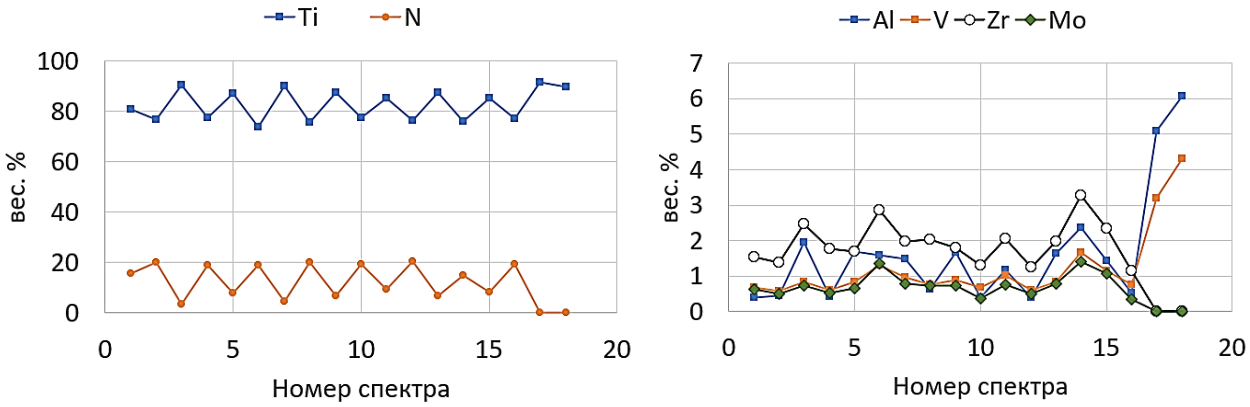
Рисунок 5.75 – Схема определения элементного состава
многослойным покрытием (Ti+(TiAlZrVMo)N)x8 на подложке ВТ6

Таблица 5.14 – Элементный состав покрытия (Ti+(TiAlZrVMo)N)x8 в вес. % (к Рисунку 5.75)

Спектр	N	Al	Ti	V	Zr	Mo
Спектр 1	15,84	0,41	80,71	0,69	1,53	0,63
Спектр 2	20,14	0,45	76,96	0,57	1,39	0,49
Спектр 3	3,59	1,95	90,41	0,84	2,48	0,73
Спектр 4	18,85	0,42	77,70	0,60	1,78	0,52
Спектр 5	8,04	1,69	87,06	0,84	1,70	0,67
Спектр 6	18,95	1,58	73,96	1,31	2,85	1,35
Спектр 7	4,68	1,48	89,99	0,98	1,99	0,79
Спектр 8	20,05	0,64	75,64	0,77	2,02	0,73
Спектр 9	6,97	1,68	87,65	0,89	1,80	0,73
Спектр 10	19,46	0,41	77,64	0,69	1,31	0,38
Спектр 11	9,41	1,18	85,42	1,02	2,05	0,76
Спектр 12	20,39	0,40	76,45	0,61	1,26	0,50
Спектр 13	6,94	1,65	87,47	0,84	1,99	0,79
Спектр 14	15,06	2,37	75,89	1,66	3,27	1,41
Спектр 15	8,38	1,44	85,14	1,14	2,35	1,07
Спектр 16	19,31	0,53	77,07	0,76	1,15	0,34
Спектр 17	0,00	5,10	91,70	3,20	0,00	0,00
Спектр 18	0,00	6,08	89,61	4,31	0,00	0,00
ВТ20 ГОСТ 19807-91	<0,05	5,5…7,0	85,2...91,4	0,8...2,5	1,5...3,5	–

Нанесение двухслойного покрытия Ti+TiN проводили распылением мишени из технически чистого α-титана ВТ1-0 с последующей подачей в рабочую камеру азота. Сформированное покрытие представляет собой композиционный материал из двух последовательно нанесенных слоев различной толщины: Ti (99,8 вес. %) и образованного в результате плазмохимических реакций нитрида титана с содержанием азота в диапазоне от 7 до 12%. Отношение массовых долей титана к азоту в нитридном слое составляет 9:1 (Таблица 5.14), что соответствует среднему отношению количества атомов Ti:N (ат.) = 2,7:1. Дополнительных примесей кроме азота в покрытии не обнаружено.

Нанесение шестнадцатислойного покрытия (Ti+(TiAlZrVMo)N)x8 проводили распылением двух мишеней: *1* – технически чистый α-титан ВТ1-0 (Ti) и *2* – легированный псевдо альфа-титановый сплав ВТ20 (TiAlZrVMo) с периодической подачей в рабочую камеру азота. Сформированное таким образом покрытие представляет собой композиционный материал из восьми титановых Ti (Таблица 5.14, спектры: 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15) и восьми нитридных (TiAlZrVMo)N (Таблица 5.14, спектры: 1, 2 ,4, 6, 8, 10, 12, 14, 16) последовательно нанесенных слоев различной толщины. Графики распределения химических элементов по слоям покрытия показаны на Рисунке 5.76.



а *б*

Рисунок 5.76 – Распределение химических элементов по толщине покрытия (в соответствии с Рисунком 5.75 и Таблицей 5.14)

Анализ полученных результатов позволяет заключить, что исследуемое покрытие представляет собой чередование сравнительно тонких слоев титана (89,5 вес. %) и нитрида титана с содержанием азота до 20 вес. %, при этом изменение химического состава носит периодический характер, соответствующий сформированной структуре покрытия (Рисунок 5.76 а). Отношение массовых долей титана к азоту в нитридном слое составляет 4:1 (Таблица 5.14), что соответствует среднему отношению количества атомов Ti:N(ат.) = 1,1 : 1. Кроме азота в материале покрытия присутствуют легирующие элементы из сплава ВТ20 (по мере убывания вес. %): Zr, Al, V, Mo. Суммарная массовая доля этих элементов не превышает 8,7 вес. %, при наибольшем содержании Zr до 3,3%.

Рентгеноструктурный анализ материала покрытия

Рентгеноструктурный анализ образцов из сплава ВТ6 с нанесенным шестнадцатислойным покрытием (Ti+(TiAlZrVMo)N)x8 проводили на дифрактометре Rigaku Ultima IV. Фазовый анализ проводился по рентгеновским дифрактограммам, снятым при Cu-Kα – излучении в диапазоне брэгговских углов 2Θ = 25...80°. Подробнее методика анализа описана в п. 4.4, глава 4.

В результате анализа полученных результатов установлено, что исследуемое многослойное покрытие нитрида титана (Ti+(TiAlZrVMo)N) представляет собой трехфазную систему, состоящую из двух нитридных фаз титана: δ-нитрид (TiN), ε-нитрид (Ti_2N) с включениями α-Ti. Включения α-Ti имеют гексагональную решетку с периодами: a = 2,950 Å, c= 4,683 Å и плотностью ρ = 4,506 г/см^3.

Нитрид титана δ-TiN (мононитрид) характеризуется гранецентрированной кубической ре-

шеткой с параметром a = 4,243 Å. Фаза δ-TiN обладает высокой твердостью (≈ 2000 HV) и плотностью ρ = 5,393 г/см^3 [113, 114]), является основным элементом исследуемого покрытия. Нитрид титана ε-Ti_2N обладает, как и α-Ti, гексагональной решеткой с периодами a = 4,945 Å, c = 3,034 Å. Плотность Ti_2N составляет ρ = 4,914 г/см^3. По сравнению с мононитридом титана фаза обладает меньшей твердостью и модулем упругости [113]. Дополнительных фаз, связанных с наличием в материале покрытия легирующих элементов: Zr, Al, V, Mo (Таблица 5.15), не выявлено, что может свидетельствовать об их полном растворении с образованием твердых растворов внедрения, о чем косвенно свидетельствует уширение пиков нитридных фаз (Рисунок 5.77). Наличие пиков α-фазы титана в покрытии подтверждает наличие в микроструктуре покрытия «*микрокапельной фазы*» титана в нитридных слоях, наблюдаемых на микрошлифах в виде светлых глобулярных частиц с размерами 0,1...0,5 мкм (Рисунок 5.75).

Таблица 5.15 – Фазовый состав многослойного покрытия (Ti+(TiAlZrVMo)N)x8 (к Рисунку 5.77)

Фаза	Относ. количество, %
α-Ti	7,7
δ-TiN	87,1
ε-Ti_2N	5,2

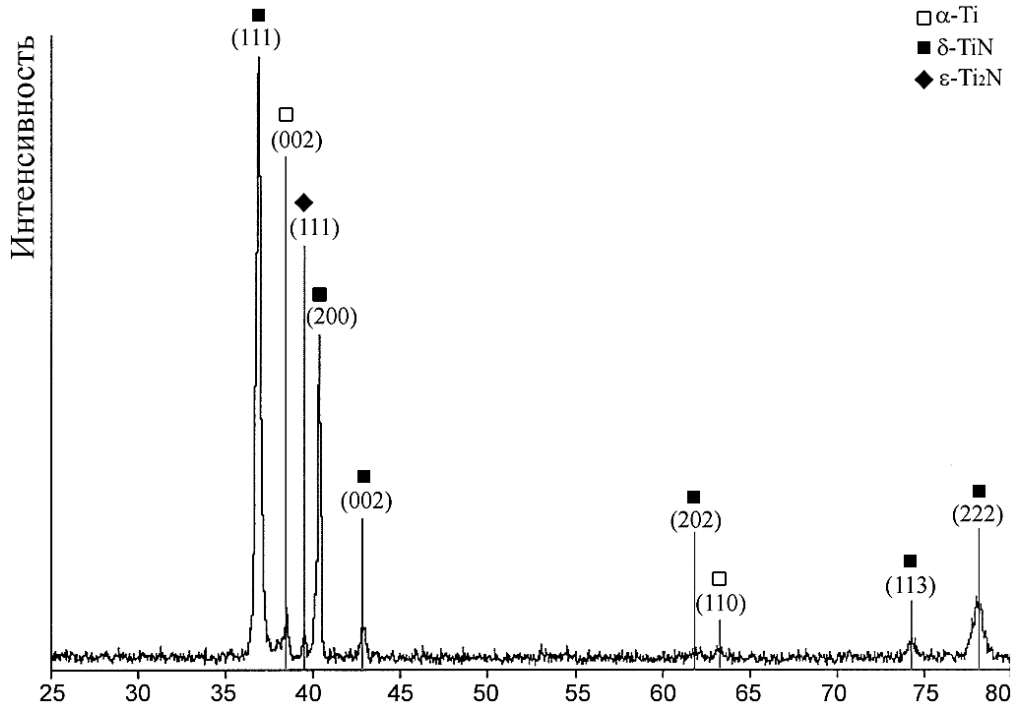
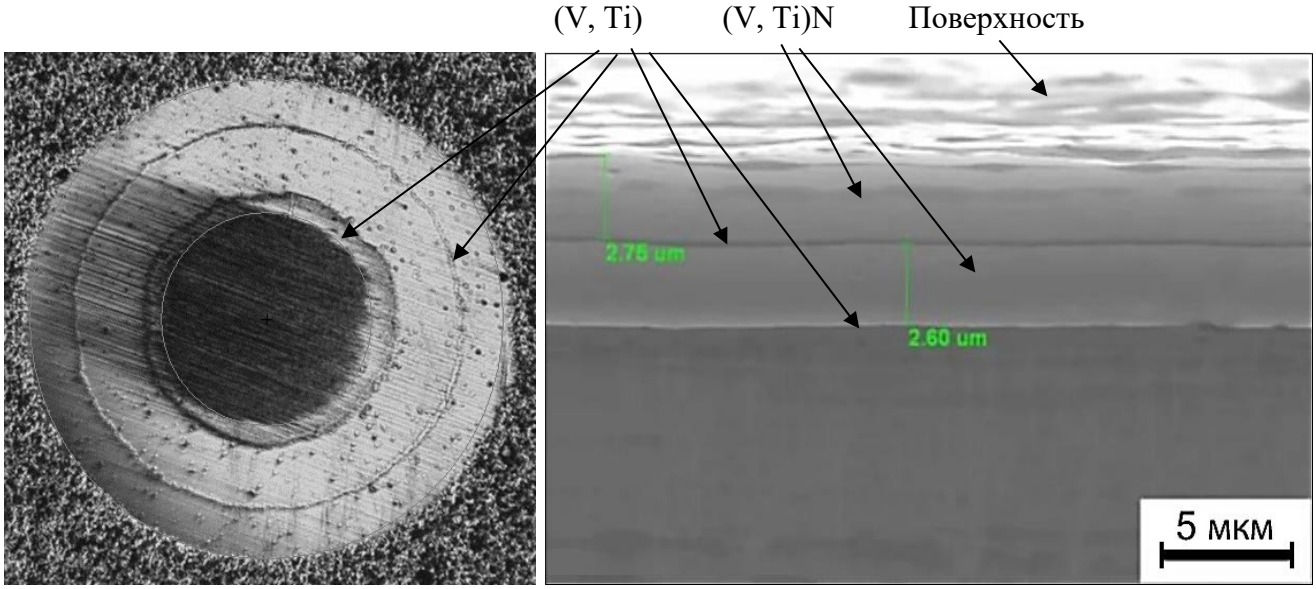


Рисунок 5.77 – Дифрактограмма многослойного покрытия (Ti+(TiAlZrVMo)N)x8

5.5.3 Исследование многослойных покрытий типа ((V, Ti)+(V, Ti)N)

Микроструктура и элементный состав материала покрытия

Структуру покрытий ((V, Ti)+(V, Ti)N) с различным количеством слоев исследовали после изготовления сферических шлифов на световом микроскопе при увеличении 200Х совместно с НИИ физики перспективных материалов ФГБОУ ВО «УУНиТ» в рамках научного проекта «Повышенные эксплуатационные свойства и механизмы разрушения ультрамелкозернистых титановых сплавов в сочетании с наноструктурированными покрытиями». Покрытие представляет собой многослойную композицию с чередованием основных нитридных слоев (V, Ti)N толщиной 2,5…2,6 мкм и сравнительно тонких прослоек титана и ванадия промежуточных (V, Ti) и толщиной 0,2-0,3 мкм (Рисунки 5.78, 5.79). Микрокристаллическая структура слоев плотная, без видимой пористости и следов расслоения В нитридных слоях (Рисунок 5.79 б) наблюдаются округлые следы «капельной фазы» светлого цвета диаметром до 0,5 мкм. На поверхности покрытия вследствие выкрошивания «капельной фазы» наблюдается пористость, не превышающая 1%. Измерение поверхностной пористости проводили по известному методу Глаголева.

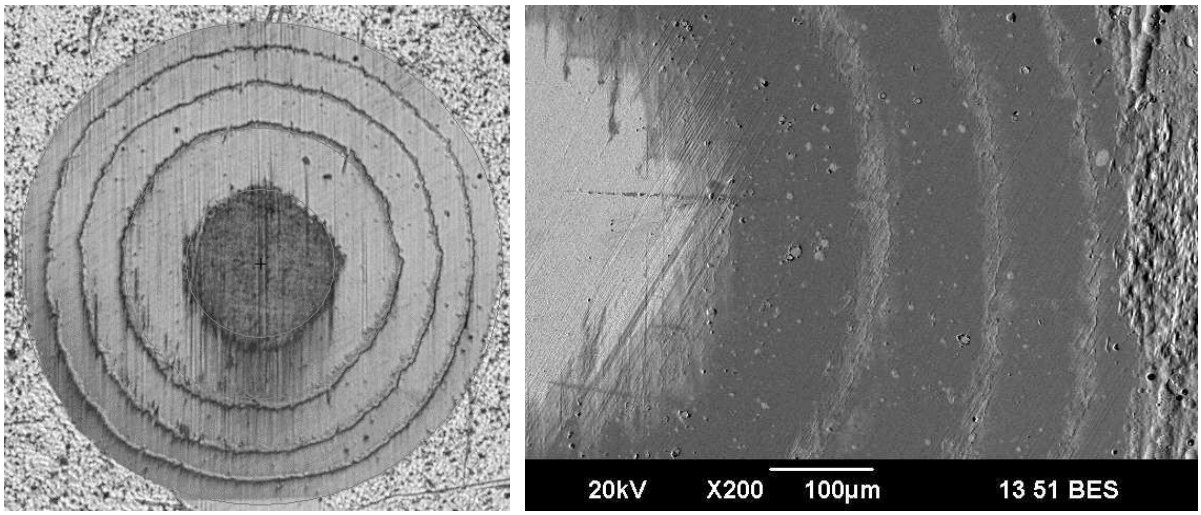


а *б*

а – сферический шлиф в оптическом микроскопе;

б – поперечный шлиф во вторичных электронах (РЭМ)

Рисунок 5.78 – Изображение многослойного покрытия ((V, Ti)+(V, Ti)N)x2 на сплаве ВТ6

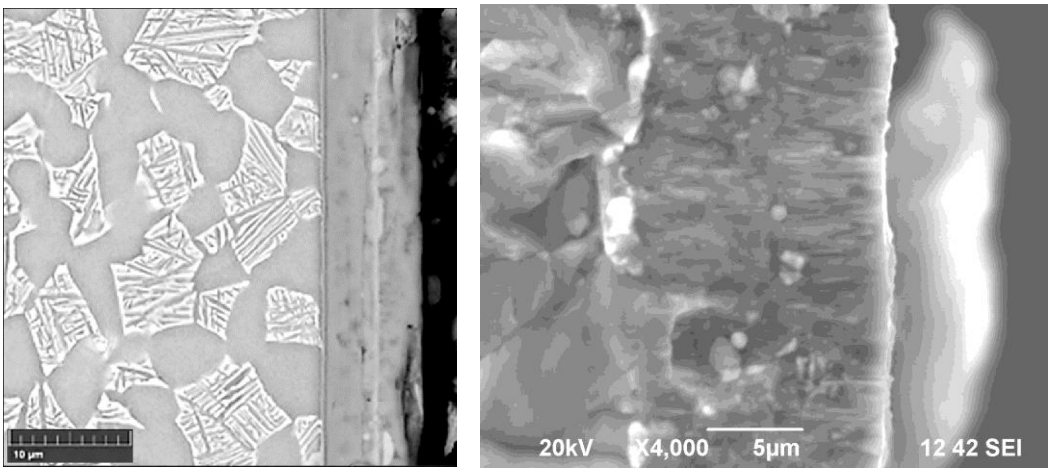


а *б*

а – сферический шлиф в оптическом микроскопе;

б – часть сферического шлифа в отраженных электронах (РЭМ)

Рисунок 5.79 – Изображение многослойного покрытия ((V, Ti)+(V, Ti)N)x4 на сплаве ВТ6



а *б*

а – поперечный шлиф, покрытие (V+(V, Ti)N)x2;

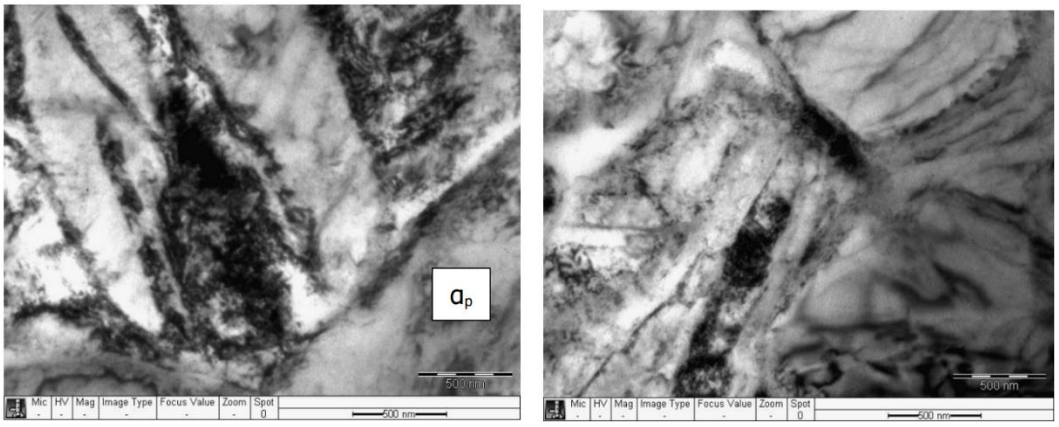
б – поперечный излом, покрытие ((V, Ti)+(V, Ti)N)x2

Рисунок 5.80 – Изображение многослойного покрытия на сплаве ВТ6 во вторичных электронах (РЭМ)

На Рисунке 5.80 б показан излом восьмислойного покрытия ((V, Ti)+(V, Ti)N)x4 общей толщиной h = 12…15 мкм. Характер разрушения покрытия – хрупкий, что позволяет наблюдать столбчатое строение нитридных слоев покрытия. Слои (V, Ti)N состоят из вытянутых по нормали

к поверхности зерен характерной толщиной 0,2...0,3 мкм и высотой ≈ 2,5 мкм, равной всей толщине нитридного слоя. Промежуточные слои (V, Ti) толщиной 0,3...0,5 мкм хорошо видны на поперечном (Рисунок 5.80 а) и сферических шлифах (Рисунок 5.79). Все основные нитридные и промежуточные слои покрытия образуют непрерывные пленки постоянной толщины, плотно прилегающие друг к другу и к поверхности.

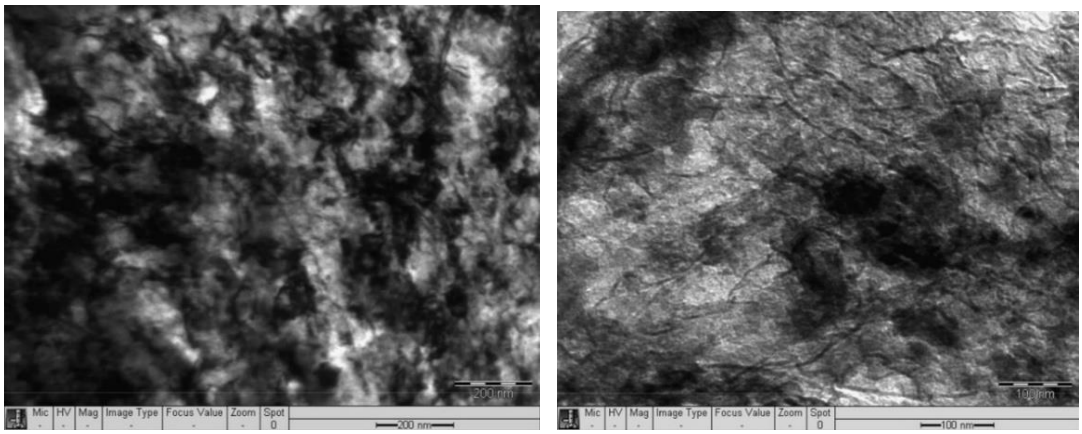
Исследования дислокационной структуры проводили на специально изготовленных тонких фольгах на просвет методом ПЭМ на растровом электронном микроскопе JEOL JSM-6490LV. Результаты проведенных электронно-микроскопических исследований на тонких фольгах показали, что в приповерхностном ионно-модифицированном слое в результате нагрева (вакуум; 450±20°С; 2,5 ч), совмещенного с нанесением ионно-плазменного покрытия, наблюдается изменение конфигурации дислокационных образований (Рисунок 5.81) без существенного изменения исходной плотности дислокаций, достигнутой в результате ионной имплантации, $\rho = 1{,}75\times10^{14}$ м$^{-2}$ (Таблица 5.12).



а (50 000Х) *б* (50 000Х)

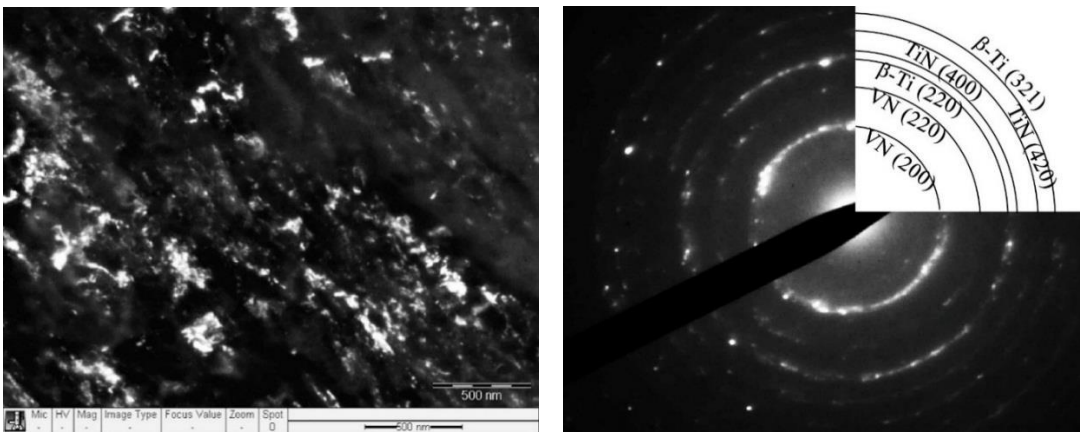
Рисунок 5.81 – Микроструктура поверхностного ионно-модифицированного слоя сплава ВТ6 после ионной имплантации азота и нанесения покрытия
($D(N_2) = 2\cdot10^{17}$ ион/см^2, покрытие ((V, Ti)+(V, Ti)N)х2, нагрев: вакуум; 450±20°С; 2,5 ч)

Электронно-микроскопическое исследование тонких фольг с покрытием ((V,Ti)+(V,Ti)N)х2 показали, что оно представляет собой плотную микрокристаллическую двух фазную структуру нитрида титана размером ≈ 120 нм и нитрида ванадия размером ≈ 50 нм (Рисунки 5.82 и 5.83), в которых имеются тонкие дислокационные сетки высокой плотности. Размытие рефлексов на дифракционной картине (Рисунок 5.83 б) свидетельствует о наличии в покрытии внутренних напряжений, вызванных наличием дислокационных скоплений и локальных деформаций микроструктуры.



а *б*

Рисунок 5.82 – Микроструктура четырехслойного покрытия ((V, Ti)+(V, Ti)N)x2 на поверхности ионно-модифицированного сплава ВТ6



а *б*

Рисунок 5.83 – Микрокристаллическая структура четырехслойного покрытия ((V, Ti)+(V, Ti)N)x2, нанесенного на титановый сплав ВТ6, ПЭМ

Элементный состав материала покрытия

Определение концентрации химических элементов в различных слоях многослойного покрытия ((V, Ti)+(V, Ti)N)x2, нанесенного на образец из сплава ВТ6, проводили на специально изготовленных наклонных и сферических шлифах с помощью приставки Oxford INCA к РЭМ JEOL JSM-6490LV. Методика и определения элементного состава описана в п. 4.3, глава 4. Результаты исследования представлены на Рисунке 5.84 и в Таблице 5.16. Полученные данные свидетельствуют о нанесении титана и ванадия в одинаковых весовых пропорциях и образовании нитридных фаз, предположительно TiN и VN. Спектр 7, снятый из центральной области шлифа, соответствует химическому составу титанового сплава ВТ6.

Таблица 5.16 – Элементный состав в вес. % (к Рисунку 5.84)

Спектр	Ti	V	N	Al
Спектр 1	43,97	47,13	8,9	0,00
Спектр 2	41,99	46,52	7,49	0,00
Спектр 3	47,17	52,83	0,00	0,00
Спектр 4	43,64	46,80	9,13	0,00
Спектр 5	44,24	45,53	9,89	0,00
Спектр 6	46,77	50,61	1,72	0,90
Спектр 7	89,25	5,26	0,00	5,49

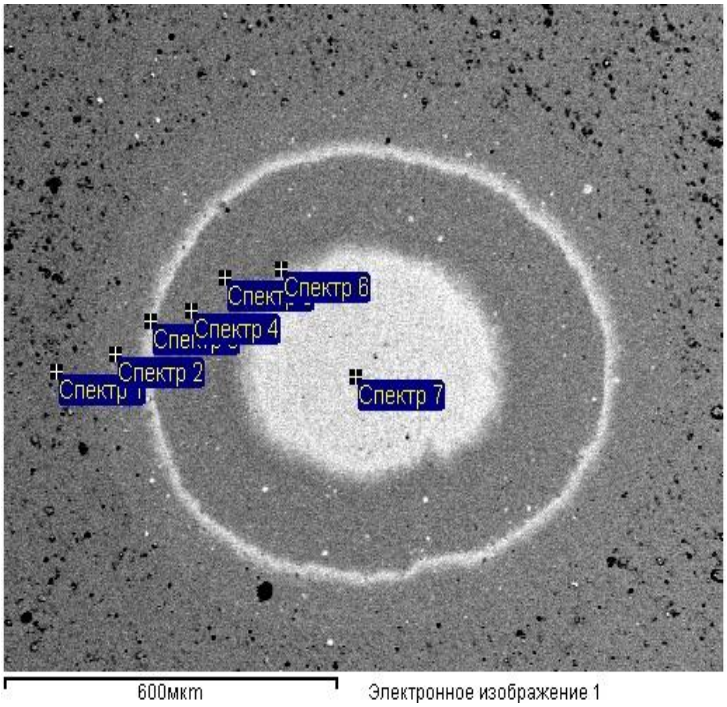


Рисунок 5.84 – Схема определения элементного состава на сферическом шлифе к четырехслойному покрытию ((V, Ti)+(V, Ti)N)x2 на подложке ВТ6

Рентгеноструктурный анализ материала покрытия

Рентгеноструктурный анализ образцов из сплава ВТ6 с нанесенным многослойным покрытием (V+(V, Ti)N)x2 проводили на дифрактометре Rigaku Ultima IV. Фазовый анализ проводился по рентгеновским дифрактограммам, снятым с помощью Cu-Kα – излучения в диапазоне двойных брэгговских углов (2Θ) от 25 до 80°.

Результаты приведены на Рисунке 5.85 и в Таблице 5.17.

Основной отличительной особенностью ванадия от других переходных металлов IV-V групп, используемых для легирования титановых покрытий и формирования нитридных слоев

(Zr, Cr, реже Mo, Nb), является его способность стабилизировать β-фазу титана а также образовывать на ее основе непрерывный ряд интерметаллидов, обеспечивая повышение механических свойств, в широком диапазоне концентраций от 2,5 до 95 ат.% [261].

Основными механизмами дислокационного упрочнения (по Бочвару), реализуемыми при формировании многослойного покрытия, являются твердорастворное и дисперсионное упрочнение каждого отдельного слоя. При одновременной конденсации на поверхности детали атомов титана и ванадия реализуется механизм твердорастворного упрочнения материалов покрытия. В периодической системе Менделеева ванадий располагается сразу после титана, эти элементы имеют близкие атомные радиусы и изоморфную кристаллическую решетку в β-области диаграммы (Рисунок 5.86). Необходимо отметить, что, учитывая неравновесность протекающих плазмохимических реакций при формировании ионно-плазменных покрытий, диаграмма состояния отражает лишь наиболее вероятностное состояние материала, требующее подтверждение при структурно-фазовом исследовании.

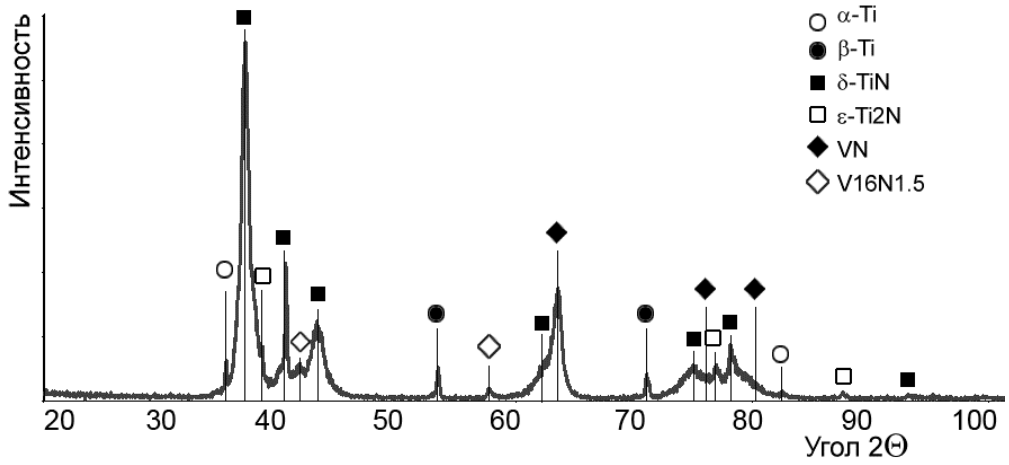


Рисунок 5.85 – Дифрактограмма многослойного покрытия ((V, Ti)+(V, Ti)N)x2

Таблица 5.17 – Фазовый состав многослойного покрытия ((V, Ti)+TiVN)x2 (к Рисунку 5.85)

Фаза	Относ. количество, %
δ-TiN	55,4
VN	20,2
$V_{16}N_{1.5}$	10,1
β-Ti	10,0
α-Ti	2,8
ε-Ti_2N	1,5

Ванадий является активным β-стабилизатором и в этой модификации образует с титаном непрерывный ряд твердых растворов. При концентрации ванадия до 2,7 ат. % возникают твердые растворы замещения при размещении атомов ванадия в некоторых узлах решетки титановой матрицы. При концентрации ванадия более 3,7 ат. % совместно с твердыми растворами замещения формируются твердые растворы внедрения атомов ванадия в титановую матрицу. Критическая концентрация для стабилизации β-фазы составляет 15-20 ат. % ванадия. Кроме того, сплавы системы Ti-V подвержены сильному дисперсионному упрочнению. Атомы ванадия, внедряясь в решетку твердого раствора титана, обусловливают ее искажение и возникновение упругих напряжений сжатия, затрудняющее движение дислокаций и, за счет этого, значительно повышают твердость, модуль упругости при некотором снижении пластичности [262]. При увеличении в твердом растворе ванадия более 30-50 ат. % он разделяется на два изоморфных раствора на основе (βTi) и (V).

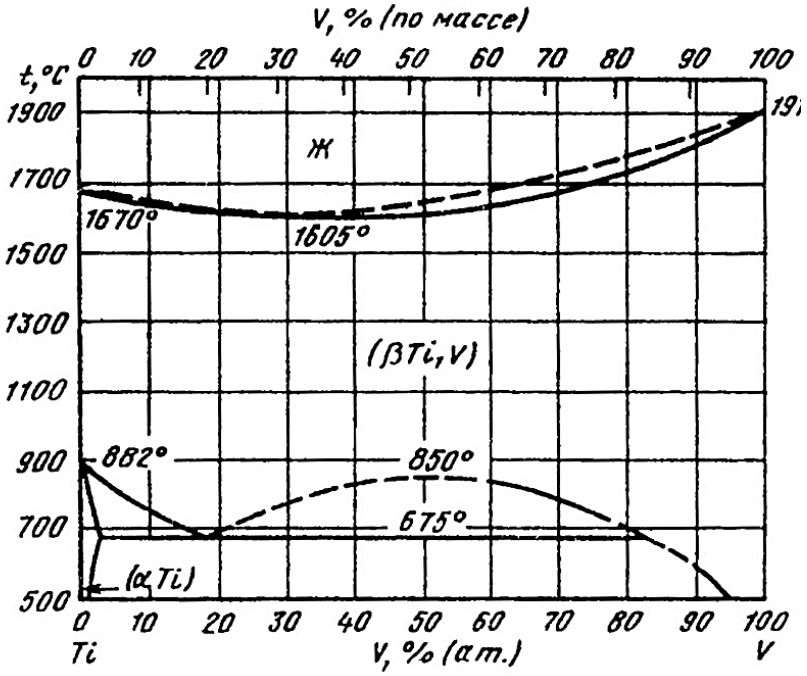


Рисунок 5.86 – Диаграмма Ti-V [261]

При нанесении в среде реакционного газа (азота) нитридных слоев покрытия в результате протекания плазмохимических реакций образуются твердые растворы внедрения азота в кристаллическую решетку титана и ванадия в виде сверхструктур, преимущественно соответствующих нитридным фазам: Ti_xN, V_xN_y, что подтверждается рентгеновским структурно-фазовым исследованием. Дифрактограмма многослойного покрытия показана на Рисунке 5.85, фазовый со-

став приведен в Таблице 5.17. Частицы фаз VN, возникающие матрице TiN (55,4 отн. %), являются эффективными барьерами для механизма пластической деформации нитридных слоев покрытия. Таким образом, наравне с твердорастворным упрочнением промежуточных слоев TiV, в нитридных слоях покрытия реализуется дисперсионный механизм упрочнения (по Бочвару).

Особенностью дисперсионного механизма упрочнения является то, что из-за различия типов и параметров решеток фаз TiN и TiV формируется некогерентная межфазная граница с соответствующими ей зернограничными дислокациями. Таким образом, в области некогерентности формируется поле напряжений, обусловливающее повышение уровня механических и прочностных свойств покрытия [263].

5.6 Исследование микротвердости

Для проведения исследований микротвердости образцов с покрытиями к упрочненной поверхности были изготовлены наклонные шлифы под постоянным углом 5°. Измерение микротвердости проводили по глубине на приборе ПМТ-3М алмазными наконечниками типа Виккерс при нагрузке 50 г и выдержке 15 с. Результаты исследования микротвердости многослойных покрытий на образцах из сплава ВТ6 представлены в Таблицах 5.18, 5.19 и на Рисунках 5.88, 5.89.

Таблица 5.18 – Микротвердость многослойных покрытий системы (Ti+TiN)

Покрытие	Толщина h, мкм	Кол-во слоев n	Толщина нитридного слоя h_N, мкм	Микротвердость $HV_{0,05}$
Ti+TiN	9±1,5	2	10±1,5	1852±87
(Ti+TiN) x2	6,5±0,6	4	2,5±0,7	2157±125
(Ti+TiN) x8	6,5±0,7	16	0,3±0,3	2650±201
(Ti+TiN) x3	10,5±1,0	6	3,0±0,8	2864±178
(Ti+TiN) x18	14,5±1,5	36	0,5±0,2	2280±253
(Ti+TiN) x6	16,0±1,7	12	2,4±0,6	2970±142
(Ti+TiN) x28	15,2±2,4	56	0,3±0,2	2140±281
(Ti+Ti*N) x2	6,7±0,4	4	3,0±0,8	1572±93
(Ti+Ti*N) x3	9,2±1,7	6	2,8±0,7	1750±105
(Ti+Ti*N) x4	11,1±1,4	8	2,8±0,6	1800±81
(Ti+Ti*N) x5	14,7±2,2	10	2,5±0,6	2018±97

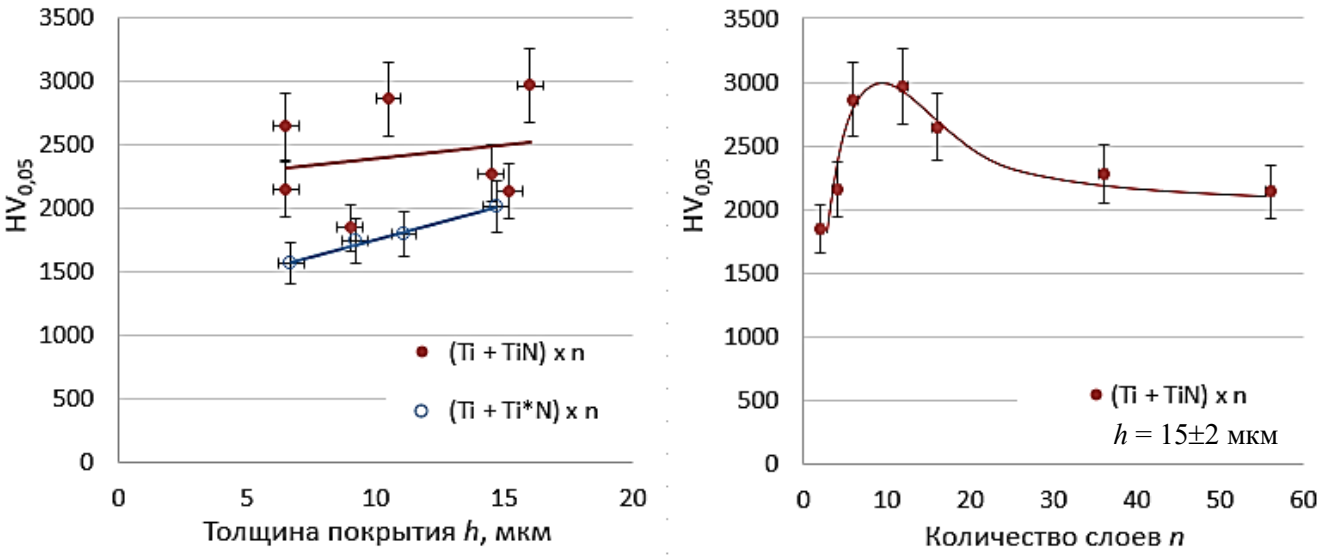
Примечания – 1) Приведены средние значения по пяти точкам; 2) Ti* – псевдо α-сплав ВТ20, легированный: Al – 5,5...7%, Zr – 1,5...2,5%, V – 0,8…2,5%, Mo – 0,5...2%

Таблица 5.19 – Микротвердость многослойных покрытий системы ((V, Ti)+(V, Ti)N)

Покрытие	Толщина h, мкм	Кол-во слоев n	Толщина нитридных слоев h_N, мкм	Микротвердость $HV_{0,05}$
((V,Ti) + (V,Ti)N) x18	11,4±1,2	36	0,3±0,2	2126±183
((V,Ti) + (V,Ti)N) x5	16,1±1,0	10	2,8±0,7	2220±97
((V,Ti) +(V,Ti)N) x3	9,7±1,5	6	2,3±0,8	2265±83
((V,Ti) + (V,Ti)N) x2	6,5±0,5	4	2,6±0,8	2169±58
(Ti + Ti*V) x2	10,9±0,8	4	2,8±0,8	1905±103
(Ti + (V,Ti*)N) x2	9,7±1,1	4	2,5±0,6	1865±153
(Ti + (V,Ti*)N) x2	7,0±0,6	4	2,9±0,7	1734±79

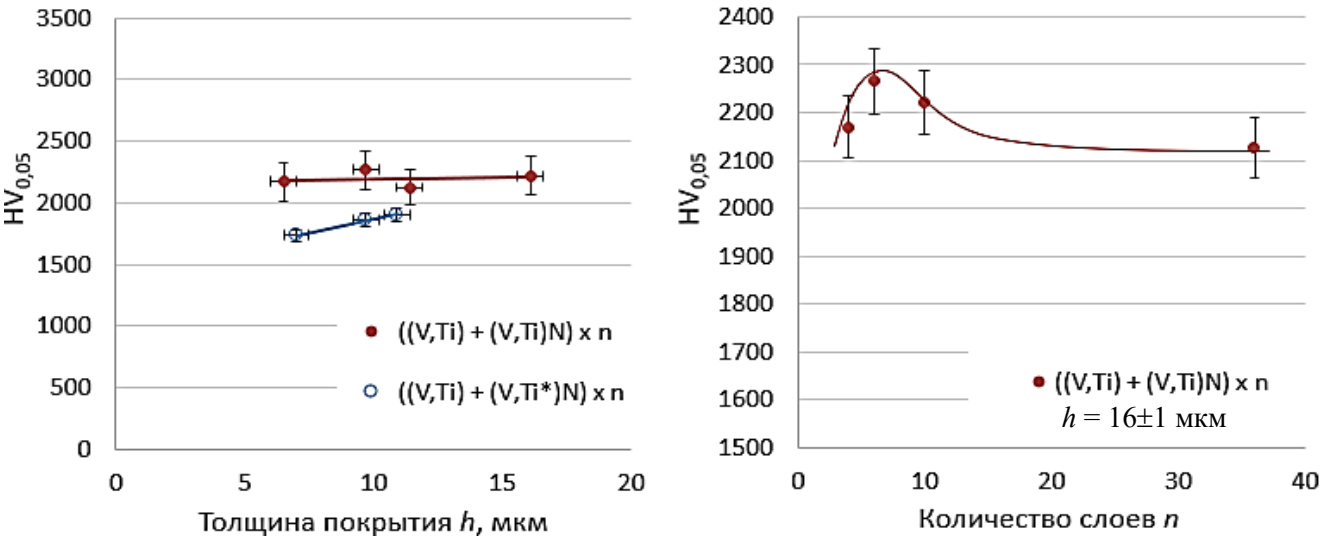
Примечания – 1) Приведены средние значения по пяти точкам; 2) Ti* – псевдо α-сплав ВТ20 (TiAlZrVMo), легированный: Al – 5,5...7%, Zr – 1,5…2,5%, V – 0,8…2,5%, Mo – 0,5...2%

На графиках (Рисунки 5.87 а и 5.88 а) видно, что средняя величина микротвердости многослойных покрытий по мере увеличения их толщины остается на одном уровне или незначительно увеличивается. Наблюдаемый разброс микротвердости покрытий связан в первую очередь с различием в толщине нитридных слоев (h_N) от 0,3 до 10 мкм. На Рисунках 5.87 б и 5.88 б показано, что при увеличении количества слоев (n) величина микротвердости изменяется не линейно, при n = 6...12 она переходит через максимум, а затем асимптотически снижается по мере уменьшения толщины нитридных слоев h_N до 0,3 мкм, что связано с уменьшением их прочности.



а *б*

Рисунок 5.87 – График изменения микротвердости по глубине поверхности многослойного покрытия типа (Ti+TiN) на подложке ВТ6



а *б*

Рисунок 5.88 – График изменения микротвердости по глубине поверхности многослойного покрытия ((V, Ti)+(V, Ti)N) на подложке ВТ6

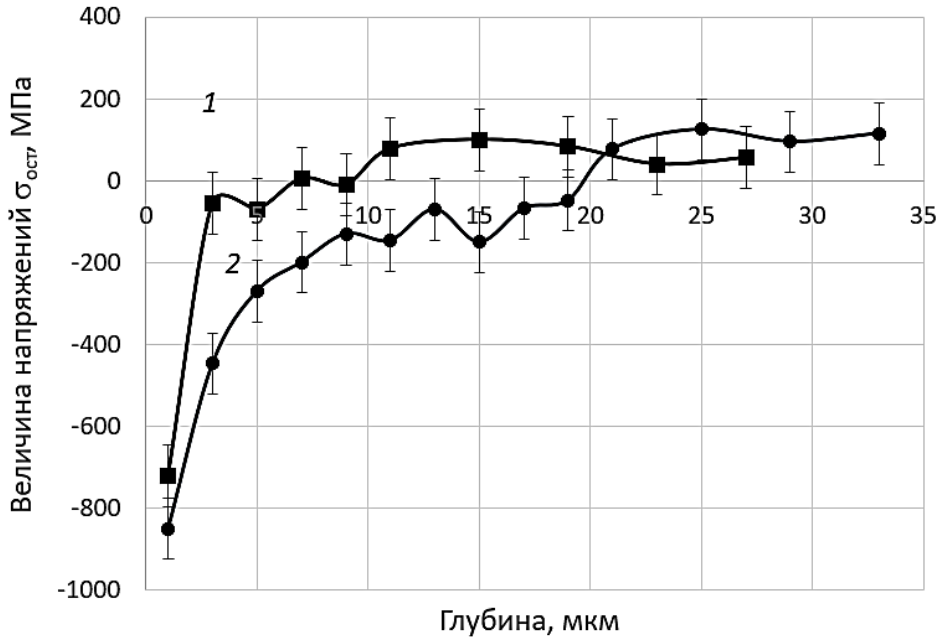
Максимальная величина микротвердости (≈ 3000 HV) наблюдается у многослойных покрытий системы (Ti+TiN) с толщиной промежуточных нитридных слоев h_N ≈ 2,5 мкм, что превышает максимальную микротвердость покрытий ((V, Ti)+(V, Ti)N) на 20...30%. При нанесении покрытий на основе титанового псевдо α-сплава системы Ti-Al-Mo-V (ВТ20) микротвердость получаемых композиций уменьшается на 15…20%, что, вероятно, связано с присутствием в их составе алюминия. При увеличении в исследуемых покрытиях количества слоев $n > 20$ (Рисунки 5.87 б и 5.88 б) при постоянной толщине покрытия, их микротвердость снижается до примерно одинакового уровня 2150±50 HV, что объясняется соответствующим уменьшением толщины нитридных слоев.

5.7 Исследование внутренних остаточных напряжений

Исследование внутренних остаточных напряжений, действующих в поверхности образцов, проводили по методу Н.Н. Давиденкова на установке «Пион» и рентгеновским методом наклонных съемок «$\sin^2\psi$» установке Rigaku Ultima IV. Методы исследования подробно изложены в п. 4.7, глава 4. Результаты исследований приведены на Рисунках 5.89-5.92 и в Таблицах 5.20, 5.21.

На графике (Рисунок 5.89) видно, что проведенная ионная имплантация азота формирует в тонком поверхностном слое глубиной до 2 мкм образцов из титанового сплава ВТ6 значительные остаточные напряжения сжатия $\sigma_{ост}$ = -720 ... -850 МПа, что объясняется формированием в

микроструктуре твёрдых растворов внедрения азота и повышением плотности дислокаций (пункт 5.5.1).



1 – без термообработки; 2 – после термообработки, имитирующей нанесение покрытия: вакуум; T = 450±20 °С; t = 4 ч; остывание в камере

Рисунок 5.89 – Поверхностные остаточные напряжения (по Н.Н. Давиденкову) в образцах из сплава ВТ6 после ионной имплантации азота (доза $D = 2 \cdot 10^{17}$ ион/см^2)

Таблица 5.20 – Результаты замеров поверхностных остаточных напряжений образцов из сплава ВТ6 с многослойными покрытиями (метод наклонных съемок «$\sin^2\psi$»)

№ п/п	Наименование покрытия	Толщина h, мкм	Толщина нитридных слоев h_N, мкм	Кол-во слоев n	Напряжение $\sigma_{ост}$, МПа
1	((V, Ti)+ (V, Ti)N) x2	6,5±0,5	2,6±0,8	4	-1890±70
2	((V, Ti)+ (V, Ti)N) x3	9,7±1,5	2,3±0,8	6	-1620±85
3	((V, Ti)+ (V, Ti)N) x5	16,1±1,0	2,8±0,7	10	-1445±67
4	((V, Ti)+ (V, Ti)N) x18	11,4±1,2	0,3±0,2	36	-876±34

Примечания – 1) Величины остаточных напряжений являются усреднёнными по глубине прохождения рентгеновских лучей ≈ 10 мкм; 2) В расчетах поверхностных напряжений принимались следующие свойства нитридных слоев: E = 256 ГПа и ν = 0,28

Таблица 5.21 – Результаты замеров поверхностных остаточных напряжений образцов из сплава ВТ6 с многослойными покрытиями (метод наклонных съемок «$\sin^2\psi$»)

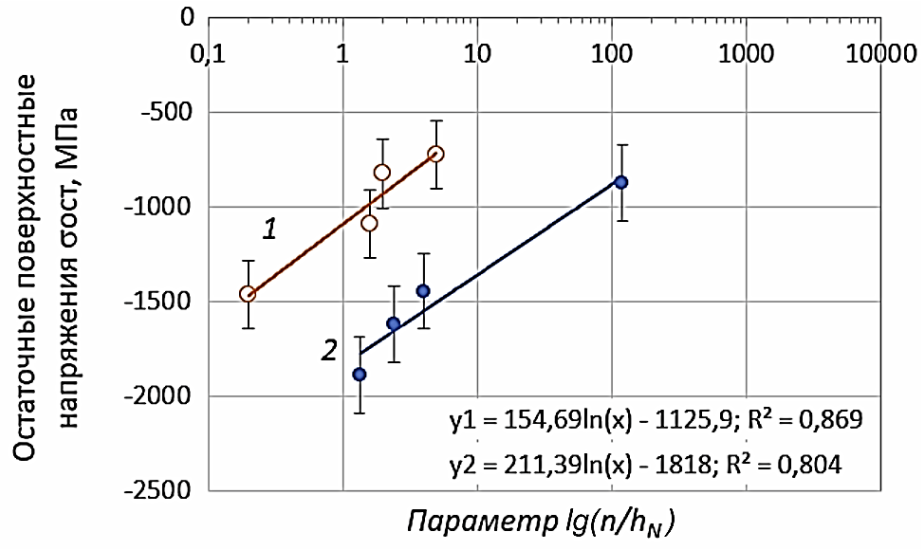
№ п/п	Наименование покрытия	Толщина h, мкм	Толщина нитридных слоев h_N, мкм	Кол-во слоев n	Напряжение $\sigma_{ост}$, МПа
1	Ti+TiN	9,5±1,0	10±1,5	2	-1462±20
2	(Ti+TiN) x2	6,5±0,6	2,5±0,7	4	-1090±50
3	(Ti+TiN) x3	10,5±1,0	3,0±0,8	6	-825±30
4	(Ti+TiN) x6	16,0±1,7	2,4±0,6	12	-725±35

Примечания – 1) Указанные величины остаточных напряжений являются усреднёнными по глубине прохождения рентгеновских лучей ≈10мкм; 2) В расчетах поверхностных напряжений принимались следующие свойства нитридных слоев: E = 320 ГПа и ν = 0,28

При нанесении на поверхность образцов из сплава ВТ6 многослойных ионно-плазменных покрытий систем (Ti+TiN) и ((V,Ti)+(V,Ti)N) толщиной от 6 до 16 мкм в них формируются остаточные напряжения сжатия величиной от минус 800 до минус 2000 МПа вследствие различия коэффициентов теплового расширения материала покрытий и основного материала образцов. Подробнее о процессах формирования остаточных напряжений в многослойных покрытиях изложено в пункте 2.1, глава 2.

Установлено, что остаточные напряжения в покрытии изменяются по логарифмическому закону в зависимости от параметра, равного отношению количества (n) к толщине нитридных слоев (h_N) (Рисунок 5.90), оставаясь при этом постоянно в области сжатия. Таким образом, полученные результаты подтверждают сделанные теоретические предположения о влиянии толщины и количества промежуточных слоев на величину поверхностных остаточных напряжений.

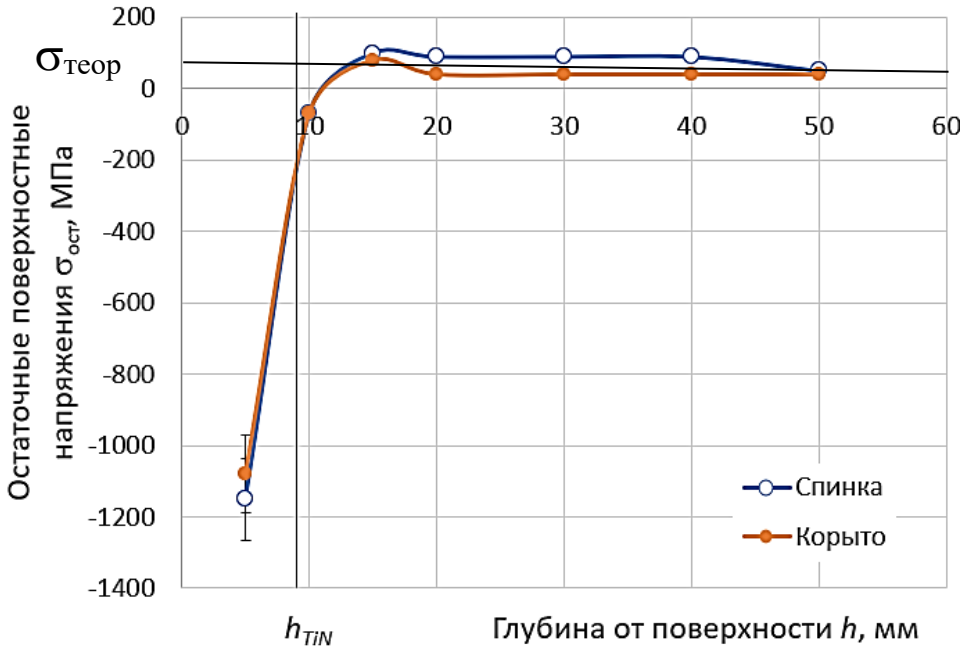
Для исследования поверхностных остаточных напряжений исследуемых покрытий на реальных деталях был вырезан образец из рабочей лопатки последней ступени паровой турбины из титанового сплава ВТ6 с нанесенным покрытием (Ti+TiN) толщиной h_{TiN} = 7...10 мкм. Остаточные напряжения были исследованы по методу Н.Н. Давиденкова на установке «Пион», результаты приведены на Рисунке 5.91. Установлено, что в покрытии действуют остаточные напряжения сжатия ($\sigma_{ост}$) от минус 1150 до минус 1080 МПа, переходящие в растягивающие напряжения по глубине основного материала. Максимальные растягивающие напряжения, действующие в основном материале величиной $\sigma_{ост}$ = 80...100 МПа, наблюдаются на глубине ≈10 мкм и далее уменьшаются до величины $\sigma_{ост}$ = 50...90 МПа, что подтверждает теоретический уровень остаточных напряжений ($\sigma_{теор}$), полученный по установленной ранее теоретической зависимости (2.2), пункт 2.1, глава 2.



1 – (Ti+TiN)·*n*; *2* – ((V, Ti)+(V, TiN))·*n*

n – количество слоев; h_N – толщина нитридных слоев, мкм

Рисунок 5.90 – График изменения поверхностных остаточных напряжений в многослойных покрытиях



$\sigma_{теор}$ – теоретический уровень остаточных напряжений в основном материале

Рисунок 5.91 – Распределение поверхностных остаточных напряжений (по Н.Н.Давиденкову) по глубине поверхностного слоя образцов, вырезанных из рабочей лопатки паровой турбины из сплава ВТ6 с нанесенным покрытием (Ti+TiN) толщиной $h \approx 10$ мкм

Необходимо отметить, что на расстоянии h_{TiN} от поверхности, на границе «покрытие – основной материал», гарантированно действуют напряжения сжатия, что связано с предварительной обработкой поверхности ионной имплантацией азота, формирующей в обработанной поверхности остаточные напряжения $\sigma_{ост}$ = -900...-700 МПа, как это показано на Рисунке 5.89. Полученные результаты исследования поверхностных остаточных напряжений одинаковы для как для образцов, вырезанных со стороны спинки, так и со стороны корыта пера лопатки, что свидетельствует о равномерности свойств нанесенного покрытия по всей площади детали.

5.8 Инструментальное индентирование

Испытание проводили алмазным полусферическим инденторомтипа Роквелл, с радиусом 20 мкм и углом при вершине 120º, в прямом и в обратном направлениях. Материал индентора – синтетический алмаз с модулем Юнга E_{ind} = 1140 ГПа. При испытаниях в прямом направлении нагрузка на индентор прикладывалась линейно от 0,03 до 30 Н, при этом регистрировали зависимость глубины проникновения индентора от прилагаемой нагрузки, что соответствует условиям упругопластической деформации материала поверхности. Скорость приложения нагрузки – 10 Н/мин. В обратном направлении на индентор прилагалась минимальная величина нагрузки 0,03 Н, что позволило определить остаточную глубину пластической деформации поверхности, после ее упругого восстановления. В результате анализа экспериментальных зависимостей глубины деформации от приложенной нагрузки были определены критические нагрузки:

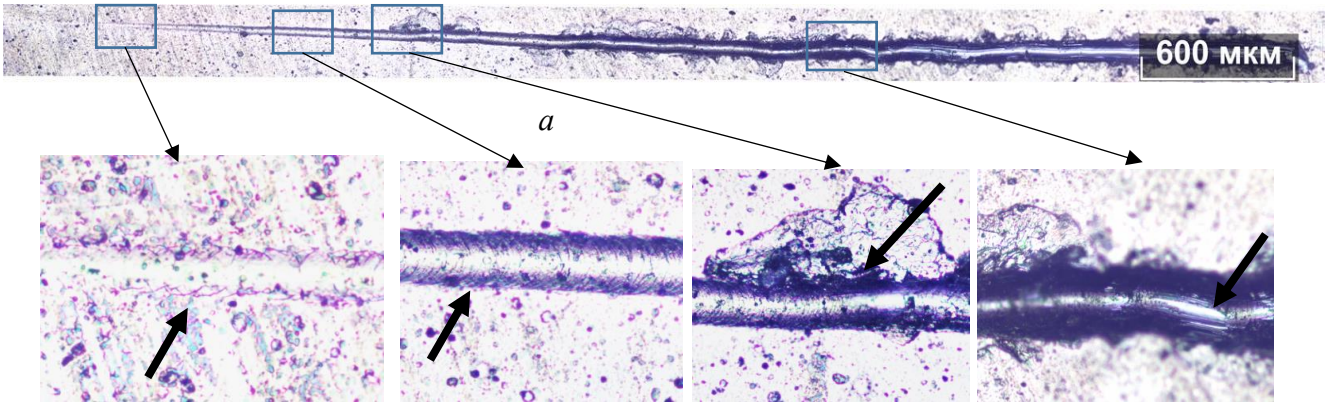
а) начала разрушения покрытия (*Lc1*, Н);

б) полного удаления покрытия с подложки (*Lc2*, Н).

На основе теории контактного взаимодействия и третьей теории прочности по полученным экспериментальным данным были построены механические кривые, определены области упругого и упругопластического контакта, определены критические нагрузки (*Lc*), рассчитаны максимальные контактные давления (p_{max}) и эквивалентные модули упругости (E^*) для различных вариантов покрытий. Подробнее о методике инструментального индентирования и определения характеристик прочности изложено в п. 4,12, глава 4.

Варианты исследованных покрытий и результаты испытаний приведены в Приложении Е и Таблицах 5.22, 5.23. В результате испытания на поверхности образцов образуется царапина, на которой можно выделить три характерные области (Рисунок 5.92). Область упругих деформаций характеризуется полным восстановлением деформированного материала без образования поверхностных дефектов, что отражается на графике замеров (Приложении Е) в виде нулевого уровня акустической эмиссии. При увеличении нагрузки на индентор наблюдается область упру-

гопластических деформаций, характеризуемая образованием дефектов в виде кольцевых «*герцевских*» трещин (Рисунок 5.93 б, в).



а – царапина; *б* – начало области пластической деформации, образование первых трещин; *в* – кольцевые трещины по всей деформированной поверхности; *г* – образование первого хрупкого скола и отслоения покрытия при нагрузке *Lc1*; *д* – место полного удаления покрытия с подложки при нагрузке *Lc2*

Места разрушения показаны утолщенными стрелками

Рисунок 5.92 – Испытание методом царапания алмазными наконечниками типа Роквелл

Таблица 5.22 – Варианты многослойных покрытий типа (Ti + TiN)

Вариант покрытия[1]	Толщина покрытия h, мкм	Толщина нитридных слоев h_N, мкм	Кол-во слоев n	Макс. контакт. нагрузка p_{max}, ГПа	Критическая нагрузка *Lc1* /*Lc2*, Н	Эквивалентный модуль упругости E^*, ГПа
1	2	3	4	5	6	7
Ti + TiN	3,1±0,5	2,5±0,2	2	7,8	2,9 / 3,2	369
Ti + TiN	6,2±0,5	5,7±0,2	2	11,1	4,2 / 5,9	352
(Ti + TiN) x2	6,7±0,4	3,0±0,8	4	12,5	1,5 / 10,2	258
(Ti + TiN) x5	16,0±1,7	2,5±0,6	10	18,4	2,4 / 4,7	388
(Ti + Ti*N) x4	11,2±1,5	2,0±0,2	8	16,5	1,5 / 7,5	321
(Ti + Ti*N) x18	10,8±1,2	0,5±0,2	36	14,6	1,7 / 8,6	230
(Ti + Ti*N) x6	15±1,3	2,1±0,2	12	19,2	1,16 / 4,7	232
(Ti + Ti*N) x23	13,8±1,2	0,5±0,2	46	16,7	1,5 / 7,1	352
(Ti + Ti*N) x2	5,5±0,5	2,2±0,2	4	6,4	1,4 / 2,2	237

Окончание таблицы 5.22

1	2	3	4	5	6	7
(Ti + Ti*N) x8	7,6±0,5	0,6±0,2	16	9,1	1,7 / 11,1	222

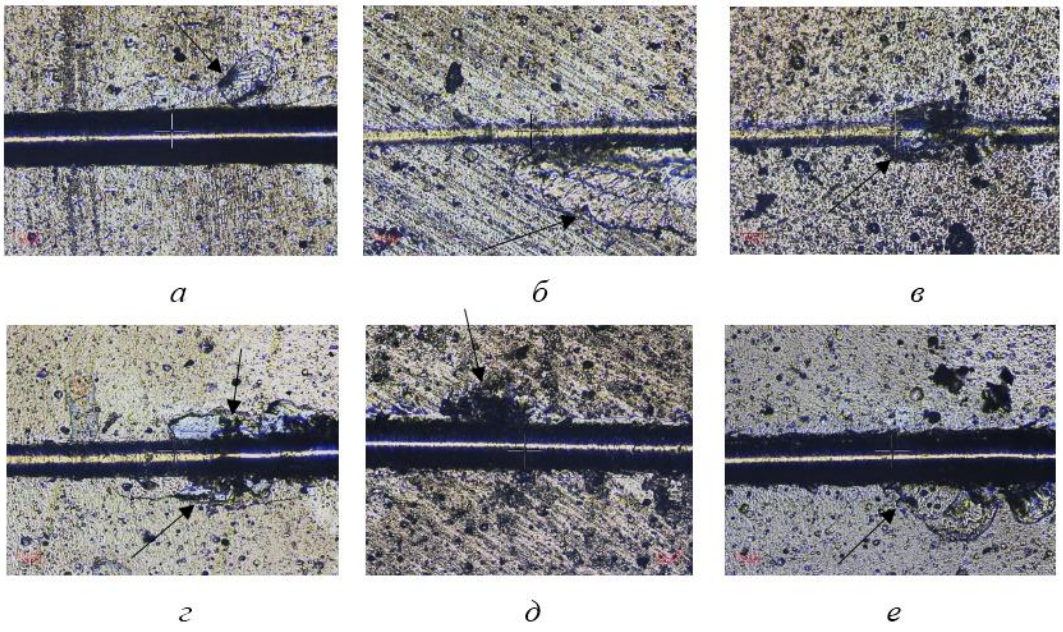
Примечания – 1) Ti - α-сплав ВТ1-0, Ti* – псевдо α-сплав ВТ20 (TiAlZrVMo), V – сплав ВнМ-1, множитель «х» указывает количество пар слоев; 2) *Lc1* – критическая нагрузка возникновения первого скола покрытия, *Lc2* – критическая нагрузка полоного удаления покрытия с подложки

С увеличением нагрузки по мере царапания отдельные трещины объединяются в более протяженные, которые располагаются вдоль царапины или под углом ≈ 45° к ней в направлении движения индентора. В некоторый момент времени, при достижении прилагаемой нагрузкой критической величины *Lc1*, происходит разрушение части покрытия в виде хрупкого скола, как показано на Рисунках 5.92 и 5.93.

На графике момент начала разрушения проявляется в виде резкого (импульсного) изменения уровня акустической эмиссии и глубины индентирования. При дальнейшем увеличении нагрузки до величины *Lc2* наступает момент полного разрушения покрытия и его удаления с поверхности подложки (Рисунки 5.92 и 5.94). В месте полного разрушения хорошо просматриваются поверхность основного материала более светлого цвета с характерными следами пластической деформации в виде рисок и бороздок. Величины критических нагрузок образования первого видимого скола покрытия (*Lc1*) и полного удаления покрытия с подложки (*Lc2*) для всех исследованных вариантов покрытий приведены в Таблицах 5.22 и 5.23.

Таблица 5.23 – Варианты многослойных покрытий типа ((V, Ti) + (V, Ti)N)

Вариант покрытия	Толщина покрытия h, мкм	Толщина нитридных слоев h_N, мкм	Кол-во слоев n	Макс. контакт. нагрузка p_{max}, ГПа	Критическая нагрузка *Lc1* /*Lc2*, Н	Эквивалентный модуль упругости E^*, ГПа
((V,Ti) + (V,Ti)N) x18	11,4±1,5	0,5±0,2	1	18,3	4,4 / 15,2	220
((V,Ti) + (V,Ti)N) x5	16,1±1,0	2,8±0,7	1	19,6	3,2 / 12,1	306
((V,Ti) + (V,Ti)N) x3	9,7±1,5	2,3±0,8	1	21,7	4,2 / 8,7	345
((V,Ti) +(V,Ti)N) x2	10,7±1,5	5,2±0,2	1	20,9	4,1 / 7,1	339
((V,Ti) + (V,Ti)N) x2	6,8±1,5	3,5±0,2	0,6	14,9	3,2 / 7,6	455
((V,Ti) + (V,Ti)N) x2	6,2±1,0	2,5±0,2	1	14,8	7,6 / 13,2	335
((V,Ti) + (V,Ti)N) x2	6,4±1,0	3,5±0,2	1,6	14,8	8,5 / 15,4	228
((V,Ti) + (V,Ti*)N) x2	7,1±1,5	3,5±0,2	0,6	15,1	3,6 / 11,5	347
((V,Ti) + (V,Ti*)N) x2	7,8±1,5	2,5±0,2	1	13,0	4,8 / 9,8	265
((V,Ti) + (V,Ti*)N) x2	5,3±1,0	3,5±0,2	1,6	13,2	5,7 / 8,8	203

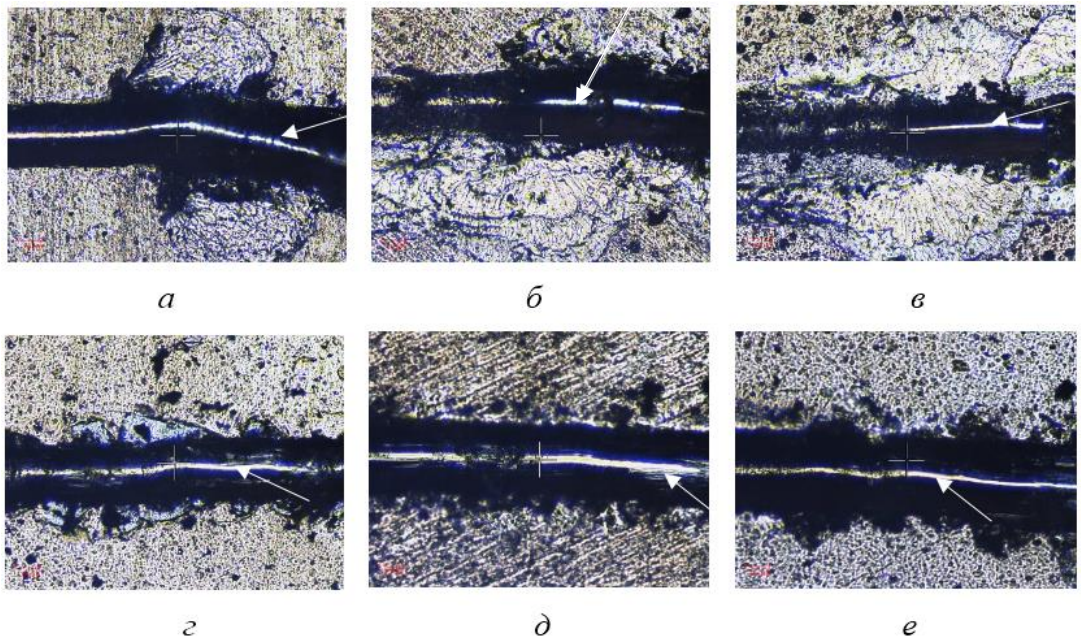


а – n = 18; *б – n* = 5*; в – n = 3; д, е – n* = 2*;*

а, б, в, д – V:Ti = 1 вес.%; *г* –V:Ti = 0,6 вес.%; *е* –V:Ti = 1,6 вес.%

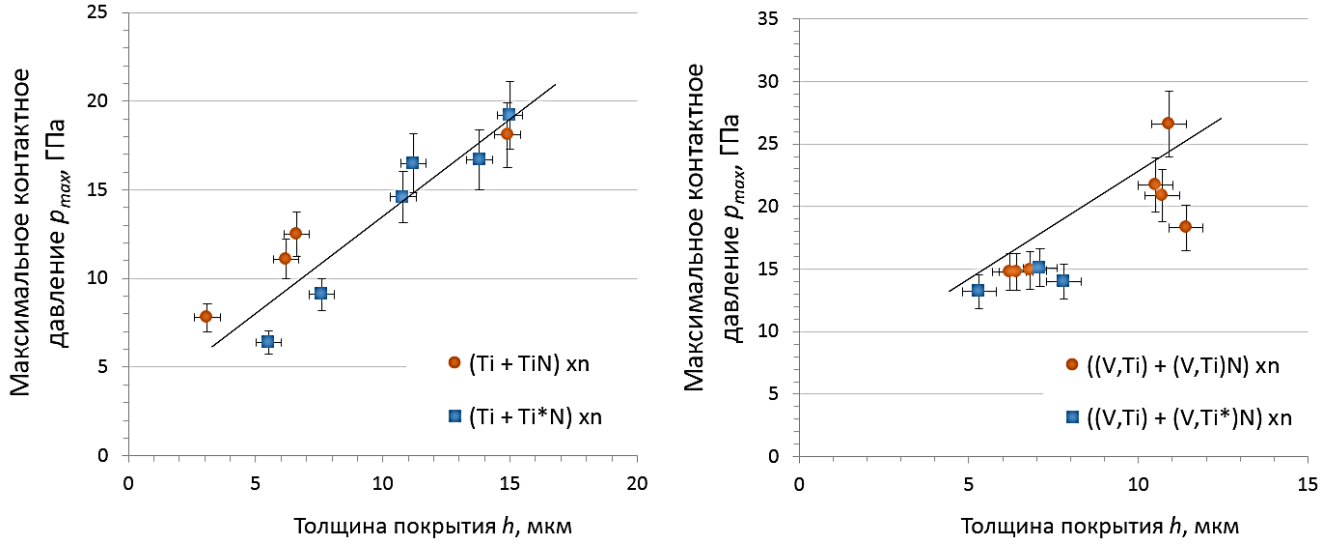
Стрелками показаны места скола покрытия

Рисунок 5.93 – Начало разрушения многослойного покрытия ((V, Ti)+(V, Ti)N) при нагрузке *Lc1*



Обозначения приведены в соответствии с Рисунком 5.95

Рисунок 5.94 – Окончательное разрушения многослойного покрытия ((V, Ti)+(V, Ti)N) при нагрузке *Lc2*



а *б*

Рисунок 5.95 – Зависимость максимальной контактной нагрузки до разрушения от толщины многослойных покрытий

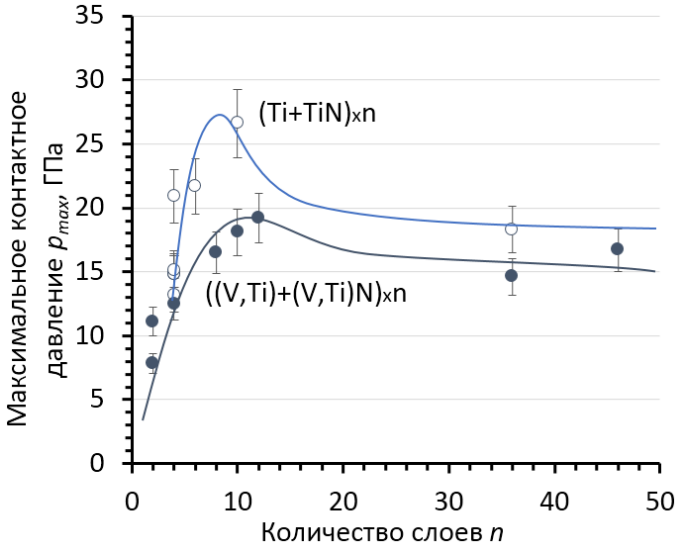
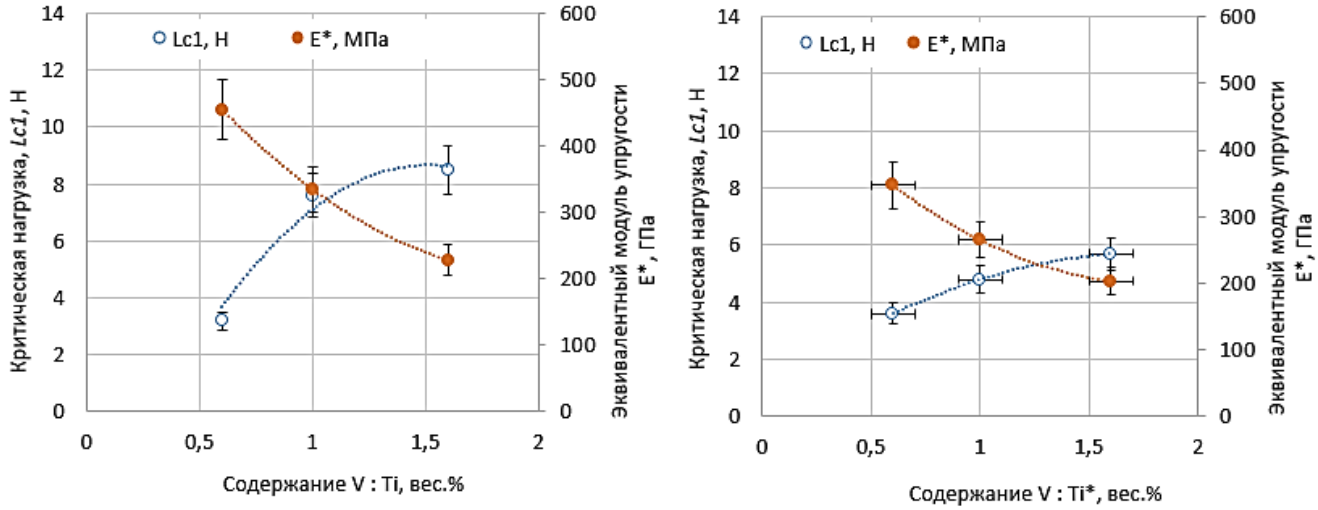


Рисунок 5.96 – Зависимость максимальной контактной нагрузки до разрушения от количества слоев многослойных покрытий, h = 14±3 мкм

В результате проведенных исследований были построены графики зависимости контактной нагрузки от толщины покрытия (Рисунки 5.95 и 5.96), которые позволяют установить следующие. При увеличении количества слоев (n) в исследуемых покрытиях величина максимальной контактной нагрузки (p_0) увеличивается до n = 6…10, переходит через максимум

и, далее, асимптотически снижается по мере уменьшения толщины нитридных слоев (*h*). Полученные кривые совпадают с полученными ранее зависимостями микротвердости от количества слоев исследуемых покрытий (Рисунки 5.87 и 5.88), что подтверждает достоверность полученных результатов.

Анализ данных, приведенных на Рисунке 5.97 и в Таблице 5.23 позволяет утверждать, что с увеличением содержания ванадия в покрытии при его совместном напылении как с технически чистым α-титаном (сплав ВТ1-0, содержание Ti ≈ 99,3 вес.%), так и с легированным псевдо-α сплавом ВТ-20 (содержание Ti более 85,1 вес.%), наблюдается уменьшение эквивалентного модуля упругости (*E**) на 40...50% при увеличении максимальной контактной нагрузки (p_o) и критической нагрузки образования первого скола (*Lc1*).



а *б*

а – ((V, Ti)+(V, Ti)N); *б* – ((V, Ti)+(V, Ti*)N)

Ti – α-Ti сплав; Ti* – псевдо α-Ti сплав ВТ20 системы Ti-Al-Zr-Mo-V

Рисунок 5.97 – Влияние содержания ванадия на прочностные свойства многослойных покрытий типа

Сравнивая характер разрушения покрытий с различным содержанием ванадия (Рисунки 5.93 г, д, е и Рисунки 5.94 г, д, е), можно отметить, что при наименьшем содержании ванадия разрушение сопровождается образованием множественных трещин и хрупким отслоением покрытия от подложки. С увеличением содержания ванадия количество и протяженность трещин визуально уменьшается, разрушение приобретает локальный когезионный характер, без заметного отслоения от подложки. На основании этого можно предположить, что увеличение содержания ванадия в покрытии способствует увеличению его прочности при индентировании, то есть

при прочих равных условиях разрушение покрытия наступает при большей нагрузке *Lc1* и большей глубине внедрения индентора без образования видимых трещин.

5.9 Выводы по главе 5

1 При принятых условиях испытаний на газоабразивный износ в соответствии с ГОСТ 23.201-78 (угол атаки 60°, частота вращения центрифуги 9500 об/с, абразивный материал – электрокорунд белый F-280, диаметр частиц 0,04 мм), наибольшую эрозионную стойкость показали многослойные нитридные покрытия на основе титана (сплав ВТ1-0) со следующими добавочными материалами (по мере возрастания износостойкости): цирконий (сплав Э-110, 98,8 вес.% Zr), псевдо-α титановый сплав ВТ-20 (Ti-7Al-2Mo-2,5V-2,5Zr) и ванадий (сплав ВнМ-1, 99,9 вес.% V). Покрытия с добавлением стеллита (сплав В3К, Co+WC), никелевого сплава СДП1 (Ni-20Co-20Cr-12Al) и алюминиевых сплавов различного химического состава показали неудовлетворительную износостойкость, меньшую основного материала образцов, и из дальнейших испытаний были исключены.

2 Экспериментально установлено, что газоабразивный износ многослойных покрытий с одинаковым химическим составом, но различной структурой, в областях начального и нормального износа протекает с равной скоростью, которая, очевидно, определяется совокупностью выбранных материалов покрытия и не зависит от конструкции покрытия, количества слоев и их толщин. Конструкция покрытия, в свою очередь, определяет долговечность образцов при установившейся скорости износа, которая выражается в длительности испытания или в количестве использованного абразива до полного удаления покрытия с подложки.

Наибольшей износостойкостью характеризуются многослойные покрытия с толщинами нитридных слоев h_N = 2,2...3,0 мкм, превышающими критическую величину $h_N^* \approx 1{,}0$ мкм, которая была определена теоретически, при моделировании ударного воздействия абразивных частиц. При этом максимальную износостойкость при прочих равных условиях проявило десятислойное титан-ванадиевое нитридное покрытие ((V, Ti) + (V, Ti)N)x5 с толщиной нитридных слоев h_N = 2,5 мкм, где было нанесено наибольшее количество пар нитридных и металлических слоев. Величина его относительной износостойкости, определенная в соответствии с методикой расчета по ГОСТ 23.201-78, для принятых режимов испытаний составила $\xi = 12{,}3$.

3 При микроскопических исследованиях установлено, что разрушение многослойных ионно-плазменных покрытий при газоабразивном износе происходит за счет возникновения в нитридных слоях хрупких трещин. При этом наличие в покрытии более мягких металлических прослоек является эффективным барьером для их распространения. В этой связи для увеличения

стойкости к изнашиванию при прочих равных условиях, количество слоев в покрытии должно быть возможно максимальным.

4 Нанесением многослойных ионно-плазменных покрытий может быть одновременно реализовано два механизма повышения стойкости к газоабразивному износу: сопротивление к появлению хрупких трещин и сдерживание их дальнейшего развития. Для этого необходимо выполнить следующие условия:

а) твердость материала покрытий должна гарантировано превышать твердость абразивных частиц;

б) толщина основных нитридных слоев покрытия h_N должна превышать некоторую критическую величину, связанную с ударной нагрузкой абразивных частиц. При принятых условиях испытаний на газоабразивный износ толщина нитридных слоев должна превышать $h_N \geq 2{,}5$ мкм. Выполнение этого условия ограничивает область ударных нагрузок в объеме только внешнего нитридного слоя и, таким образом, ограничивает область появления первичных микротрещин.

5 Экспериментально установлена линейная зависимость относительной износостойкости многослойных покрытий при каплеударной эрозии от величины коэффициента изоляции упругих волн (D, дБ), что подтверждает теоретические предположения о том, что повышение твердости и прочности адгезии является необходимым, но недостаточным требованием для обеспечения износостойкости. Наиболее стойкими к капельноударной эрозии будут те покрытия, которые, являясь изначально достаточно прочными для сдерживания внешней нагрузки, способны максимально полно рассеивать упругую деформацию, возникающую при ударном воздействии.

Максимальную износостойкость при выбранных условиях испытаний (водяные капли диаметром 0,82 мм и скоростью удара $C_{уд}$ = 250 м/с) показало двадцатислойное покрытие (Ti+TiN)x10 с толщиной нитридных слоев $h_N = 2{,}8$ мкм. Его относительная эрозионная стойкость, определенная по принятой методике проведения испытаний, составила $\zeta = 2{,}89$ при максимальной величине коэффициента изоляции упругой волны D = 18,1 дБ.

6 Экспериментально установлено, что многослойные ионно-плазменные покрытия Ti+TiN являются стойкими к фреттинг-износу титанового сплава ВТ6 при выбранных режимах испытания: контактное давление p = 10 МПа (1 кгс/мм^2), амплитуда взаимного смещения $2A_m = 0{,}1$ мм, частота $f = 50$ Гц, база испытания $N = 2 \cdot 10^5$ циклов. Установлена линейная зависимость величины износа при фреттинге от количества слоев в покрытии Ti+TiN в диапазоне их толщин от 7 до 20 мкм и количества слоев от 2 до 20.

7 Установлен механизм изнашивания титанового сплава ВТ6 с многослойными ионно-плазменными покрытиями типа Ti+TiN при фреттинге. В местах максимального проскальзывания контактных поверхностей происходит механический износ верхнего слоя нитрида титана,

после чего в зону трения из нижележащего слоя покрытия поступает титан, который, окисляясь, выступает в качестве твердой смазки и обеспечивает износостойкость нижележащих нитридных слоев.

8 При испытании на изнашивание во влажной среде при режимах: контакное давление p = 10 МПа (1 кгс/мм^2) при постоянной линейной скорости вращении подвижного образца v = 0,1 м/с, экспериментально установлено, что последовательное нанесение покрытий карбида вольфрама ВК25 (WC+Co (30%)) и нитрида титана (Ti+TiN) общей толщиной до 0,18 мкм может многократно (более чем в 10 раз) повысить износостойкость титанового сплава ВТ6. При этом многослойное покрытие Ti+TiN обеспечивает приработку контактных поверхностей, которая сопровождается практически нулевой потерей массы в течение первых трех часов испытания, обеспечивает формирование гладкой площадки фактического контакта и минимальную скорость износа покрытия 0,9 мкм/ч в области трения.

9 При усталостных испытаниях образцов из сплава ВТ6, проведенных методом «Лестницы» в соответствии с методикой ОСТ 1 00303-79 «Лопатки газотурбинных двигателей. Периодические испытания на усталость», база испытания $N = 2 \cdot 10^7$ циклов, установлено, что проведенная ионная имплантация азота увеличивает предел выносливости образцов (σ_{-1}) после полирования до 26%. Это может выть связано с дислокационным упрочнением поверхности ионами азота и формированием в ней остаточных напряжений сжатия, что подтверждается экспериментально.

Последующее нанесение ионно-плазменных покрытий на основе титана, ванадия и их нитридов общей толщиной до 31,5 мкм приводит к некоторому снижению усталости. Экспериментально установлена линейная зависимость изменения относительной величины предела выносливости от толщины наносимого покрытия. Наиболее вероятной причиной изменения предела выносливости являются остаточные напряжения, возникающие в поверхности основного материала вследствие нанесения ионно-плазменных покрытий, что подтверждается экспериментально.

10 Эксперементально установлено, что последовательное упрочнение лопаток компрессора газотурбинных двигателей из сплава ВТ6 путем ионной имплантации (доза $D = 2 \cdot 10^{17}$ ион/см$^{-2}$) и нанесения десятислойного ионно-плазменного покрытия на основе титана и его нитридов, легированного Al, Zr, V, Mo общей толщиной 11…15 мкм в одном вакуумном объеме обеспечивает увеличение предела выносливости рабочих лопаток КНД из сплава ВТ6 на $\Delta\sigma_{-1}$ = 9% (с 411 до 448 МПа).

11 При фрактографических исследованиях лопаток в области усталостной трещины установлено, что излом материала с покрытием хрупкий с наличием характерных усталостных линий и зоны долома. При разрушении поверхности трещина распространяется преимущественно вдоль

пластичного Ti или (V, Ti) слоя, по границе с ниже лежащим нитридным слоем, образуя характерные ступеньки, без перехода трещины в основной металл.

12 Установлено, что ионная имплантация азота с последующей термической обработкой (доза $D = 2 \cdot 10^{17}$ ион/см$^{-2}$; термообработка: $T = 450 \pm 20$ °С; $t = 4$ ч; вакуум) позволяет увеличить микротвердость материала поверхности на 40%, с 420 до 585 $HV_{0,01}$. Наибольший прирост микротвердости (более 10%) наблюдается в поверхностном слое толщиной до 500 нм, при этом эффект от упрочнения сохраняется до глубины ≈ 1000 нм. Наблюдаемое увеличение глубины упрочнения поверхности может быть связано с диффузией азота, повышением плотности дислокаций и перестройкой исходной микроструктуры материала в результате известного «эффекта дальнодействия».

13 В результате проведения ионной имплантации азота и термообработки по выбранным режимам субструктура сплава ВТ6 претерпевает существенные изменения. Рентгеноструктурным анализом было обнаружено заметное уменьшение размеров области когерентного рассеивания, с 93 до 42 нм, сопровождаемое многократным увеличением общей плотности дислокаций с $5{,}0 \cdot 10^{12}$ до $1{,}7 \cdot 10^{14}$ м$^{-2}$ вследствие ударного воздействия ионов азота с высокой кинетической энергией и протекающей радиационно-стимулированной диффузии легируемых частиц с формированием твёрдых растворов внедрения. Изменение субструктуры при этом сопровождается возникновением в поверхности значительных внутренних напряжений $\sigma_{ост} \approx$ -700...-850 МПа.

14 Многослойное покрытие Ti+TiN общей толщиной $h = 16{,}0 \pm 1{,}7$ мкм, нанесенное на ионно-модифицированную поверхность образца из сплава ВТ6, представляет собой трехфазную систему, состоящую из двух нитридных фаз титана: δ-нитрид (TiN), ε-нитрид (Ti_2N) с включениями α-Ti. Включения α-Ti имеют гексагональную решетку с периодами $a = 2{,}950$ Å, $c = 4{,}683$ Å и плотностью $\rho = 4{,}506$ г/см^3. Нитриды титана характеризуются плотной микрокристаллической структурой размерами от 80 до 140 нм в которой наблюдаются тонкие дислокационные сетки высокой плотности и микропористость размером до 10...15 нм, которая может являться эффективным барьером движения дислокаций, и, как следствие, обеспечивать дополнительное упрочнение покрытия. Величина микротвердости этого покрытия составляет 2970±142 $HV_{0,05}$; величина остаточных напряжений $\sigma_{ост}$ = -795±35МПа; максимальная контактная нагрузка $p_{max} = 19{,}2$ ГПа и эквивалентный (контактный) модуль упругости $E^* = 232$ МПа, определенные инструментальным индентированием алмазным наконечником Роквелла с радиусом 20 мкм.

Дополнительных фаз, связанных с наличием в материале покрытия легирующих элементов: Zr, Al, V, Mo, не выявлено, что может свидетельствовать об их полном растворении с образованием твердых растворов внедрения, о чем косвенно свидетельствует уширение пиков нитридных фаз.

15 Многослойное покрытие (V, Ti)+(V, Ti)N общей толщиной h = 16,1±1,0 мкм, нанесенное на ионно-модифицированную поверхность образца из сплава ВТ6, представляет собой плотную микрокристаллическую двух фазную структуру нитрида титана размером ≈ 120 нм и нитрида ванадия размером ≈ 50 нм, в которых имеются тонкие дислокационные сетки высокой плотности. Величина микротвердости многослойного покрытия (V,Ti)+(V,Ti)N составляет 2220±97 $HV_{0,05}$; величина остаточных напряжений $\sigma_{ост}$ = -1245±67МПа; максимальная контактная нагрузка p_{max} = 21,7 ГПа и эквивалентный (контактный) модуль упругости E^* = 345 ГПа, определенные инструментальным индентированием алмазным наконечником Роквелла с радиусом 20 мкм.

16 Установлено, что при нанесении в среде реакционного газа (азота) нитридных слоев покрытия (V, Ti)+(V, Ti)N в результате протекания плазмохимических реакций на обрабатываемой поверхности образуются твердые растворы внедрения азота в кристаллическую решетку титана и ванадия, преимущественно соответствующие нитридным фазам: δ-TiN (55,4 отн.%) и VN (20,2 отн.%), что подтверждается рентгеноструктурными исследованиями. Частицы фаз VN, возникающие матрице TiN, являются эффективными барьерами для механизма пластической деформации нитридных слоев покрытия. Таким образом, наравне с твердорастворным упрочнением слоев титана (β-Ti,V), в нитридных слоях покрытия реализуется дисперсионный механизм упрочнения (в соответствии с классификацией академика А.А. Бочвара). Особенностью дисперсионного механизма упрочнения является то, что из-за различия решеток фаз TiN и TiV формируются некогерентные границы с переходной зоной, соответствующими ей зернограничными дислокациями и полями напряжений, что обусловливает повышение уровня механических и прочностных свойств покрытия.

17 Экспериментально установлены зависимости изменения остаточных поверхностных напряжений от толщины их количества нитридных слоев многослойных покрытий Ti+TiN и (V, Ti)+(V, TiN) в диапазоне от минус 700 до минус 1470 МПа.

ГЛАВА 6
УПРОЧНЕНИЕ РАБОЧИХ ЛОПАТОК ПАРОВЫХ ТУРБИН И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

6.1 Основные требования к упрочнению лопаток газовых и паровых турбин

Процессы упрочнения поверхности лопаток газовых и паровых турбин путем нанесения ионно-плазменных защитных покрытий относятся к финишным отделочным операциям, не предполагающим дальнейшей механической обработки, и выполняется, как правило, на окончательно готовых деталях. Основные требования к упрочнению лопаток указывают в технических требованиях чертежа, технических условиях на обработку. В процессе разработки новых способов нанесения ионно-плазменных покрытий на титановые лопатки газовых и паровых турбин совместно с ОКБ «Мотор» ПАО «ОДК-УМПО» и СКБ «Турбина» АО «Силовые машины-ЛМЗ» были сформулированы следующие требования.

Упрочняющая обработка рабочих и направляющих лопаток не должна снижать механические и усталостные свойства основного металла, что подтверждается соответствующими лабораторными и натурными испытаниями. Заданная величина предела выносливости при нанесении многослойных ионно-плазменных покрытий обеспечивается предварительной ионной модификацией материала поверхности (имплантацией азота). Микротвердость упрочненной поверхности должна быть не менее 1200 $HV_{0,05}$ при толщине покрытия – от 5 до 25 мкм. Нанесенное покрытие не должно иметь трещин, сколов, отслоений, до основного материала. Не допускается попадание материала покрытия на базовые поверхности хвостовика, влияющее на точность установки лопатки в паз диска. Упрочняющая обработка не должна приводить к изменению формы (короблению) детали, превышающей допуски на геометрические размеры.

Общими требованиями к функциональным свойствам покрытий являются: стойкость к газоабразивному износу – не менее 2,5 раз; стойкость к капельноударной эрозии (для лопаток паровых турбин последних ступеней ЦНД) – не менее чем в 1,5 раза; стойкость к фреттинг-коррозии бандажных или антивибрационных полок – не менее чем в 2 раза, что в совокупности обеспечивает увеличение долговечности деталей на один межремонтный период.

Технологический процесс нанесения защитных покрытий на лопатки газовых и паровых турбин должен предусматривать выполнение следующих операций и переходов:

а) входной контроль поступающих деталей и основных расходных материалов;

б) подготовка деталей к упрочнению проведением ультразвуковой очистки и обезжириванием органическими растворителями;

в) комплексная операция ионно-плазменного упрочнения, включающая в себя ионную

очистку поверхностей деталей от окислов, ионную модификацию (легирование) потоком заряженных частиц, ионный нагрев, осаждение многослойного покрытия, термообработку, например, постимплантационный отжиг;

г) визуальный и измерительный контроль упрочненных деталей;

д) разрушающий контроль образцов-свидетелей, обрабатываемых совместно с деталями, с целью определения макроструктуры, толщины и химического состава нанесенного покрытия;

е) специальный контроль образцов на подтверждение прочностных и механических свойств, например, микротвердости, адгезионной прочности, величины остаточных напряжений, временного сопротивления (предела прочности), предела выносливости и других свойств.

Для повышения класса чистоты поверхности, скругления острых кромок, заусенец, удаления поверхностных дефектов в виде рисок, следов режущего инструмента и, как следствие, увеличения адгезионной и усталостной прочности, в качестве подготовительной операции может применяться электролитно-плазменное полирование (ЭПП) лопаток [264, 265].

Обеспечение точности и качества нанесения покрытия на всех обрабатываемых поверхностях деталей достигается применением специальных вакуумных установок, имеющих в своем составе несколько протяженных ионных источников и планетарного редуктора, реализующего сложное кинематическое движение лопаток одновременно вокруг своей оси и оси камеры. Математическое моделирование процессов ионно-плазменной обработки, включающих в себя ионную имплантацию и осаждение многослойных покрытий с нескольких протяженных электродуговых источников плазмы, применительно к рабочим лопаткам газовых и паровых турбин подробно рассмотрены в главе 3.

6.2 Разработка технологического процесса для обработки лопаток паровых и газовых турбин из титановых сплавов

6.2.1 Входной контроль и подготовка лопаток к упрочнению

Рабочие лопатки, отправляемые на упрочнение, должны быть приняты техническим контролем (ОТК) завода-изготовителя и соответствовать требованиям чертежа по шероховатости, геометрии и материалу, не иметь механических повреждений в виде забоин, вмятин, трещин и проч. Материалы лопаток: титановый сплав ВТ6, соответствующий ГОСТ 19807-91, ОСТ 1 90013-81 и ОСТ 1 90002-86; ТС5, поставляемый по ТУ 1-5-130-78 и ТУ 108.02.070-82. Контактные поверхности бандажных или антивибрационных полок (при наличии) должны быть пригнаны в приспособлении для сборки с учетом толщины напыляемого покрытия. После проведения пригоночных работ лопатки должны быть осмотрены ОТК на отсутствие следов лезвийного

инструмента и других возможных механических дефектов. Транспортировка лопаток проводится в индивидуальных чехлах и деревянной ячеистой таре, обеспечивающей сохранность деталей. Лопатки на нанесение покрытий передаются с образцами-свидетелями для проведения разрушающего контроля и подтверждения качества покрытия.

Перед началом обработки проводят входной контроль, включающий в себя:

а) контроль химического состава основных материалов: катоды для ионных источников; плазмообразующие и реакционные газы; материал образцов-свидетелей, обрабатываемых совместно с деталями; реактивы для электролитно-плазменной обработки; специальные растворы, применяемые для ультразвуковой мойки и обезжиривания;

б) контроль входящих документов на обрабатываемый комплект деталей, сертификаты качества с отметками ОТК о годности лопаток и др.;

в) визуальный и измерительный контроль 100% лопаток на отсутствие загрязнений, окисных и иных пленок, механических дефектов поверхности и проч. При выявлении дефектов допускается проводить капиллярный контроль проникающими веществами (ЛЮМ-1ОВ, ЛЮМ-33ОВ, ЦМ-15 и др.) для установления природы дефектов и способов их устранения;

г) инструментальный контроль шероховатости поверхности и геометрии лопаток для выявления их возможной деформации при термической обработке, нагреве до 350...450 °С при осаждении ионно-плазменных покрытий.

Подготовка лопаток к упрочнению включают в себя операции ультразвуковой промывки, электролитно-плазменной обработки (ЭПП) и обезжиривание органическими растворителями непосредственно перед установкой в вакуумную камеру.

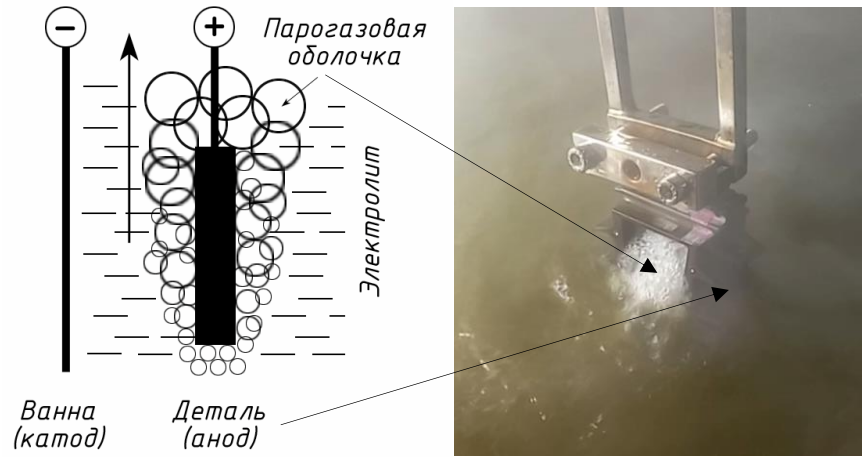
Ультразвуковую мойку проводят в универсальных слабощелочных моющих растворах типа «Грин Юниклин 1223» ТУ 2383-006-26788126-2003 с последующей промывкой в проточной воде, протиркой хлопчатобумажной тканью и сушкой теплым сухим воздухом.

Перед проведением упрочнения поверхность лопаток подвергалась дополнительной обработке – электролитно-плазменному полированию (ЭПП), обеспечивающему снижение параметров шероховатости на 2…3 класса и, как следствие, увеличение глубины ионного модифицирования (имплантации) и повышение адгезионной прочности материала покрытия.

6.2.2 Электролитно-плазменное полирование лопаток из титановых сплавов

Метод электролитно-плазменного полирования (также известный как метод электроимпульсного или электролитно-разрядного полирования [266-268]), основан на плазменных и электрохимических процессах, возникающих в тонкой парогазовой оболочке у поверхности детали, погруженной в раствор нейтральных солей. Под воздействием достаточно высокого напряжения

(≈ 300 В) у поверхности детали (анода) происходит вскипание электролита и образуется парогазовая оболочка (Рисунок 6.1), состоящая из паров воды и ионов, входящих в состав электролита. Электрический заряд, проходя через парогазовую оболочку, обусловливает протекание в ней управляемых плазменных и электрохимических процессов, в результате которых растворяется несколько микрометров наиболее дефектного и насыщенного остаточными газами слоя металла, появляется зеркальный блеск поверхности (Рисунок 6.2) и, как следствие, достигается высокая адгезия покрытия к основному металлу.



а *б*

а – схематическое изображение электролитической ячейки; *б* – процесс полирования лопатки

Рисунок 6.1 – Электролитно-плазменное полирование (ЭПП)

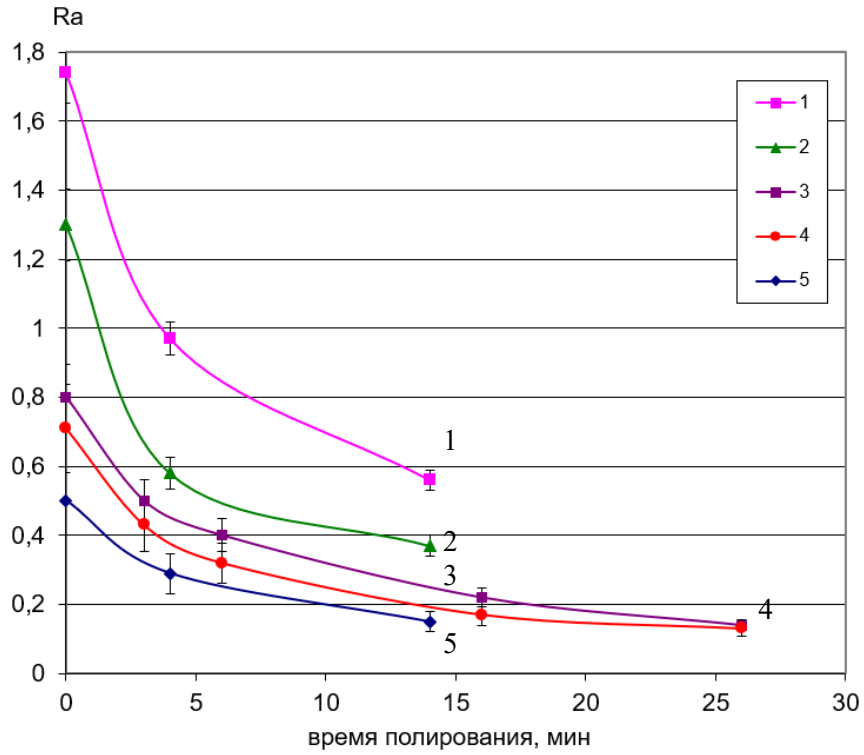
а *б*

а – рабочие лопатки компрессора ГТД; *б* – лопатки паровой турбины

Рисунок 6.2 – Примеры обработки рабочих лопаток из сплава ВТ6 методом электролитно-плазменного полирования, шероховатость от 0,2 до 0,4 Ra

Наиболее интенсивному воздействию электрических зарядов подвергаются острые кромки, заусенцы, вершины шероховатости и неметаллические включения. Установленные зависимости снижения шероховатости образцов из титанового сплава ВТ6 в процессе электролитно-плазменного полирования показан на Рисунке 6.3.

На способы электролитно-плазменной обработки лопаток из титановых сплавов автором в составе научного коллектива получены патенты РФ на изобретения: RU 2355828 C2 «Способ электролитно-плазменной обработки деталей» и RU 2373306 C2 «Способ многоэтапного электролитно-плазменного полирования изделий из титана и титановых сплавов».



Номерами обозначены образцы с различной исходной шероховатостью

Рисунок 6.3 – Изменение шероховатости поверхности образцов из сплава ВТ6 в процессе ЭПП при напряжении 270 В

6.2.3 Комплексная вакуумная ионно-плазменная обработка

Упрочнение лопаток осуществлялось в одном вакуумном объеме при последовательном проведении следующих операций комплексной вакуумной ионно-плазменной обработки (КВИПО):

а) ионная очистка поверхности деталей в низкотемпературной плазме тлеющего разряда от остатков органических загрязнений, следов влаги, пыли, ворсинок и прочих;

б) ионная модификация материала поверхности (имплантация азота);

в) ионная бомбардировка и разогрев детали до температуры, обеспечивающей формирование микроструктуры материала покрытия с минимальными внутренними напряжениями;

г) осаждение ионно-плазменного покрытия с нескольких ионных источников.

Очистка поверхности в тлеющем разряде

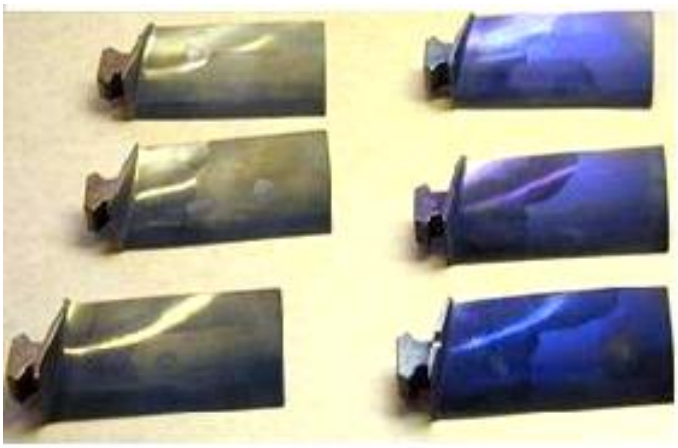
Ионная очистка лопаток проводилась путем их обработки в объемном тлеющем разряде, организуемом в вакуумной камере в среде аргона. При подаче на деталь положительного потенциала и появлении в камере объемной газоразрядной плазмы на обрабатываемых поверхностях преимущественно происходит физическое распыление адсорбированных газов, органических загрязнений и пленок окислов [269-271]. В настоящее время законченной теории обработки поверхности твердых тел в низкотемпературной плазме тлеющего разряда не существует, поскольку протекающие на обрабатываемой поверхности физические и химические процессы, включающие в себя большое количество взаимодействий между нейтральными и заряженными частицами, сложны и разнообразны. Наиболее полно теоретические исследования в этой области изложены в работах [269-272].

Общими рекомендациями для повышения степени очистки деталей в тлеющем разряде являются следующие. Перед установкой деталей в вакуумную камеру рекомендуется проводить их ультразвуковую мойку, например, в слабощелочных (5-10 об. %) моющих растворах типа «Грин Юниклин» или в органических растворителях типа «Нефрас». Технологические режимы обработки деталей в вакуумной камере могут изменяться в широких пределах в зависимости от характеристик источника тока: напряжение смещения устанавливают от 0,8 до 2 кВ в диапазоне плотностей тока от 0,5 до 5 мА/см^2, при этом давление в камере поддерживают на уровне от 1 до 10 Па [269, 272]. Обработку в тлеющем разряде лопаток компрессоров ГТД и паровых турбин проводили при следующих режимах: давление аргона p_{Ar} = 2 Па; напряжение смещения ($U_{см}$) от минус 600 до минус 1500 В; время обработки – от 10 до 20 минут в зависимости от площади и степени загрязненности обрабатываемых поверхностей деталей.

Ионная имплантация (модификация) поверхности

Сущность процесса ионной имплантации заключается в бомбардировке и внедрении в поверхностный слой ускоренных ионов азота, сопровождаемое протеканием химических реакций и процессов радиационно-ускоренной диффузии примесных атомов. В результате этих процессов субструктура материала поверхности претерпевает существенные изменения. На несколько порядков увеличивается плотность дислокаций, формируются пересыщенные твёрдые растворы

внедрения азота с повышенным содержанием нитридных и оксикарбонитридных мелкодисперсных фаз (преципитатов). Более подробно о процессе ионной имплантации изложено в Приложении Б, исследование образцов из сплава ВТ6 после ионной имплантации приведено в пункте 5.5, глава 5. Внешний вид лопаток, подвергнутых ионной имплантации азота, после проведения длительных стендовых испытаний показан на Рисунке 6.4.



а *б*

а – после ионной имплантации азота (окисная пленка отсутствует);
б – после базовой обработки, виброполирование
Испытания проведены совместно с ПАО «ОДК-УМПО»
Рисунок 6.4 – Рабочие лопатки компрессора ГТД из титанового сплава ВТ18
после длительных стендовых испытаний, наработка 1000 час

В 2007-2009 г.г. в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2012 годы» при участии ФГБОУ ВО «УГАТУ», РНЦ «Институт им. И.В.Курчатова» и НПП «Уралавиаспецтехнология», под научным руководством д.т.н., проф. Смыслова А.М. был создан временный творческий коллектив в составе: к.т.н. Дыбленко Ю.М., к.т.н. Селиванов К.С., к.т.н. Смыслова М.К., инженеры Гордеев В.Ю., Гонтюрев В.А., Таминдаров Д.Р., Бегликчеев П.А. и другие. Коллективом были выполнены опытно-конструкторские работы по теме: «Разработка новых многофункциональных нанопокрытий и технологии их нанесения». Создано специальное технологическое оборудование для реализации в одном вакуумном пространстве процессов ионной модификации (имплантации) и нанесения многослойных ионно-плазменных покрытий на лопатки компрессора ГТД, выпускаемых ПАО «ОДК-УМПО» и титановые лопатки паровых тур-

бин производства АО «Силовые машины». Обработку лопаток и контрольных образцов проводили по следующим режимам: доза ионной имплантации $D = 2 \cdot 10^{17}$ ион/см^2; ускоряющее напряжение $U_{уск}$ = 25 кэВ; остаточное давление в камере p = 5,5...6,5 Па [105-107, 281]. Детали равномерно облучались со всех сторон, вращаясь вокруг собственной оси и оси камеры. Температура обработки не превышала 250±20 °С. После имплантации детали и образцы охлаждались вместе с камерой в среде аргона до температуры ≈100 °С и далее на воздухе.

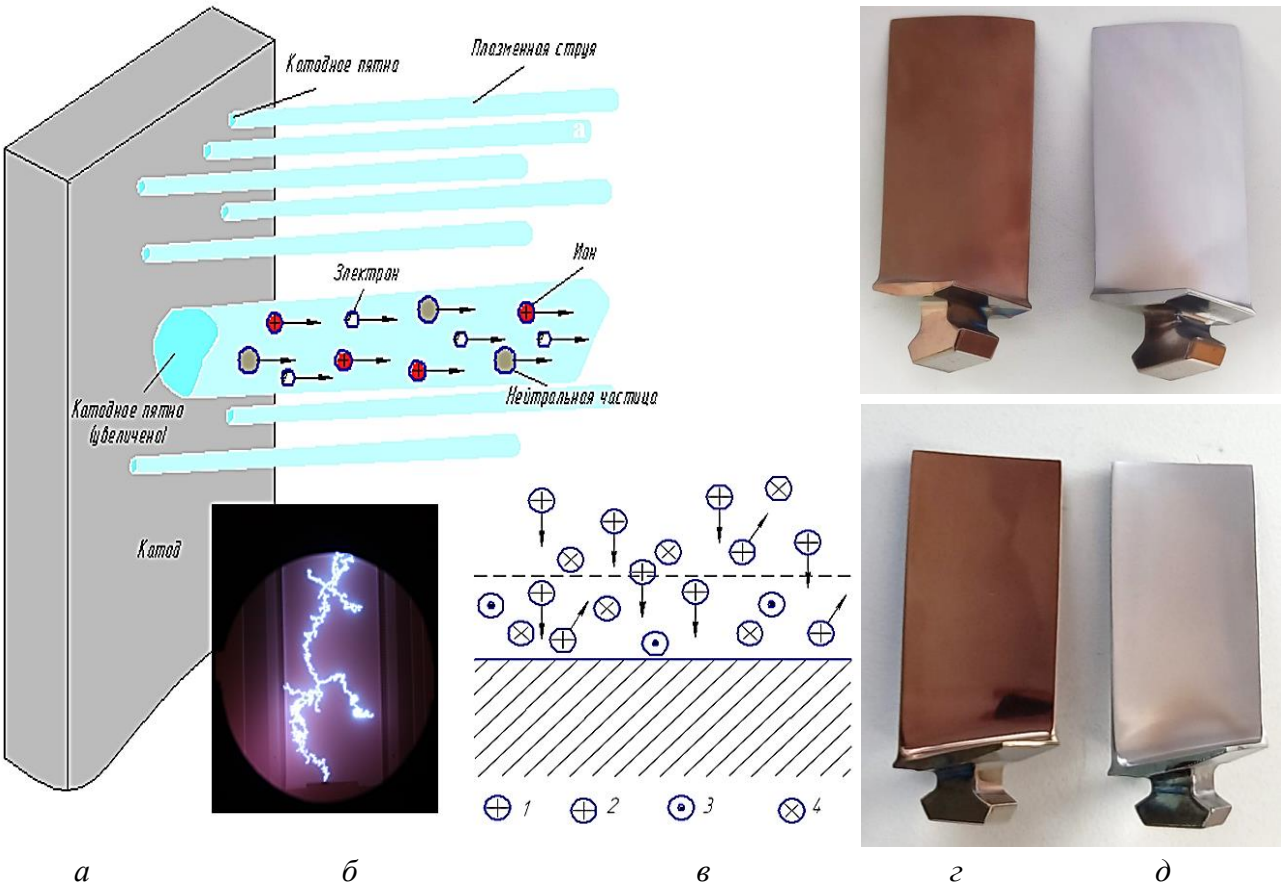
Ионный нагрев деталей

Для нанесения «*структурно плотных*» ионно-плазменных покрытий (в соответствии с известной диаграммой Мовчана-Демчишина-Торнтона) проводили предварительный нагрев деталей следующим образом. В среде плазмообразующего газа (аргон) на деталь прикладывали напряжение смещения в диапазоне от 800 до 1500 В, при этом в результате множественных ударов ионного потока по атомам материала поверхности происходил интенсивный нагрев детали, сопровождаемый распылением адсорбированных атомов, поверхностных пленок и, как следствие, химической активацией и подготовкой ювенильно чистого материала к нанесению ионно-плазменного покрытия. Температуру ионного нагрева обычно ограничивают температурой предыдущей термической обработки детали во избежание изменения ее механических свойств и коробления. Характерными температурами нагрева лопаток из двухфазных титановых сплавов является диапазон от 300 до 500 °С.

Особенностями ионного нагрева титановых лопаток газовых и паровых турбин сплавов является достаточная быстрая скорость их локального нагрева и высокий градиент температур (до $\Delta T \approx 100$ °С) по высоте лопатки из-за сравнительно низкой теплопроводности титана и его сплавов. В этой связи проведены исследования скорости ионного нагрева титановых лопаток от величины тока дуги электродугового ионного источника и времени его работы. В качестве объектов исследования были выбраны рабочие лопатки компрессора 1-й и 2-й ст. КНД ГТУ АЛ-31СТ из сплава ВТ6.

Во избежание коробления деталей скорость их ионного нагрева была ограничена работой одного протяженного электродугового ионного источника при токе дуги в диапазоне от 120 до 180 А при напряжении смещения $U_{см}$ = -850 В. Нагрев проводили ионами титана в среде аргона (давление $p_{Ar} = 4 \cdot 10^{-2}$ Па) на установке «Ватт-900» с измерением температуры через стекло иллюминатора фотопирометром Impac IP-140 через каждые 5 минут. Фотопирометр предварительно поверяли хромель-алюмелевой термопарой в диапазоне температур от 20 до 600 °С. Результаты измерений приведены на Рисунке 6.6 в виде графиков зависимости температуры от вре-

мени нагрева. Установлено, что при ионном нагреве в исследуемом диапазоне ионного тока рабочих лопаток 1, 2-й ступени КНД до температуры 500 ºС максимальная скорость нагрева наблюдается в первые пять минут от начала работы ионного источника и равна 20±2 ºС/мин. Минимальная скорость нагрева dT/dt = 5±0,5 º/мин устанавливается после 15 мин нагрева.



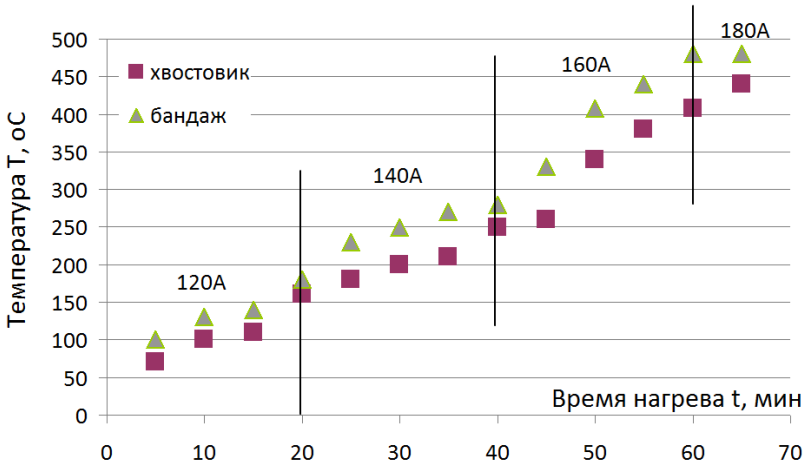
а – генерация плазмы на катоде электродугового испарителя; *б* – фотография катодной дуги; *в* – элементарные процессы ионного взаимодействия с поверхностью; *г* – рабочая лопатка из титанового сплава ВТ6 с остаточными окисными пленками после термообработки по режиму: 500 °С, воздух, 2 ч; *д* – та же лопатка после ионной очистки по режиму: $U_{см}$ = 950 В; $I_д$ = 140 А; t = 10 мин

1 – первичные ионы; *2* – вторичные ионы; *3* – вторичные электроны; *4* – распыляемые частицы

Рисунок 6.5 – Схема воздействия ионно-плазменного потока на поверхность при ионном нагреве

После проведения ионного нагрева был проведен контроль геометрии лопаток на специальном приспособлении по технологии ПАО «ОДК-УМПО». При установленных температурных

режимах коробление лопаток компрессора АЛ-31СТ не установлено во всем исследованном диапазоне температур.



Режим термообработки: нагрев Ti^{+}, напряжение смещения $U_{см}$ = 850 В,

давление аргона $p_{Ar} = 4 \cdot 10^{-2}$ Па

Рисунок 6.6 – Изменение температуры при ионном нагреве лопаток с протяженного электродугового испарителя на установке «Ватт-900»

На основании проведенных исследований были выбраны следующие параметры технологического процесса ионно-плазменной обработки, обеспечивающие заданный температурный режим:

а) ток разряда электродуговых испарителей $I_д$ = 120...180 А;

б) напряжение на детали при ионной очистке $U_в$ = 800...850 В;

в) напряжение на детали при осаждении покрытия $U_{оп}$ = 100...200 В;

г) время ионной очистки в тлеющем разряде t_o = 8…10 мин;

д) частота вращения центрального редуктора n = 8 об/мин;

е) температура ионного нагрева и нанесения покрытия T = 410±50 °С.

Осаждение многослойного ионно-плазменного покрытия

Одной из основных задач, решаемых при разработке новых способов нанесения ионно-плазменных покрытий, является обеспечение максимальной скорости их конденсации в диапазоне температур от 300 до 500 °С. При этом основными технологическими параметрами, определяющими скорость роста осаждения, являются: ток дуги электродугового испарителя ($I_д$, А), расстояние от детали до ионного источника (L, м), давление остаточных газов в камере (p, Па) и

напряжение смещения ($U_{см}$, В). При различных сочетаниях указанных параметров были проведены исследования изменения температуры титановых лопаток от времени нанесения покрытия. Исследования проводили на вакуумной установке «Ватт-900», при осаждении нитрида титана (TiN) на рабочие лопатки компрессора 1-й и 2-й ступени ГТД АЛ-31СТ из сплава ВТ6 при их планетарном вращении вокруг центральной оси камеры и собственной оси. Расстояние от деталей до ионных источников изменяли в диапазоне от 110 до 200 мм. Контроль температуры осуществляли через иллюминатор фотопирометром IMPAC IPE-140, поверенным хромель-алюмелевой термопарой в диапазоне температур от 100 до 600 °С. Результаты исследования режимов обработки на температуру и скорость осаждения покрытий приведены на Рисунках 6.7, 6.8 и в Таблице 6.1.

Таблица 6.1 – Толщина покрытия при различных параметрах обработки

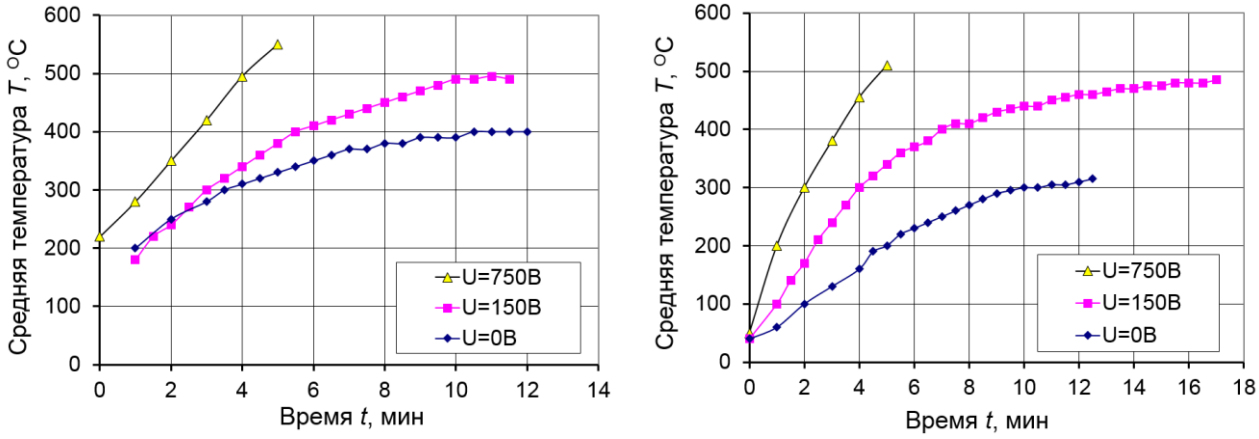
Расстояние от детали до ионного источника L, мм	Время обработки, t, мин	Толщина покрытия h, мкм	Скорость конденсации dh/dt, мкм/ч
110	120	20±5	10±2,5
110	250	37±6	9±1,5
200	120	7±2	2±0,7
200	250	12±3	3±0,8

Примечание – Напряжение смещения на детали $U_{см}$ = 150 В

Установлено, что при прочих равных условиях наиболее предпочтительной величиной напряжения смещения является $U_{см}$ = 150 В, обеспечивающей плавный нагрев деталей в диапазоне температур до 500 °С, что исключает их перегрев и коробление. При этом максимальная скорость конденсации покрытия TiN наблюдается на расстоянии L = 110 мм между деталью и ионным источником. Таким образом, проведенные исследования позволили установить, что при напряжении смещении $U_{см}$ = 150 В, оптимальным расстоянием между деталью и срезом плазменного пучка по критерию максимальной скорости осаждения является 110 мм. При этом расстоянии средняя скорость осаждения ионно-плазменного покрытия TiN при планетарной схеме обработки равна dh/dt = 10 мкм/ч.

Результаты исследований технологических режимов ионно-плазменной обработки легли в основу разработанных технологических процессов упрочнения лопаток газовых и паровых турбин из титановых сплавов нанесением многослойных ионно-плазменных покрытий. Титульные листы разработанных технологических процессов, согласованные с СКБ «Турбина» АО «Силовые машины-ЛМЗ» и ОКБ «Мотор» ПАО «ОДК-УМПО» приведены в Приложении К. Примеры

нанесения износостойких ионно-плазменных покрытий на компрессорные лопатки ГТД и лопатки паровых турбин приведены на Рисунках 6.9 и 6.10.

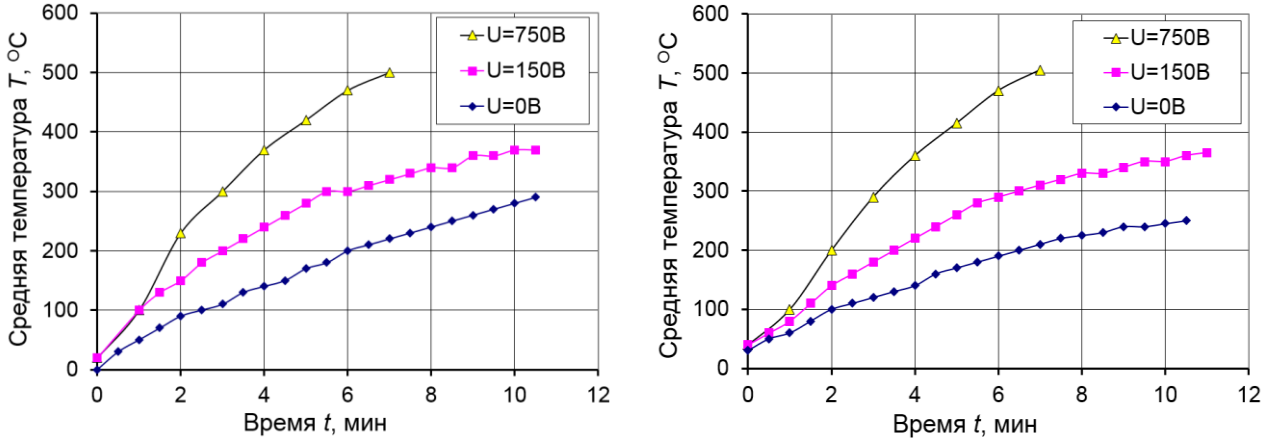


а *б*

а – $p = 5{,}5 \cdot 10^{-2}$ Па; *б* – $p = 4{,}0 \cdot 10^{-1}$ Па

Расстояние до ионного источника L=110 мм

Рисунок 6.7 – Зависимость температуры лопатки от времени нагрева, величины напряжения смещения (U) и давления (p)

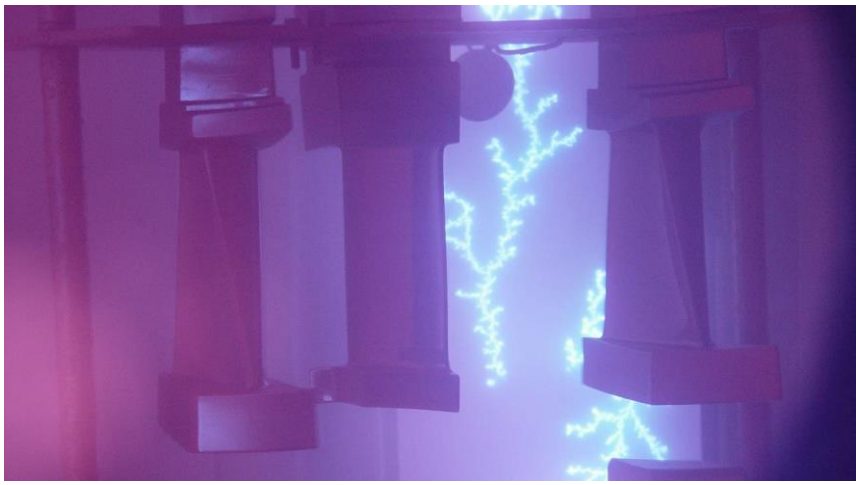


а *б*

а – $p = 5{,}5 \cdot 10^{-2}$ Па; *б* – $p = 4{,}0 \cdot 10^{-1}$ Па

Расстояние до ионного источника L=200 мм

Рисунок 6.8 – Зависимость температуры лопатки от времени нагрева, величины напряжения смещения (U) и давления (p)



На заднем плане видна катодная дуга, формирующая плазменное облако в зоне обработки электродугового ионного источника

Рисунок 6.9 – Пример ионно-плазменной обработки рабочих лопаток паровой турбины

а *б*

а – лопатки компрессора ГТД АЛ-31СТ; *б* – лопатки паровой турбины К-660

Рисунок 6.10 – Рабочие лопатки с износостойким покрытием Ti+(TiAlZrVMo)N, установленные на оснастке в вакуумной камере установки «Ватт 900-3Д»

6.3 Контроль качества покрытия

Контроль качества покрытия, нанесенного на детали, заключался в проведении визуального и измерительного контроля 100% деталей и образцов-свидетелей, измерения деформации пера лопаток на специальном приспособлении и металлографическое исследование контрольных образцов, обработанных совместно с лопатками. Металлографическое исследование образцов включало в себя изготовление наклонных или сферических шлифов, измерение микротвердости и параметров шероховатости, величины адгезионной прочности, общей толщины нанесенного покрытия, а также количества и толщин отдельных слоев.

Пример внешнего вида лопаток после нанесения на них защитного покрытия приведены на Рисунках 6.11-6.13. Кроме внешнего вида при визуальном контроле выявляют недопустимые отклонения покрытия, которыми в соответствии с техническими условиями на обработку являются: трещины любых форм и направлений, сколы, отслоения до основного материала, вспучивания вследствие неудовлетворительной подготовки поверхности под покрытие.

а *б*

а – турбина К-1000; *б* – турбина К-255

1 – лопатка без покрытия; *2, 3* – лопатки с покрытием на основе нитридов титана

Рисунок 6.11 – Внешний вид рабочих лопаток последних ступеней ЦНД паровых турбин из титанового сплава ВТ6 до после нанесения износостойкого покрытия Ti+TiN

а *б* *в*

а – рабочие лопатки 1-й ступени КНД, сплав ВТ6; *б* – рабочие лопатки 2-й ступени КНД, сплав ВТ6; *в* – «Стойка ВНА» после ЭПП (сверху) и нанесения покрытия

Рисунок 6.12 – Внешний рабочих и направляющих лопаток компрессора ГТД АЛ-31СТ после нанесения десятислойного покрытия (Ti+(TiAlZrVMo)N)x5

а *б* *в*

а – «Кок»; *б* – «Сектор»; *в* – «Закрылок ВНА»

Рисунок 6.13 – Внешний вид деталей ГТД АЛ-31СТ после нанесения десятислойного покрытия (Ti+(TiAlZrVMo)N)x5

Нанесение покрытия на лопатки сопровождается их нагревом. Для подтверждения отсутствия коробления до и после упрочняющей обработки проводят выборочный инструментальный контроль геометрии пера лопаток. Пример контроля контактных поверхностей антивибрационных полок лопаток компрессора ГТД АЛ-31СТ на координатно-измерительной машине Brown&Sharpe показан на Рисунке 6.14. Точность измерения поверхностей лопатки при этом составляет ±0,002 мм.

По результатам проведения всех видов контроля на обработанный комплект лопаток оформляют карту (сертификат) качества с указанием индивидуальных номеров лопаток, величин

контролируемых параметров и заключения о соответствии покрытия заданным техническим характеристикам.

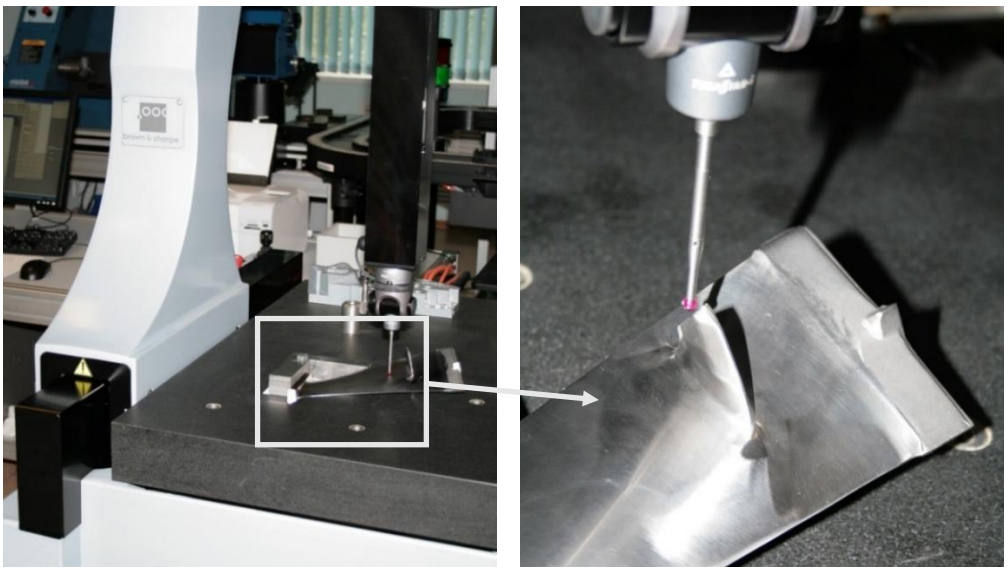
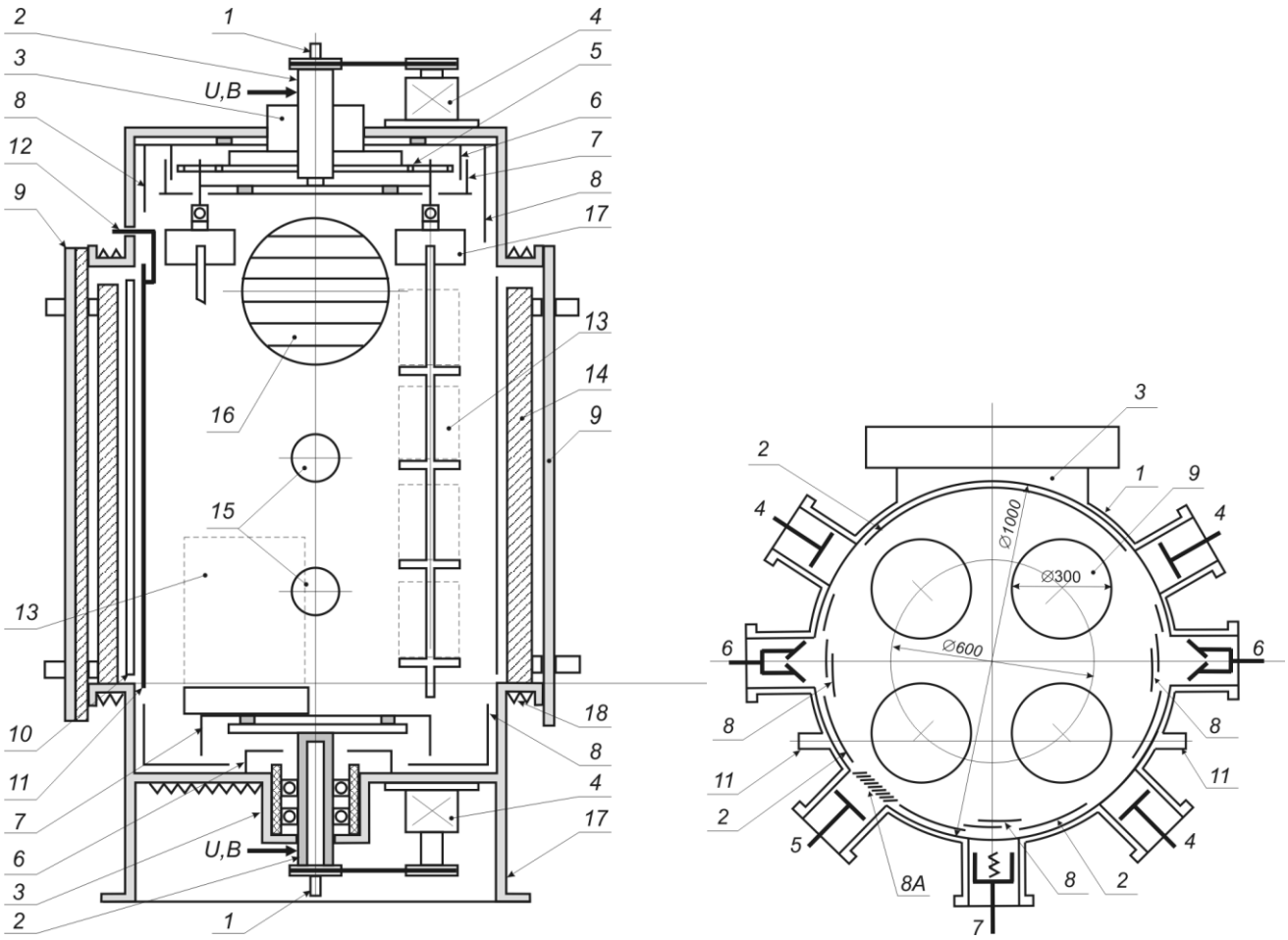


Рисунок 6.14 – Контроль геометрии пера и контактных поверхностей антивибрационных полок детали «Лопатка РКНД 1 ст.» ГТД АЛ-31СТ с помощью координатно-измерительной машины

6.4 Технологическое оборудование, разработанное для комплексной вакуумной ионно-плазменной обработки

Для реализации комплекса упрочняющих вакуумных ионно-плазменных технологий, применяемых при изготовлении лопаток газовых и паровых турбин, была разработана новая конструкция вакуумной установки и физических устройств, входящих в ее конструкцию (Рисунок 6.15). Реализуемые на новой установке технологии упрочнения включают в себя операции: ионную очистку, ионную имплантацию, например, ионами азота, совмещаемую с осаждением многослойных покрытий системы *Me*+*Me*N (где *Me* – основной металл покрытия), в т.ч. в условиях ионного ассистирования – направленного облучения потоком ионов с заданной энергией и концентрацией. На конструкцию установки получен патент РФ № 2425173 [273].



а *б*

а – продольный разрез камеры: *1* - вал привода редуктора; *2* - привод редуктора; *3* - муфта привода редуктора (высоковольтный ввод в камеру, через вал); *4* - внешний привод, двигатель; *5* - планетарный редуктор; *6* - защитный экран привода редуктора; *7* - защитный экран редуктора; *8* - защитные экраны камеры; *9* - охлаждаемые фланцы; *10* - плазменный фильтр; *11* - подвижная заслонка; *12* - привод заслонки; *13* - обрабатываемое изделие; *14* - катод протяженного источника питания; *15* - смотровые окна со шторками; *16* - жалюзи на входе диффузионного насоса; *17* - стойки камеры; *18* - охлаждаемые фланцы камеры;

б – поперечный разрез камеры: *1* - вакуумная камера; *2* - защитные экраны; *3* - патрубок откачки; *4* - протяженные ионные источники (электродуговые испарители); *5* - ионный источник с плазменным фильтром; *6* - дуальный магнетрон; *7* - протяженный газовый источник «ПИНК» для ионной модификации; *8* - подвижные заслонки; *8а* – плазменный фильтр; *9* - зона размещения деталей на планетарном редукторе; *10* - разъем двери камеры

Рисунок 6.15 – Компоновка вакуумной установки для нанесения многослойных ионно-плазменных покрытий на лопатки газовых и паровых турбин

Установка для комплексной ионно-плазменной обработки и нанесения покрытий работает следующим образом. Обрабатываемые детали *13* устанавливают в специальных держателях, затем закрывают дверь *10* вакуумной камеры *1*, создают вакуум и включают привод держателей. Обработку производят ионной очисткой, нагревом, ионной имплантацией, нанесением покрытия или сочетанием этих способов.

Ионный нагрев изделий в предлагаемой установке осуществляют следующим образом. В вакуумную камеру *1* напускают рабочий газ. Зажигают вакуумно-дуговой разряд между вакуумной камерой *1* и катодами электродуговых испарителей *4*, закрытых поворотными экранами *8*. Вакуумная камера *1* выполняет роль анода вакуумно-дугового разряда. Затем подключают изделия к положительному полюсу источника питания двухступенчатого вакуумно-дугового разряда и зажигают двухступенчатый вакуумнодуговой разряд между катодами *4* и изделиями 13. При этом изделия *13*, которые служат анодом двухступенчатого вакуумно-дугового разряда интенсивно нагреваются электронами плазмы. Нагрев изделий осуществляют с целью их термической обработки или для подготовки их к последующей обработке, например, нанесению покрытия.

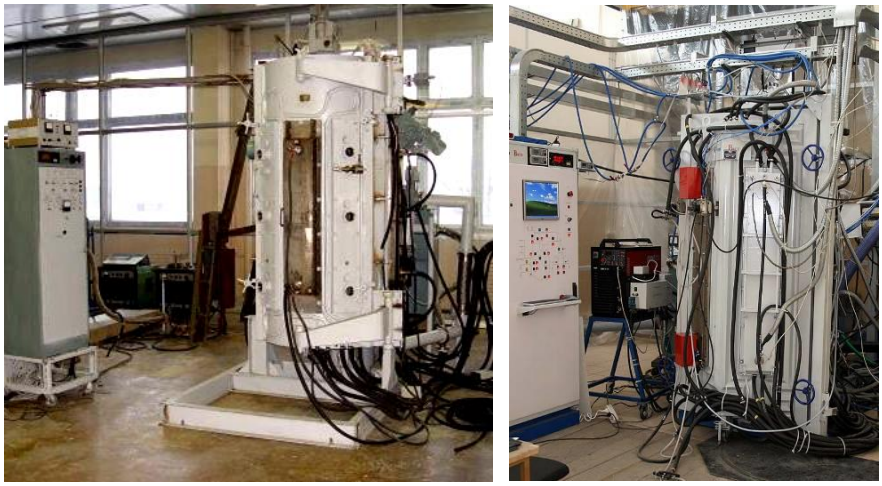
Ионная имплантация

В вакуумную камеру *1* напускают рабочий газ, зажигают вакуумнодуговой разряд между катодами электродугового испарителя 4 и вакуумной камерой *1*, зажигают двухступенчатый вакуумно-дуговой разряд. В результате горения вакуумно-дугового разряда в камере образуется газовая плазма, содержащая ионы рабочего газа, электроны и нейтральные частицы. На изделия, подвергаемые ионной имплантации, подают отрицательный потенциал достаточной для ионной имплантации величины от источника питания потенциала смещения. При этом ионы плазмы рабочего газа ускоряются в электрическом поле изделий и внедряются в их поверхность.

Нанесение покрытия

В вакуумную камеру *1* напускают рабочий газ. Катоды электродуговых испарителей *5* открывают, отводя в сторону оптически непрозрачные поворотные экраны *8*. Зажигают вакуумно-дуговой разряд между катодами *5* и вакуумной камерой *1*, являющейся анодом вакуумно-дугового разряда. В результате горения вакуумно-дугового разряда в камере образуется металло-газовая плазма, содержащая ионы рабочего газа, ионы металла катодов, электроны и нейтральные частицы. На изделия *13* подают отрицательный потенциал от источника питания потенциала смещения. При этом ионы металла ускоряются в электрическом поле изделий и осаждаются на их поверхности, образуя покрытие. Плазменные фильтры *8а* производят очистку наносимого материала от «*капельной фазы*». Покрытия также могут быть нанесены электронно-лучевым или магнетронным методами.

Получение равномерного покрытия, например, на всех поверхностях компрессорных лопаток, включая входную и выходную кромки, радиусы перехода пера лопатки в хвостовик, бандажные или антивибрационные полки, достигается при выполнении нескольких основных условий: обработку проводят с помощью нескольких протяженных вакуумно-дуговых источников ионного тока; в процессе обработки детали совершают сложное кинематическое движение, сочетающее одновременное вращение вокруг собственной оси и центральной оси камеры. Совершая полный цикл вращения, детали несколько раз проходят мимо ионных источников, поворачиваясь к ним под разным углом. Математическое моделирование процессов ионно-плазменной обработки деталей приведено в главе 3. На конструкции сборочных узлов, входящих в состав спроектированной вакуумной установки, получено несколько патентов РФ на изобретение [273-281]. На базе разработанной конструкции установки была изготовлена линейка вакуумных установок (Рисунок 6.16), использованных для реализации процессов комплексной ионно-плазменной обработки и нанесения износостойких покрытий на лопатки газовых и паровых турбин.



а *б*

а – УВН-0,9-ЭД «Виктория»; *б* – «Ватт-900-3Д»

Рисунок 6.16 – Промышленные установки комплексной вакуумной ионно-плазменной обработки, реализующие серийные процессы упрочнения лопаток паровых и газовых турбин

6.5 Практический опыт применения разработанных технологических процессов упрочнения лопаток последних ступеней ТНД паровых турбин

По результатам металлографических исследований и испытаний полноразмерных лопаток был оформлен комплект технологической документации и принято с АО «Силовые машины-

ЛМЗ» совместное решение о возможности упрочнения и проведения опытной эксплуатации рабочих лопаток последних ступеней ЦНД паровых турбин из титановых сплавов типа ТС5 и ВТ6, повергающихся повышенному эрозионному износу. Упрочненные лопатки проходили опытно-промышленную эксплуатацию в составе реально действующей турбины К-255-162 ТЭС «Альхольма» (Финляндия).

Для защиты от эрозионного износа на рабочие титановые лопатки последних ступеней ЦНД турбины К-255-162 ТЭС «Альхольма» было нанесено двухслойное защитное ионно-плазменное покрытие системы (Ti+TiN) толщиной 7^{+3} мкм. Внешний вид ротора турбины К-255-162 ТЭС «Альхольма» с упрочненными лопатками в процессе сборки и после эксплуатации показан на Рисунке 6.17.

а *б*

а – вид на турбину после сборки лопаток, *б* – вид на лопатки с покрытием,
наработка 13 388 часов, состояние удовлетворительное
(по данным АО «Силовые машины-ЛМЗ»)
Рисунок 6.17 – Турбина К-255-162 ТЭС «Альхольма» с упрочненными лопатками

Осмотр лопаток осуществлялся в процессе ежегодных плановых ремонтов турбины с 2003 по 2006 года. Первый осмотр рабочих лопаток производился в 2003 г. после наработки турбиной 13388 часов при 72 пусках. Пуски преобладали из неостывшего и горячего состояний. Средняя нагрузка на турбину за это время составила 240 МВт, средняя температура пара на входе в ЦНД ≈ 140 °С, средний вакуум 0,02 атм. Температура пара была ниже расчетной и доходила до 479 °С,

что данным СКБ «Турбина» АО «Силовые машины-ЛМЗ» способствовало ускорению процесса эрозии деталей проточного тракта турбины.

Осмотр турбины К-255-162 показал следующее:

1 Состояние рабочих лопаток удовлетворяет требованиям завода-изготовителя: забоины и вмятины отсутствуют, демпферные проволоки не имеют смещений в окружном направлении, отсутствует разворот проволок относительно их продольной оси.

2 Бандажные полки лопаток также удовлетворяют требованиям завода: осевых смещений бандажей нет, на контактных поверхностях зубьев бандажных полок нет сколов, истираний, радиальных уступов, трещин и следов других повреждений, следов задеваний по надбандажным уплотнениям не выявлено.

3 На основной поверхности рабочих лопаток и на бандажных полках присутствует покрытие из нитрида титана.

4 Входные и выходные кромки имеют незначительный (менее допустимого) эрозионный износ, который начинается под бандажными полками на периферии лопаток и распространяется до второй демпферной проволоки и ниже ее на 70-80 мм с постепенным уменьшением глубины износа до нуля.

Характер износа входной кромки между проволокой и бандажом – в виде поперечных бороздок. Ширина эрозионного износа по хорде наружного профиля (спинка) от 3 до 10 мм при максимальной глубине на отдельных лопатках[3] до 1,0 мм. Максимальная ширина зафиксированного эрозионного износа выходных кромок не превышала 8 мм с постепенным уменьшением по высоте лопаток до нуля. При осмотре отмечено, что на 48-ми из 184-х упрочненных лопатках эрозионный износ выходных кромок полностью отсутствовал. Общее состояние лопаток с защитным покрытием после эксплуатации показано на Рисунках 6.18 и 6.19.

Последующие плановые осмотры рабочих лопаток, проведенные с 2004 по 2006 годы, показали, что общее состояние рабочих лопаток отвечает требованиям завода. Идет незначительное увеличение эрозионного износа со скоростью на различных лопатках от 0,3 до 1,8 мм/год, при этом максимальная скорость износа наблюдается на входных кромках пера, выходящих из плоскости ступени.

В 2006 году по результатам осмотра состояния паровой турбины К-255-162 с упрочненными лопатками международной комиссией были сделаны следующие выводы:

а) Общее состояние рабочих лопаток последних ступеней отвечает техническим требованиям завода-изготовителя после наработки 35901 час при 98 пусках и не требует ремонта;

---

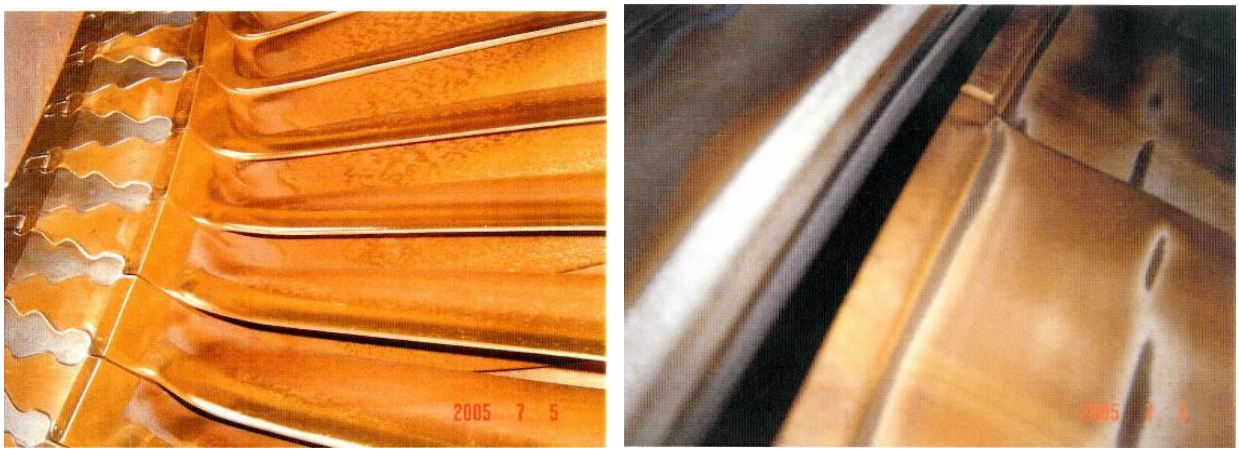
[3] наибольший износ имели лопатки, выходящие из плоскости входных кромок ступени в пределах допуска чертежа

б) Упрочнение лопаток методом ионной имплантации с нанесением защитного покрытия из нитрида титана положительно сказалось на эрозионном состоянии рабочих лопаток последних ступеней НД, особенно в первый период пуско-наладочных испытаний и работы турбины;

а *б*

а – область фреттинг-износа бандажных полок лопаток и эрозионного износа входных кромок;
б – область максимального эрозионного износа входных кромок
(по данным АО «Силовые машины-ЛМЗ»)

Рисунок 6.18 – Лопатки левой ступени с защитным покрытием, наработка 24644 ч



а *б*

а – область максимального каплеударного износа выходных кромок лопаток;
б – область фреттинг-износа бандажных полок лопаток
(по данным АО «Силовые машины-ЛМЗ»)

Рисунок 6.19 – Лопатки правой ступени с защитным покрытием, наработка 24644 ч

в) Упрочнение контактных поверхностей бандажных полок защитило их от износа по механизму фреттинг-коррозии;

г) Рекомендуется дальнейшее наблюдение за ступенями во время планового и капитального ремонта со вскрытием цилиндра низкого давления.

Всего за период с 2003 по 2024 год по разработанным технологиям было обработано более 10 000 рабочих лопаток паровых турбин, которые находятся в эксплуатации в составе мощных (до 1 200 МВт) паровых турбин ТЭС «Альхольма» (Финляндия), АЭС «Белоярская» (РФ), АЭС «Калининская» (РФ), АЭС «Тяньвань» (Китай), АЭС «Куданкулам» (Индия), АЭС «Бушер» (Иран), «Костромская ГРЭС» (РФ), «Нововоронежская АЭС-2», «Ленинградская АЭС-2», «Белорусская АЭС» (Беларусь), АЭС «Руппур» (Бангладеж).

Кроме того, по разработанным технологиям обработаны направляющие и рабочие лопатки реактивного ЦВД: ГРЭС «Конаковская» (РФ), ГРЭС «Лукомльская» (Белоруссия), ГРЭС «Харанорская», ГРЭС «Черепецкая» (РФ), ТЭС «Сипат» (Индия), ТЭС «Барх» (Иран), ТЭС «Ювяскюля» (Финляндия), рабочие лопатки, работающие в зоне фазового перехода для турбин ТЭС «Таманская» и ГРЭС «Карагандинская».

Положительные результаты эксплуатации лопаток паровых турбин ТЭС и АЭС с защитными покрытиями, многократно повышающими их служебные свойства, докладывались и демонстрировались на научно-технических совещаниях различного уровня (Рисунок 6.20).

а

б

а – научно-техническое совещание, организованное ПАО «ОДК-УМПО» (г. Уфа);

б – НТС на территории АО «Силовые машины» (г. С.-Петербург)

Рисунок 6.20 – Демонстрация результатов упрочнения лопаток паровых турбин ТЭС и АЭС с многослойными защитными покрытиями

6.6 Практический опыт применения разработанных технологических процессов упрочнения рабочих лопаток компрессора ГТД

Опытный технологический процесс упрочнения лопаток компрессора ГТД был разработан для рабочих лопаток 1-й и 2-й ступеней компрессора низкого давления ГТД АЛ-31СТ (Рисунок 6.21 а), который эксплуатировался в качестве силового привода газоперекачивающего аппарата ГПА-16Р «Уфа». Кроме рабочих лопаток были упрочнены детали направляющего аппарата: стойки, закрылки и сектора (Рисунки 6.21 б, в). Осмотр компрессора с наработкой 3600 часов показал, что на поверхности лопаток отсутствуют недопустимые поверхностные дефекты в виде сколов и отслоений покрытия. Следов газоабразивного износа не обнаружено. Кроме того, комиссией была отмечена высокая гидрофобность покрытия (TiAlZrVMo)+(TiAlZrVMo)N, нанесенного на лопатки, что в разы сокращает интенсивность солеотложения, показанного на Рисунке 7.14 (пункт 7.4 главы 7), и позволяет сократить время обслуживания ротора компрессора до пуска в эксплуатацию.

а *б* *в*

а – ротор с упрочненными лопатками; *б* – рабочие лопатки 1-й и 2-й ступени; *в* – сектор направляющего аппарата с нанесенным защитным покрытием

Рисунок 6.21 – Рабочие лопатки компрессора РКНД 1,2 ст. ГТД АЛ-31СТ с десятислойным покрытием системы (TiAlZrVMo)+(TiAlZrVMo)N)x5

6.7 Выводы по главе 6

1 Разработаны новые способы нанесения многослойных износостойких покрытий, позволяющие целенаправленно управлять их макро-, микроструктурой и фазовым составом при обработке крупногабаритных деталей, например, рабочих лопаток паровых турбин длиной до

1400 мм. Приведено описание особенностей технологического процесса и специального технологического оборудования, позволяющего совмещать в одном объеме: ионную очистку, ионную модификацию (имплантацию), ионный нагрев, нанесение многослойных покрытий с нескольких протяженных ионных источников. На способы упрочнения лопаток турбомашин из титановых сплавов и конструкции установок для их реализации получено двадцать патентов РФ на изобретения, приведенные в автореферате.

2 Исследованы зависимости температуры от величины ионного тока при нагреве лопаток в вакууме протяженными электродуговыми испарителями. Установлено, что регулированием величины ионного тока и скорости вращения деталей в вакуумной камере достигается скорость нагрева до 4,5...5,0 °/мин в диапазоне температур от 50 до 500 °С. Для исключения температурной деформации и коробления лопаток, максимальной скоростью нагрева не должна превышать 11±1 °/мин.

3 Исследованы температурные зависимости от времени нагрева при различных величинах напряжения смещения ($U_{см}$, В), подаваемого на обрабатываемые детали в диапазоне от 0 до 750 В, расстоянии от источника плазмы, в месте среза плазменного потока, до детали (L, мм) и давления остаточных газов в камере (p, Па). Установлено, что оптимальным расстоянием между деталью и ионным источником по критерию максимальной производительности является L=110 мм, при этом скорость осаждения многослойного покрытия системы Ti+TiN при принятых режимах осаждения составляет 20 мкм/ч на неподвижный объект и 10 мкм/ч – на вращающейся объект.

4 По результатам исследований оформлен комплект технологической документации и принято совместное решение с АО «Силовые машины» о возможности упрочнения и проведения опытно-промышленной эксплуатации рабочих лопаток последних ступеней ЦНД паровых турбин из титановых сплавов типа ТС5 и ВТ6.

5 Упрочненные лопатки прошли опытно-промышленную эксплуатацию в составе турбины К-255-162 ТЭС «Альхольма» (Финляндия) производства АО «Силовые машины-ЛМЗ». Общая наработка турбины с комплектом упрочненных лопаток составила более 35901 ч, с 2002 по 2007 г.г., при 98 пусках. Упрочнение поверхности пера лопаток и контактных поверхностей бандажных полок путем ионной имплантации азота и нанесения многослойного покрытия Ti+TiN общей толщиной 7^{+3} мкм защитило их от износа по механизму каплеударной эрозии и фреттинг-коррозии соответственно. Общее состояние рабочих лопаток последних ступеней отвечает техническим требованиям завода-изготовителя и не требует ремонта.

6 Опытный техпроцесс упрочнения лопаток компрессора ГТД был реализован для рабочих лопаток 1-й и 2-й ступеней компрессора низкого давления ГТД АЛ-31СТ производства ПАО «ОДК-УМПО», который эксплуатировался в качестве силового привода газоперекачивающего аппарата ГПА-16Р «Уфа».

7 Общая наработка ГТД АЛ-31СТ с комплектом упрочненных лопаток составила 3600 часов. Упрочнение поверхности пера лопаток и контактных поверхностей антивибрационных полок путем нанесения многослойного покрытия (Ti(AlZrVMo)+Ti(AlZrVMo)N)x5 общей толщиной 12^{+3} мкм показал, что на поверхности упрочненных лопаток отсутствуют недопустимые поверхностные дефекты в виде сколов и отслоений. Кроме износостойкости отмечена высокая гидрофобность нанесенного покрытия, что в разы сокращает интенсивность солеотложения и позволяет сократить время обслуживания ротора компрессора до пуска в эксплуатацию.

ГЛАВА 7
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ МНОГОСЛОЙНЫХ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИОННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

В соответствии с ГОСТ 30480-97 определение функциональных параметров материалов, например, таких как износостойкость, может осуществляться при эксплуатационных, стендовых или ускоренных лабораторных испытаниях. Первый вид испытаний дает возможность максимально полно реализовать возможные эксплуатационные факторы только в процессе опытно-промышленной эксплуатации, предусматривающей повышенные или экстремальные режимы работы оборудования в рамках программы испытаний. На практике эксплуатация оборудования не предполагает применение предельных режимов работы и внешнего механического воздействия. В этой связи эффект от упрочнения деталей наиболее полно проявляется в отдельных случаях нештатной работы оборудования, например, при ухудшении качества рабочей среды, попадании абразивных частиц, возникновении эрозионного износа вне зоны фазового перехода (в паровых турбинах), а также при длительной эксплуатации, которая для паровых турбин и приводов ГТУ может достигать десятки тысяч часов. В этой связи результаты эксплуатационных испытаний имеют наибольшую ценность в качестве подтверждения (верификации) результатов ускоренных стендовых или лабораторных испытаний.

Для сокращения сроков внедрения новых технологий в производство на практике наиболее часто используют ускоренные испытания и связанные с ними специальные методики расчетов контролируемых параметров. В настоящей работе процедуры ускоренных испытаний были реализованы для определения износостойкости многослойных ионно-плазменных покрытий применительно к газоабразивному и каплеударному изнашиванию. Подробно об испытаниях и полученных результатах изложено соответственно в главах 4 и 5. Настоящая глава диссертационной работы посвящена разработке методики прогнозирования функциональных свойств исследуемых многослойных покрытий на основе полученных экспериментальных результатов.

Под прогнозированием функциональных свойств покрытий будем понимать установление зависимости, описывающей изменение параметров относительной износостойкости и долговечности покрытия в исследуемых диапазонах режимов и условий воздействия внешних факторов. Относительной износостойкостью покрытия в соответствии с ГОСТ 30480-97 обозначают его свойство оказывать сопротивление изнашиванию, оцениваемое как отношение скоростей изнашивания детали без покрытия и детали с покрытием. Под долговечностью покрытия в соответствии с ГОСТ 27.002-2015 будем понимать его способность проявлять защитные свойства в отношении материала поверхности до достижения своего предельного состояния, которое выража-

ется либо в полном удалении покрытия с поверхности, либо в превышении скорости износа покрытия над скоростью износа материала без покрытия.

Для установления вида зависимости между прогнозируемыми и известными параметрами объекта исследования применяют формализованные методы прогнозирования [282], наиболее распространенными из которых являются статистические регрессионные модели и модели на основе искусственных нейронных сетей (ИНС). Общим для них является формальное описание зависимостей между эмпирически полученными данными, без раскрытия их причинно-следственной связи, а также предположения, что установленная зависимость будет сохраняться для новых данных, полученных при тех же условиях.

Результатом регрессионного анализа нескольких факторов в большинстве случаев является построение алгебраического выражения в виде полинома *n*-й степени:

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{j=1}^{J} b_j X_j + \sum_{i<j} b_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^{J} b_{ii} X_i^2 + \ldots, \qquad (7.1)$$

где $\hat{y}$ – искомая величина;

b_0, b_{jj} – постоянные коэффициенты;

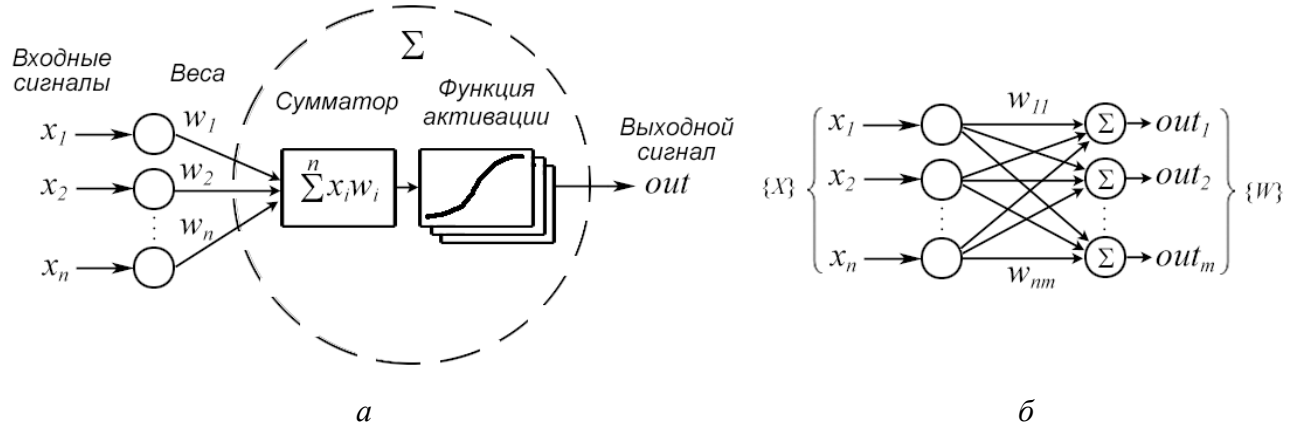
X_{ij} – значение J независимых факторов, $i, j = 1, 2, \ldots J$.

Основная задача построения полинома сводится к расчету постоянных коэффициентов b_{jj} по известным формулам математической статистики [283]. Основными недостатками регрессионного анализа являются необходимость использования аналитической зависимости с заранее заданной формой и ограничение на количество используемых переменных, кроме этого для получения решения в виде искомого полинома количество переменных должно быть равно количеству независимых граничных условий.

Наравне с традиционными методами регрессионного анализа в последнее десятилетие активно развивается математический аппарат искусственных нейронных сетей (ИНС), основным преимуществом которого является возможность находить нелинейные закономерности среди большого количества разрозненных эмпирических данных [284, 285]. Например, нейросети широко применяют для решения нелинейных систем уравнений, количество неизвестных которых отличается от количества уравнений, или для поиска сложных зависимостей, форма которых заранее не известна. В этом смысле ИНС является наиболее функциональным статистическим методом анализа. В отличие от полиномиальной модели ИНС заменяет собой систему нелинейных уравнений с множеством коэффициентов, рассчитываемых на основе известных эксперименталь-

ных и справочных данных. ИНС имеют преимущества перед другими статистическими методами, если исходные данные и результаты измерений представляют собой сложные и неочевидные нелинейные зависимости большого числа факторов, представленные случайными, экспериментально полученными величинами [284-286].

Нейронные сети обычно представляют в виде совокупности взаимосвязанных между собой «искусственных нейронов» (Рисунок 7.1 а), что позволяет достаточно наглядно описать их структуру, а также проиллюстрировать алгоритмы распространения и переработки информации. Математически «искусственный нейрон» (Σ) представляют в виде нелинейной функции $\varphi = f(\Sigma(x_i \cdot w_{ij})$, имеющей единственный параметр – сумму входных сигналов (x_i), получаемых от других нейронов, умноженный на весовой коэффициент (w_{ij}), имеющий смысл уровня активности этого сигнала (Рисунок 7.1 б). При построении ИНС нейроны обычно располагают вертикальными слоями. Слой, на который подают входные данные {*X*}, называют первым или входным слоем. Последний слой является выходным слоем сети, определяющим совокупность выходных (искомых) данных {Y}. Слои сети между входным и выходным слоями называют скрытыми. Для иллюстрации сказанного на Рисунке 7.1 а показана однослойная ИНС, имеющая *n* входных сигналов $x_1 \ldots x_n$ и *m* выходных $y_1 \ldots y_m$. Сеть не имеет скрытых слоев, входные данные подаются на каждый нейрон выходного слоя в виде сигнала $x_i \cdot w_{ij}$. Структура ИНС со скрытым слоем показана на Рисунках 7.3 и 7.8.



а *б*

а – искусственный нейрон; *б* – однослойная искусственная нейронная сеть

Рисунок 7.1 – Математическая модель искусственной нейронной сети

В настоящей работе математическое моделирование с применением ИНС было использовано для прогнозирования функциональных свойств многослойных покрытий (относительной

износостойкости и долговечности при газоабразивном износе и каплеударной эрозии) от следующих параметров:

– *параметры конструкции покрытия*: общая толщина покрытия (h, мкм), толщина слоев (h_N, мкм), количество слоев (N);

– *физико-механические свойства материалов*: коэффициент теплового расширения (α, $К^{-1}$), плотность (ρ, кг/м^3), предел пропорциональности ($\sigma_{пц}$, МПа) или условный предел текучести ($\sigma_{0,2}$, МПа), модуль упругости (Е, МПа), коэффициент Пуассона (ν);

– *технологические параметры*: ток дуги электродуговых ионных источников ($I_д$, А), величина давления плазмообразующего (p_{Ar}, Па) и реакционного газов (p_N, Па), напряжение смещения ($U_{см}$, В), подаваемое на деталь при осаждении покрытия.

Искомыми (прогнозируемыми) параметрами покрытий были приняты для:

– *газоабразивного изнашивания*: коэффициент относительной износостойкости покрытия (ξ), долговечность покрытия (t_n, ч), микротвердость (HV) или максимальная контактная нагрузка разрушения при инструментальном индентировании (p_{max}, МПа);

– *каплеударной эрозии*: коэффициент относительной эрозионной стойкости покрытия (ζ), длительность инкубационного периода (m_0, кг/м^2), скорость эрозии (dE/dM, м^3/кг) и коэффициент изоляции (D, дБ).

Граничными условиями прогнозирования функциональных свойств покрытия были приняты условия соответствующих ускоренных испытаний на газоабразивный износ (пункт 5.1, глава 5) и каплеударную эрозию (пункт 5.2, глава 5).

7.1 Нейросетевая модель газоабразивного износа

Исходными данными для построения нейросетевой модели многослойного покрытия, работающего в условиях газоабразивного износа, были приняты результаты экспериментальных исследований, приведенные в п. 5.1, глава 5. Математическая модель многослойного ионно-плазменного покрытия в соответствии с теоретическими исследованиями особенностей его формирования (пункт 3.1, глава 3) предполагает, что покрытие имеет известное сочетание слоев заданной толщины из материалов с известными физико-химическими свойствами, наносимых в вакуумной камере при работе нескольких ионных источников. В общем виде разрабатываемая математическая модель многослойного покрытия на основании общей теории систем [287, 288] может быть представлена в виде модели «*черного ящика*» (Рисунок 7.2), для которого приняты следующие параметры.

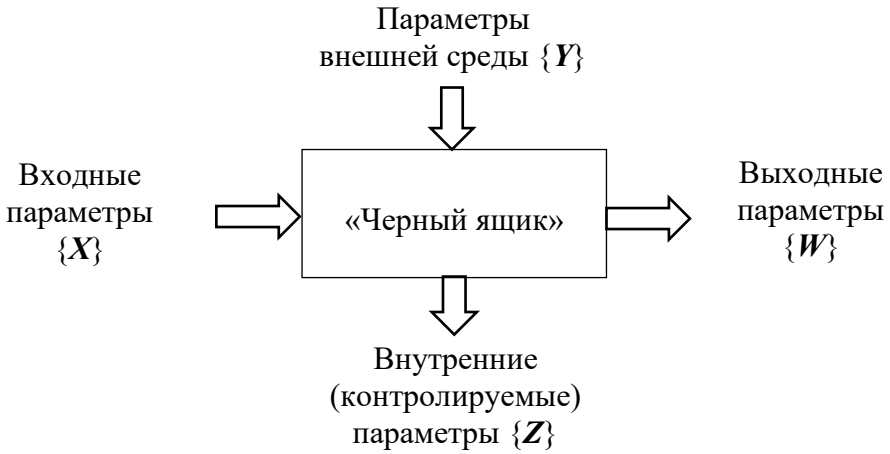


Рисунок 7.2 – Концептуальная модель многослойного ионно-плазменного покрытия в виде «*черного ящика*»

Входные параметры $\{\boldsymbol{X}\}$:

а) Параметры конструкции покрытия $\{\boldsymbol{X_1}\}\subseteq\{\boldsymbol{X}\}$: h, мкм – общая толщина покрытия; N – количество слоев; h_N, мкм – толщина слоев;

б) Физико-механические свойства основного материала $\{\boldsymbol{X_2}\}\subseteq\{\boldsymbol{X}\}$: α, $К^{-1}$ – коэффициенты теплового расширения; ρ, кг/м^3 – плотность; $\sigma_{0,2}$, МПа – условный предел текучести; E, МПа – модуль упругости; ν – коэффициент Пуассона; p_{max}, МПа – максимальная нагрузка разрушения, определяемая при инструментальном индентировании;

в) Технологические параметры $\{\boldsymbol{X_3}\}\subseteq\{\boldsymbol{X}\}$: $I_д$, А – ток дуги ионного источника; p_{Ar}, Па – давление плазмообразующего газа; p_N, Па – давление реакционного газа.

Параметры внешней среды $\{\boldsymbol{Y}\}$: d, мм – максимальный размер абразивных частиц; v_a, м/с – номинальная скорость газоабразивного потока; α_a, ° – угол атаки газоабразивного потока; H_a, кгс/мм^2 – твердость абразивных частиц; σ_a, МПа – прочность на сжатие абразивных частиц.

Внутренний (контролируемый) параметр $\{\boldsymbol{Z}\}$: HV, кгс/мм^2 – микротвердость покрытия.

Выходные параметры $\{\mathbf{W}\}$: ξ – коэффициент относительной износостойкости покрытия; t_n, ч – долговечность покрытия;

Для моделирования зависимости относительной износостойкости и долговечности от задаваемых параметров $\{\boldsymbol{X}\}$ и $\{\boldsymbol{Y}\}$ была разработана трехслойная ИНС прямого распространения со скрытым слоем и сигмоидальной функцией активации нейронов в виде $\varphi = (1+e^{k\Sigma x})^{-1}$, где k – коэффициент кривизны сигмоиды. При моделировании принималось $k = 0{,}5$, что обеспечило минимальную ошибку работы нейросети при ее обучении, менее 0,5 %. Внутренний (скрытый) слой нейросети был введен из предположения существования нелинейной зависимости между входными и выходными данными.

Входной слой ИНС включал в себя семнадцать нейронов по количеству входных параметров и параметров внешней среды {X∪Y}. В выходном слое было установлено три нейрона, выдающие величину коэффициента относительной износостойкости (ξ), долговечности (t_n, ч) и микротвердости (HV, кгс/мм^2). Количество нейронов в скрытых слоях выбирались из допущения, что количество связей с входным слоем должно быть гарантировано больше объема обучающей выборки. Схема использованной ИНС показана на Рисунке 7.3.

Разработанная нейросеть представляет собой систему нелинейных уравнений:

$$\begin{cases} \xi = f_1(\boldsymbol{X}, \boldsymbol{Y}); \\ t_n = f_2(\boldsymbol{X}, \boldsymbol{Y}); \\ \mathrm{HV} = f_3(\boldsymbol{X}, \boldsymbol{Y}). \end{cases} \quad (7.2)$$

Каждое уравнение $f(\boldsymbol{X}, \boldsymbol{Y})$ определялось собственным набором весовых коэффициентов $\{w_{ij}\}$. Поиск множества $\{w_{ij}\}$ был осуществлен с помощью формальной процедуры обучения ИНС, использующей известный метод «обратного распространения» (Backpropagation algorithm) [289-291].

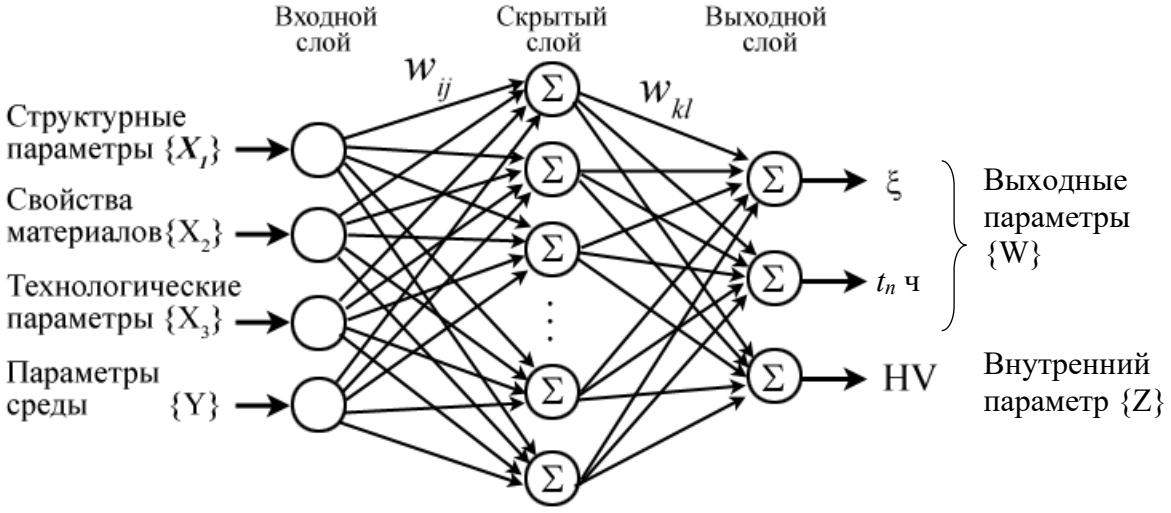


Рисунок 7.3 – Структурная схема ИНС для прогнозного моделирования свойств многослойных ионно-плазменных покрытий в условиях газоабразивного изнашивания

Под обучением понимался итерационный процесс расчета весовых коэффициентов $\{w_{ij}\}$, включающий в себя следующие шаги:

1) формирование обучающей выборки в виде множества входных данных {**X**, **Y**}[4] и соответствующего ему множества выходных данных {**W**, **Z**}, полученных экспериментально;

2) проведение процедуры рандомизации обучающей выборки из множества начальных значений коэффициентов $\{w_{ij}\}$ связей ИНС;

3) последовательная подача на вход сети входных сигналов из обучающей выборки {**X**, **Y**};

4) расчет функций $\varphi=f(\Sigma(x_i \cdot w_{ij})$ всех нейронов сети и получение на выходе результата работы в виде множества выходных данных {**W`**, **Z`**};

5) расчет ошибки обучения $\Delta = f(\{\mathbf{W`}, \mathbf{Z`}\} - \{\mathbf{W}, \mathbf{Z}\})$, где {**W**, **Z**} – множество известных (экспериментально полученных) величин выходных сигналов, соответствующих входным данным {**X**, **Y**};

6) расчет новых коэффициентов $w^*_{ij} = \lambda(w_{ij}, \Delta)$, начиная с последнего слоя, таким образом, чтобы минимизировать ошибку обучения нейросети (Δ);

7) подача на вход сети очередного множества входных сигналов из обучающей выборки {**W**, **Z**} и получение на выходе соответствующего ей результата работы {**W``**, **Z``**}. Далее процедура обучения повторяется с п. 5.

Обучающая выборка была сформирована на основе экспериментальных данных, полученных в ходе испытаний различных многослойных покрытий на газоабразивный износ (подробнее пункт 5.1, гл.5). Обучение нейросети проводили до достижения следующих условий: средняя величина ошибки обучения ($\Delta_{ср}$) – не более 1%, максимальная ошибка обучения (Δ_{max}) – не более 0,5%.

После достижения заданной величины ошибки обучения на вход ИНС подавали входные данные, соответствующие исследуемым многослойным ионно-плазменным покрытиям на основе титана, ванадия и их нитридов: (V, Ti)+(V,Ti)N, и Ti+TiN с различными толщинами нитридных слоев. В результате работы ИНС были получены прогнозные величины коэффициента относительной износостойкости ($\xi_{ИНС}$), долговечности покрытия ($t_{ИНС}$, с) и микротвердости ($HV_{ИНС}$). Графики изменения этих характеристик для различных типов покрытий показаны на Рисунках 7.4-7.6. Для верификации работы ИНС в случайном порядке принимали значения из Таблицы И.1 экспериментальных данных, приведенной в Приложении И. Подробно о процедуре обучения и работе ИНС изложено в работах [292-296].

[4] При решении рассматриваемой задачи в обучающую выборку включалось не менее 80% всех результатов испытаний покрытий на газоабразивное изнашивание. Остальные экспериментальные данные были использованы для верификации нейросетевой модели после ее обучения.

Для каждого выходного значения ИНС была рассчитана относительная погрешность по формуле:

$$da = |a_{экс} - a_{ИНС}| / a_{экс} \cdot 100\%, \quad (7.3)$$

где $a_{экс}$ – экспериментальная величина;

$a_{ИНС}$ – прогнозируемая величина, полученная в результате работы ИНС.

Прогнозные величины $\xi_{ИНС}$, $t_{ИНС}$ и $HV_{ИНС}$, а также их относительные погрешности приведены в Таблицах 7.1–7.3. Полученные в результате моделирования прогнозные ряды значений относительной износостойкости и долговечности многослойных покрытий подтверждаются экспериментальными данными (на Рисунках 7.4–7.6 показаны пустыми кружками) и могут быть описаны непрерывными гладкими кривыми с относительной погрешностью 10±5%.

Таблица 7.1 – Прогнозируемые характеристики многослойных покрытий типа Ti+Ti*N

Обозначение покрытия	*N*	*h, мкм*	h_N, *мкм*	$\xi_{ИНС}$	$t_{ИНС}$, *с*	$HV_{ИНС}$	$d\xi$, %	$dt_{ИНС}$, %	*dHV*, %
(Ti+Ti*N)x2	4	5,5	2,5	2,9	290	2041	9	1	5
(Ti+Ti*N)x8	16	5,5	0,6	1,2	88	2629	11	3	1
(Ti+Ti*N)x4	8	11,2	2,5	2,7	586	2756	4	14	4
(Ti+Ti*N)x18	36	10,5	0,5	1,2	68	2854	9	15	0
(Ti+Ti*N)x6	12	16,0	2,4	2,5	593	3052	7	6	5
(Ti+Ti*N)x28	56	19,0	0,6	1,3	67	3252	5	16	3
Ti+Ti*N	2	6,0	5,5	7,0	769	1613	8	3	14
Ti+Ti*N	2	3,1	2,8	5,5	501	1864	1	1	4
(Ti+Ti*N)x2	4	6,7	2,8	4,1	581	1569	7	9	6

Примечания – Обозначения материалов: Ti – ВТ1-0; Ti* – ВТ20; *N* – количество слоев; *h* – толщина покрытия; h_N – толщина нитридных слоев; $d\xi$, $dt_{ИНС}$, *dHV* – относительные погрешности прогнозируемых коэффициентов соответственно.

Таблица 7.2 – Прогнозируемые характеристики многослойных покрытий (V, Ti)+(V, Ti*)N

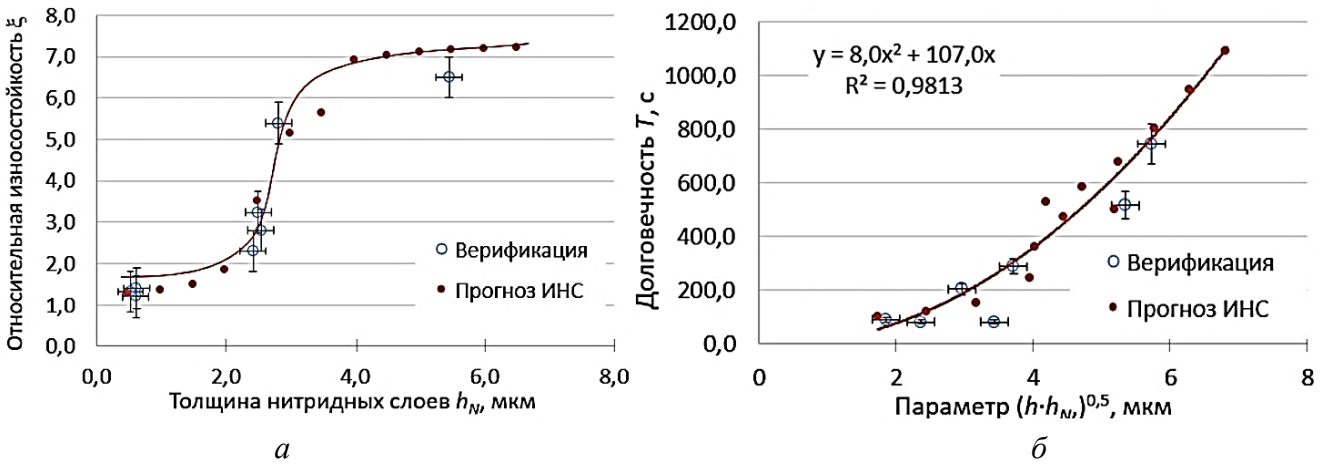
Обозначение покрытия	*N*	*h, мкм*	h_N, *мкм*	$\xi_{ИНС}$	$t_{ИНС}$, *с*	$HV_{ИНС}$	$d\xi$, %	$dt_{ИНС}$, %	*dHV*, %
(Ti+Ti*V)x2	6	10,9	2,8	10,0	503	1898	2	2	0
((V,Ti)+(V,Ti*)N)x2	6	9,7	2,5	9,0	433	1907	1	9	2
((V,Ti) + (V,Ti*)N)x2	4	8,0	3,3	6,6	598	1525	15	4	7
((V,Ti) + (V,Ti*)N)x2	4	7,1	2,8	4,9	465	1503	3	9	4
((V,Ti) + (V,Ti*)N)x2	4	7,0	2,9	7,3	634	1519	7	1	1

Примечание – Обозначения даны в соответствии с Таблицей 7.1

Таблица 7.3 – Прогнозируемые характеристики многослойных покрытий (V, Ti)+(V, Ti)N

Обозначение покрытия	*N*	*h, мкм*	h_N, *мкм*	$\xi_{ИНС}$	$t_{ИНС}$, *с*	$HV_{ИНС}$	$d\xi$, *%*	$dt_{ИНС}$, *%*	*dHV, %*
((V,Ti) + (V,Ti)N) x18	36	11,4	0,3	2,60	129	2269	4	1	0
((V,Ti) + (V,Ti)N) x5	10	10,9	1,8	12,1	1739	2110	2	1	2
((V,Ti) +(V,Ti)N) x2	4	9,7	4,3	11,9	1802	2243	1	9	1
((V,Ti) + (V,Ti)N) x2	4	6,7	2,5	11,47	772	1600	2	7	2
((V,Ti) + (V,Ti)N) x2	4	6,8	2,7	11,3	810	1589	6	15	3
((V,Ti) + (V,Ti)N) x2	4	6,4	2,6	11,5	788	1592	7	3	1
(V,Ti)N x8	16	5,1	0,3	1,9	76	1227	2	15	6
(V,Ti)N x3	6	7,1	1,9	11,5	662	1661	2	6	1

Примечание – Обозначения даны в соответствии с Таблицей 7.1



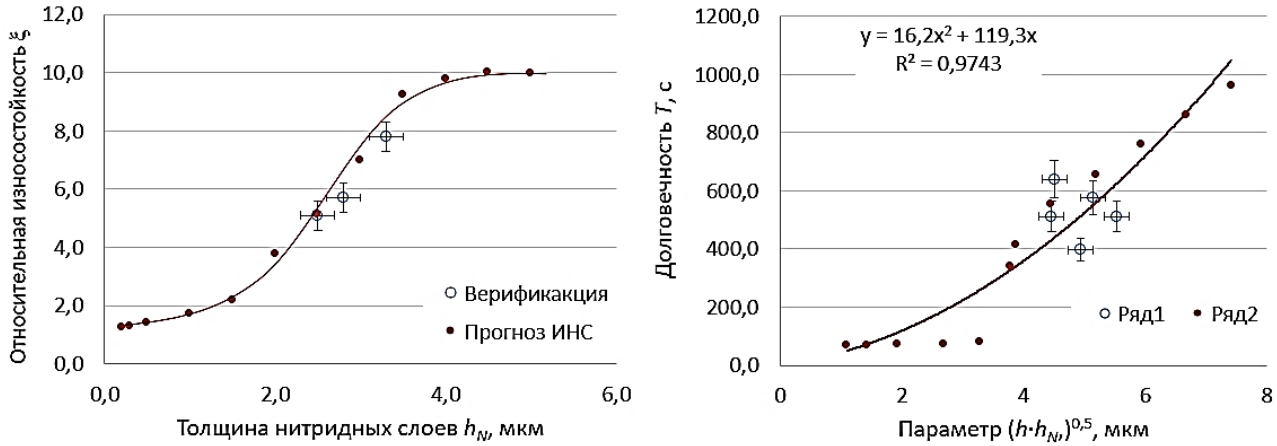
а *б*

а – относительная износостойкость; *б* – долговечность

Рисунок 7.4 – Пример результата работы ИНС в виде прогнозных кривых многослойных покрытий типа Ti+Ti*N

По приведенным выше графикам, приведенным на Рисунках 7.4 а – 7.6 а, для каждого типа покрытия был выполнен прогноз максимальной величины относительной износостойкости ξ_{max}. Для многослойных покрытий типа Ti-Ti*N – ξ_{max} = 7,1; для покрытий типа (V, Ti)+(V, Ti*)N – ξ_{max} = 7,8; для покрытий типа (V, Ti)+(V, Ti)N – ξ_{max} = 12,0.

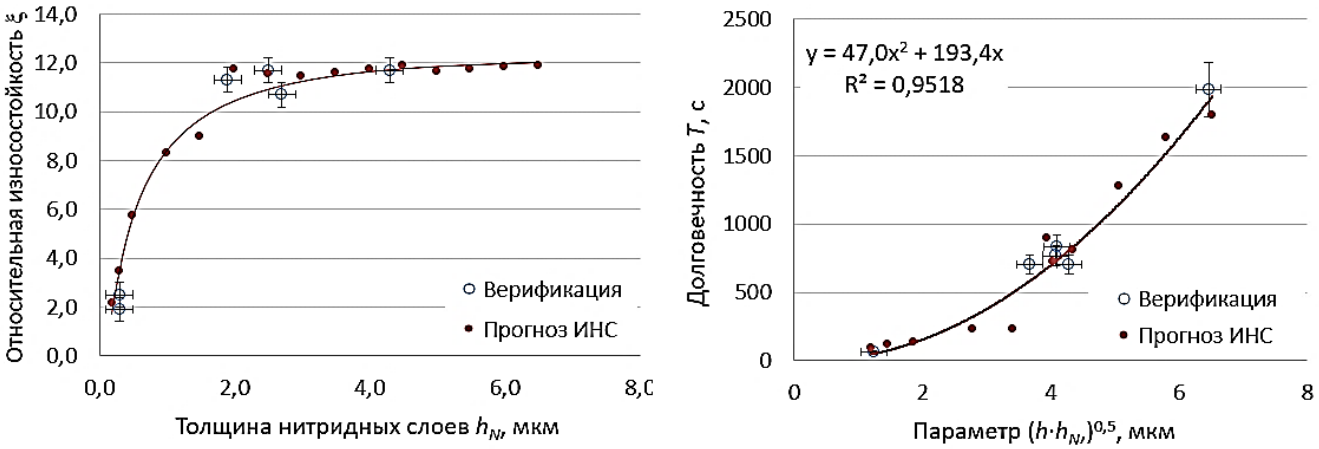
На графиках, приведенных на Рисунках 7.4 а и 7.6 а видно, что величина относительной износостойкости в зависимости от толщины нитридных слоев h_N меняется от 1 (минимальная величина, равная износостойкости основы) до максимальной величины $\xi \approx 12$. При этом при монотонном увеличении толщины нитридных слоев величина относительной износостойкости меняется не линейно.



а *б*

а – относительная износостойкость; *б* – долговечность

Рисунок 7.5 – Пример результата работы ИНС в виде прогнозных кривых многослойных покрытий типа (V, Ti)+(V, Ti*)N



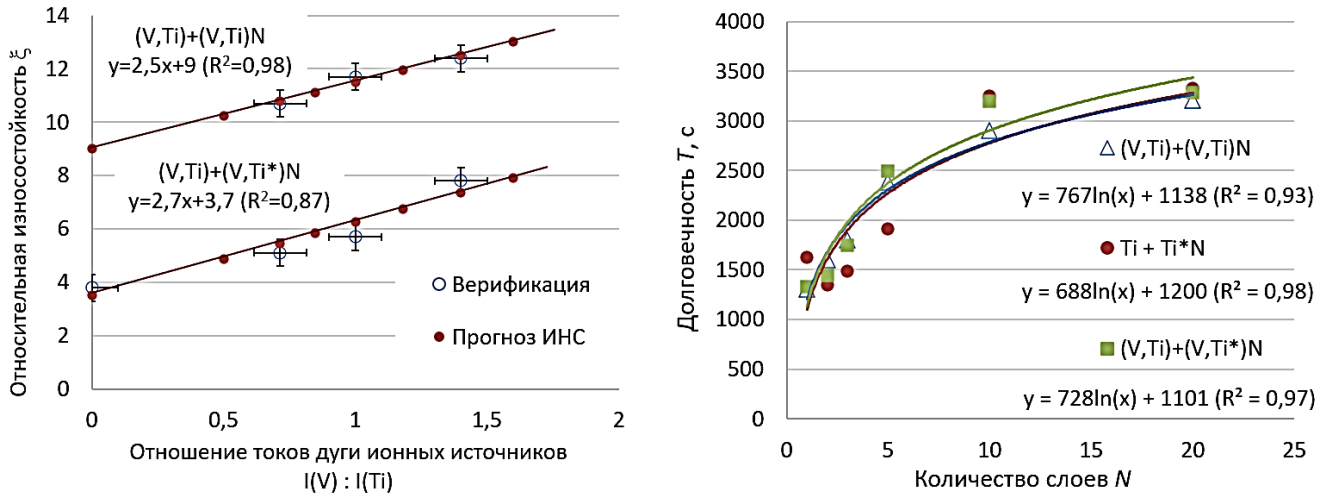
а *б*

а – относительная износостойкость; *б* – долговечность

Рисунок 7.6 – Пример результата работы ИНС в виде прогнозных кривых многослойных покрытий типа (V, Ti)+(V, Ti)N

Установлено, что минимальная износостойкость исследуемых покрытий наблюдается при толщине $h_N < 1$ мкм, а при $h_N > 4$ мкм она достигает своего максимального значения и далее, с ростом h_N практически не изменяется. Таким образом, подтверждается теоретическое предположение о том, что для обеспечения максимальной износостойкости при газоабразивном износе необходимо, чтобы толщина нитридных слоев многослойного покрытия была равна некоторой

критической величине h^*_N. Для принятых условий газоабразивного изнашивания (размер, скорость и масса абразивных частиц) установлены следующие величины: h^*_N = 4,0 мкм – для покрытий типа Ti+Ti*N; h^*_N = 3,5 мкм – для покрытий типа (V,Ti)+(V,Ti*)N; h^*_N = 2,0 мкм – для покрытий типа (V,Ti)+(V,Ti)N.



а *б*

а – относительная износостойкость; *б* – долговечность

Рисунок 7.7 – Результат работы ИНС в виде прогнозных кривых титан-ванадиевых покрытий

При толщинах $h_N < 1$ мкм покрытие практические не проявляет своих защитных свойств, что с вязано с потерей механической прочности относительно тонких нитридных слоев при ударном взаимодействии с абразивными частицами. Подробно этот вопрос рассмотрен в пункте 2.4, глава 2.

Теоретически показано (пункт 2.2, глава 2) и экспериментально подтверждено (пункт 5.4.4, глава 5), что промежуточные сравнительно более пластичные титановые и титан-ванадиевые слои являются барьерами для развития хрупких трещин, возникающих в нитридных слоях исследуемых многослойных покрытий. Этот вывод подтверждается на Рисунке 7.7 б, где видно, что для всех типов исследуемых покрытий с увеличением количества промежуточных слоев долговечность увеличивается по одинаковому логарифмическому закону. Необходимо отметить, что полученный результат был установлен для покрытий с толщиной нитридных слоев выше критической $h_N \geq h_N^*$.

Результаты математического моделирования газоабразивного износа полностью подтверждаются теоретическими и экспериментальными исследованиями влияния толщины и количе-

ства слоев многослойных покрытий на износостойкость. Таким образом, разработанная математическая модель может быть использована для прогнозирования результатов ускоренных испытаний на газоабразивный износ образцов из титановых сплавов с многослойными ионно-плазменными покрытиями на основе титана, ванадия и их нитридов в принятом диапазоне режимов испытаний.

7.2 Нейросетевая модель каплеударной эрозии

Исходными данными для построения нейросетевой модели многослойного покрытия, работающего в условиях каплеударной эрозии, были приняты результаты экспериментальных исследований, приведенные в п. 5.2, глава 5. Математическая модель многослойного ионно-плазменного покрытия в соответствии с теоретическими исследованиями особенностей его формирования (пункт 3.1, глава 3) предполагает, что покрытие имеет известное сочетание слоев заданной толщины из материалов с известными физико-химическими свойствами, наносимых в вакуумной камере при работе нескольких ионных источников.

Для моделирования зависимости параметров каплеударной эрозии от входных параметров $\{\boldsymbol{X}\}$ и внешних задаваемых условий $\{\boldsymbol{Y}\}$ была разработана трехслойная ИНС с одним скрытым слоем и сигмоидальной функцией активации нейронов в виде $\varphi = (1+e^{k\Sigma x})^{-1}$, где k – коэффициент кривизны сигмоиды. Аналогично нейросетевой модели газоабразивного износа (пункт 7.1) при моделировании принимали $k = 0{,}5$, что обеспечило минимальную ошибку работы нейросети при ее обучении, менее 0,5%. Внутренний (скрытый) слой нейросети был введен из предположения существования нелинейной зависимости между входными и выходными данными. В качестве входных и выходных сигналов были заданы:

Входные параметры $\{\boldsymbol{X}\}$:

а) Параметры конструкции покрытия $\{\boldsymbol{X_1}\}\subseteq\{\boldsymbol{X}\}$: h, мкм – общая толщина покрытия; N – количество слоев; h_N, мкм – толщина слоев;

б) Физико-механические свойства основных материалов $\{\boldsymbol{X_2}\}\subseteq\{\boldsymbol{X}\}$: α, $К^{-1}$ – коэффициент теплового расширения; ρ, кг/м^3 – плотность; $\sigma_{0,2}$, МПа – условный предел текучести; E, МПа – модуль упругости; ν – коэффициент Пуассона; p_{max}, МПа – максимальная контактная нагрузка разрушения, определяемая при инструментальном индентировании;

в) Технологические параметры $\{\boldsymbol{X_3}\}\subseteq\{\boldsymbol{X}\}$: $I_д$, А – ток дуги ионного источника; p_{Ar}, Па – давление плазмообразующего газа; p_N, Па – давление реакционного газа.

Параметры внешней среды $\{\boldsymbol{Y}\}$: d, мм – размер капель; $С_{уд}$, м/с – скорость удара капель о

поверхность; α,° – угол атаки капельного потока; *p*, Па – давление остаточных газов в испытательной установке.

Выходные параметры {**W**}: ζ – коэффициент относительной эрозионной стойкости; m_0, кг/м^2 – величина инкубационного периода; *dE*/*dM,* м^3/кг – максимальная скорость эрозии. Внутренний (контролируемый) параметр {**Z**}: *D*, дБ – коэффициент изоляции упругой волны.

Входной слой ИНС включал в себя шестнадцать нейронов по количеству входных параметров и параметров внешней среды {X∪Y}. В выходном слое было установлено четыре нейрона, определяющие величину контролируемого параметра и характеристики служебных свойств. Количество нейронов в скрытых слоях выбирались из допущения, что количество связей между ними должно быть гарантировано больше объема обучающей выборки. Схема использованной ИНС показана на Рисунке 7.8.

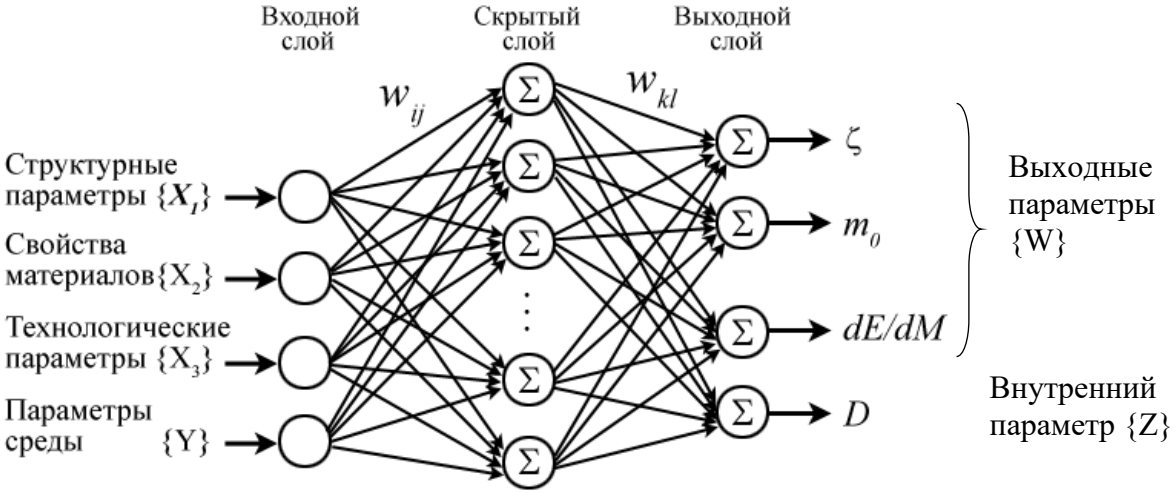
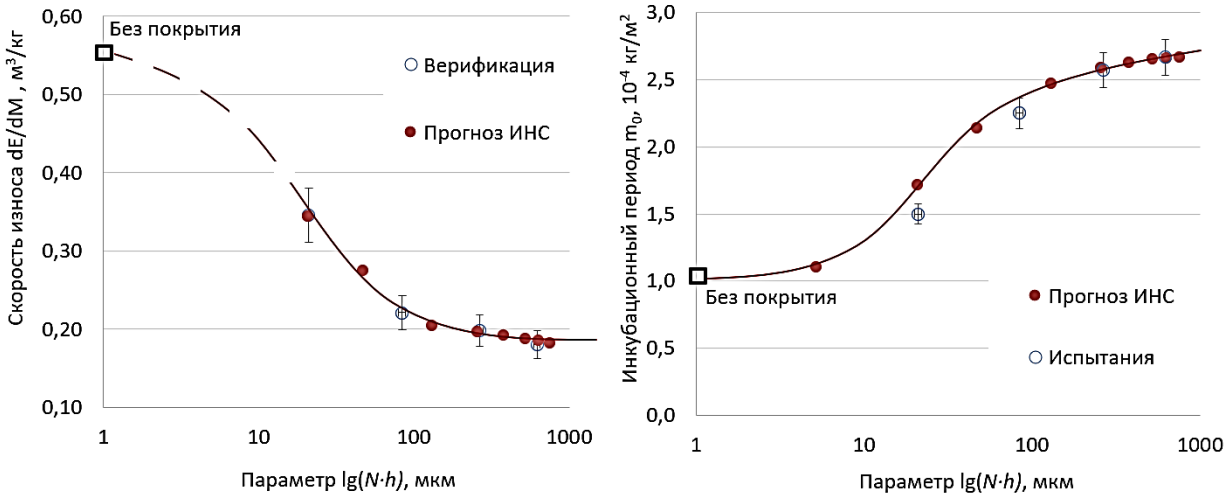


Рисунок 7.8 – Структурная схема ИНС для прогнозного моделирования свойств многослойных ионно-плазменных покрытий в условиях каплеударной эрозии

Для подготовки нейросети к работе проводилось ее обучение методом обратного распространения (Backpropagation algorithm) аналогично ИНС газоабразивного износа (пункт 7.1). Обучающая выборка была сформирована на основе экспериментальных данных, полученных в ходе испытаний различных многослойных покрытий на каплеударную эрозию (подробнее об испытаниях пункт 5.2, гл. 5). Обучение нейросети принималось удовлетворительным при достижении средней величина ошибки обучения ($\Delta_{ср}$) – не более 0,01, максимальной ошибки обучения (Δ_{max}) – не более 0,005. После обучения на вход ИНС подавали входные данные, соответствующие исследуемым многослойным ионно-плазменным покрытиям типа Ti+TiN, с различными толщинами нитридных слоев (h_N). В результате работы ИНС на выходе были получены прогнозные величины коэффициента относительной эрозионной стойкости ($\zeta_{ИНС}$), величина инкубационного

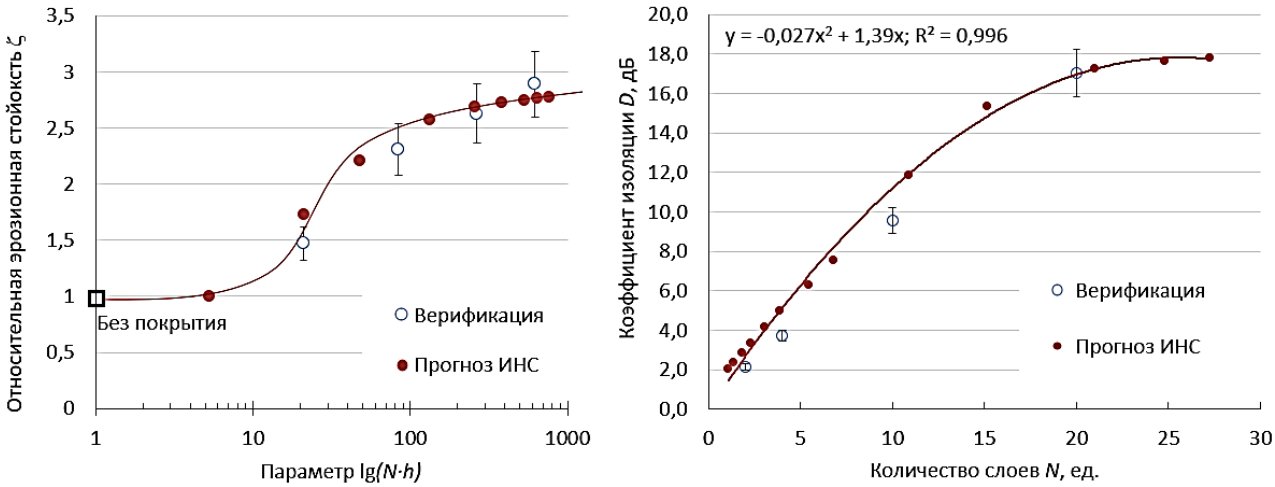
периода (m_0, кг/м^2) и максимальная скорость эрозии (dE/dM, м^3/кг). Графики изменения этих характеристик для различных типов покрытий показаны на Рисунках 7.9 и 7.10. Для верификации работы ИНС в случайном порядке принимали значения из сводной Таблицы И.2 экспериментальных данных, приведенной в Приложении И. Для каждой характеристики были рассчитаны относительные погрешности по формуле (7.3). Рассчитанные величины ζ, m_0, dE/dM, D, а также их относительные погрешности приведены в Таблице 7.4.



а *б*

а – скорость износа при каплеударной эрозии; б – инкубационный период

Рисунок 7.9 – Результат работы ИНС в виде прогнозных кривых многослойных ионно-плазменных покрытий типа Ti+TiN



а *б*

а – относительная эрозионная стойкость; *б* – коэффициент изоляции упругой волны

Рисунок 7.10 – Результат работы ИНС в виде прогнозных кривых многослойных ионно-плазменных покрытий типа Ti+TiN

Таблица 7.4 – Прогнозируемые характеристики многослойных покрытий Ti+TiN

Обозначение покрытия	N	h, мкм	h_N, мкм	Прогнозируемые величины				Относительные погрешности			
				ζ	m_0, кг/м^2	dE/dM, м^3/кг	D, дБ	$d\zeta$, %	dm_0, %	dE/dM, %	dD, %
Ti+TiN	2	10,5	10,00	1,5	1,49	0,35	2,1	0	0	1	2
(Ti+TiN)x2	4	21	10,00	2,3	2,25	0,22	3,7	0	2	0	10
(Ti+TiN)x5	10	26,5	5,00	2,7	2,57	0,20	9,6	2	3	1	6
(Ti+TiN)x10	20	31	2,80	2,8	2,66	0,18	17,0	3	1	0	6

Примечание – Обозначения материалов: Ti – ВТ1-0; N – количество слоев; h – толщина покрытия; h_N – толщина нитридных слоев

Результатом работы ИНС явились зависимости характеристик каплеударной эрозии (ζ, m_0, dE/dM) от параметров исследуемых покрытий, позволившие установить следующее. Многослойные ионно-плазменные покрытия на основе нитрида титана (Ti+TiN)xn обеспечивают относительную стойкость к каплеударной эрозии при принятых условиях испытаний до 2,8 раз. При этом с увеличением количества слоев N и толщины покрытия h наблюдается значительное уменьшение скорости эрозионного износа (dE/dM) в ≈ 3 раза (с 0,53 до 0,18 м^3/кг, Рисунок 7.9 а), увеличение инкубационного периода (m_0) в 2,2 раза (с $1{,}2\cdot10^{-4}$ до $2{,}7^{-4}$ кг/м^2, Рисунок 7.9 б) и эрозионной стойкости покрытия (ζ) в 2,8 раза (Рисунок 7.10 а).

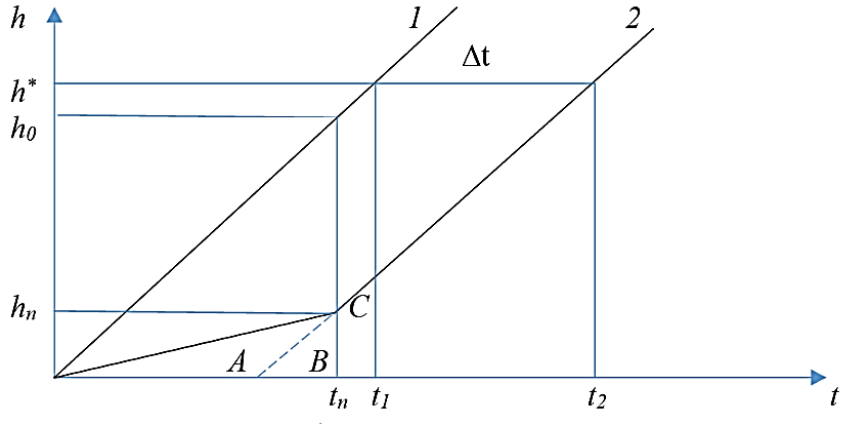
Для установления зависимостей износостойкости от параметров конструкции покрытий введен интегральный критерий $\lg(N\cdot h)$ при изменении которого исследуемые характеристики износостойкости (dE/dM, m_0 и ζ) изменяются по сигмоидальному закону. На указанных выше рисунках видно, что в диапазоне значений параметра $\lg(N\cdot h)$ от 10 до 100 наблюдается резкое увеличение износостойкости, которое далее, с увеличением N и h изменяется не значительно. Наблюдаемый переходный процесс, вероятнее всего, возникает вследствие способности многослойных покрытий рассеивать упругие волны, возникающие от удара капель. Эффективность рассеяния упругих поверхностных волн показана на графике зависимости коэффициента изоляции (D) от количества слоев (N), который носит асимптотический характер (Рисунок 7.10 б). Для исследуемых многослойных покрытий Ti+TiN коэффициент $D \approx 18$ дБ, что соответствует относительной эрозионной стойкости $\zeta \approx 3$. Приведенные результаты математического прогнозирования подтверждается полученными экспериментальными данными (Таблица 5.4, п. 5.2, глава 5). Таким образом, разработанная математическая модель может быть использована для прогнозирования результатов ускоренных испытаний на каплеударную эрозию образцов из титановых сплавов с многослойными ионно-плазменными покрытиями на основе нитридов титана толщинами до 30 мкм.

7.3 Прогнозирование эксплуатационной долговечности лопаток с покрытиями при газоабразивном износе

Разработанная математическая модель ускоренных испытаний многослойных ионно-плазменных покрытий (п.7.1), позволяет для любого многослойного покрытия, получаемого при осаждении Ti, V и их нитридов с заданным сочетанием толщин (от 0,1 до 10 мкм), построить кривую износостойкости $h = f(t)$, где h – величина износа; t – длительность испытаний», Рисунок 7.11.

Зная величину предельного износа (h^*) материала детали (на основе технических требований или опыта эксплуатации), по построенным кривым можно определить долговечность материала без покрытия (t_1) и материала с испытываемым защитным покрытием (t_2). При этом, для материала без покрытия (кривая *1*, Рисунок 7.11) средняя скорость износа является условно постоянной величиной $v_0 = h_0 / t_n$, поэтому долговечность основного материала (t_1) можно определить из отношения:

$$t_1 = h^* \cdot (t_n / h_0)\ , \text{ч.} \qquad (7.4)$$



1 – материал без упрочнения; *2* – материал с испытываемым износостойким покрытием; t_n, ч – долговечность покрытия; t_1, t_2, ч – долговечности испытываемых образцов, соответствующие кривым *1* и *2*; h^*, мм – задаваемая величина предельного (недопустимого) износа; h_n, мм – толщина покрытия; h_0, мм – величина износа материала без покрытия за время t_n

Рисунок 7.11 – Кривые износостойкости при газоабразивном износе

У образцов с покрытием на кривой износостойкости (кривая *2* на Рисунке 7.11) можно условно выделить два участка. Первый участок (0...t_n) относится к износу самого покрытия, который протекает со скоростью $v_n = h_n / t_n$. После срабатывания покрытия износу начинает подвергаться основной материал образца, при этом скорость износа со временим будет увеличиваться

и стремиться к скорости износа основного материала v_0. Положим, что при оценке эксплуатационной долговечности упрочненной детали время ее работы ($t_э$) должно значительно превышать долговечность самого покрытия: $t_э >> t_п$. При этом условии второй участок кривой износостойкости можно в пределе рассматривать как прямолинейный с постоянной скоростью износа, равной скорости износа основного материала v_0. В этом случае длительность испытания детали с защитным покрытием до достижения ею предельной величины износа (h^*) равна:

$$t_2 = t_1 + \Delta t, \text{ ч}, \tag{7.5}$$

где из Рисунка 7.11 следует:

$$\Delta t = t_п - AB = t_п - CB / \text{tg}\angle CAB = t_п - h_п / v_0 = t_п(1 - h_п / h_0), \text{ ч}. \tag{7.6}$$

Подставляя (7.4) и (7.6) в (7.5), окончательно получим прогнозируемую долговечность детали с покрытием до достижения ею заданной предельной величины износа (h^*) при проведении ускоренных испытаний на газоабразивный износ:

$$t_2 = \frac{t_п}{h_0}(h^* + h_0 - h_п), \text{ч}, \tag{7.7}$$

где величины h определяются по кривым износостойкости (Рисунок 7.11).

Результаты ускоренных испытаний широко применяются для прогнозного расчета эксплуатационной долговечности материала деталей, для чего определяют коэффициент ускорения испытаний [297-299]. В соответствии с ГОСТ Р 51372-99 под коэффициентом ускорения испытаний понимают величину, показывающую, во сколько раз уменьшается значение показателей долговечности при испытаниях относительно значений показателей долговечности в эксплуатации:

$$T_э = t_и \cdot K_{уск}, \text{ ч}, \tag{7.8}$$

где $T_э$ – эксплуатационная долговечность по предельному критерию (h^*), ч;

$t_и$ – долговечность при ускоренных испытаниях, ч;

$K_{уск}$ – коэффициентом ускорения испытаний.

Коэффициент ускорения испытаний многослойных покрытий на газоабразивный износ может быть определен через коэффициент абразивности, характеризующий соотношение

свойств абразива и испытываемого материала при известных условиях изнашивания [300]. В соответствии с ГОСТ 21708–96 коэффициент абразивности (K_a) рассчитывают по формуле:

$$К_а = \frac{\Delta m \cdot sin^{\pi}/_4}{\rho \cdot \eta \cdot \omega_а^2 \cdot m_а}, \frac{м^2}{Н} \quad , \tag{7.9}$$

где Δm – изменение массы образца после воздействии на него газоабаразивного потока, кг;

m_a – масса абразива, кг;

ρ – плотность материала образца, кг/м^3;

η – коэффициент попадания абразивных частиц на изнашиваемую поверхность;

$\omega_а$ – скорость движения газового потока, м/с.

Изменение массы изнашиваемого материала в формуле (7.9) представим в виде:

$$\Delta m = h \cdot S \cdot \rho, \text{ кг}, \tag{7.10}$$

где h – величина линейного износа, м;

S – площадь изнашиваемой поверхности, м^2;

ρ – плотность материала образца, кг/м^3;

Массу абразива в газовом потоке выразим через его концентрацию: $m_a = c \cdot S \cdot \omega_a \cdot t$, где c – концентрация абразивных частиц, кг/м^3; t – время воздействия на изнашиваемую поверхность площадью, с. Подставив эти выражения в (7.9) и упростив, найдем время воздействия абразивного потока (t), необходимое для достижения заданной предельной величины износа (h^*):

$$t = \frac{h^* \cdot sin\alpha}{K_a \cdot \eta \cdot c \cdot \omega_а^3}, \text{ ч}, \tag{7.11}$$

где h^* – предельная величина линейного износа, мм;

K_a – коэффициент абразивности, м^2/Н;

η – коэффициент вероятности попадания частиц на поверхность;

c – массовая концентрация абразивных частиц в потоке, кг/м^3;

ω – скорость газового потока;

α – угол атаки абразивного потока в диапазоне (0; π/2].

Справедливость полученного выражения подтверждается в работе, посвященной экспериментальному исследованию процесса газоабразивного износа [301].

Подставляя формулу (7.11) в (7.8), после сокращения коэффициент ускорения испытаний

можно записать в виде:

$$K_{\text{уск}} = \frac{T_{\text{э}}}{t_{\text{и}}} = \frac{\eta_{\text{и}} c_{\text{и}} \omega_{\text{и}}^3}{\eta_{\text{э}} c_{\text{э}} \omega_{\text{э}}^3}, \quad (7.12)$$

где обозначение переменных принято в соответствии с формулой (7.11), взятое с индексами: «*и*» – для условий ускоренных испытаний; «э» – для условий эксплуатации.

Коэффициент вероятности попадания частиц на поверхность (η), входящий в формулу (7.9), можно выразить через отношение площади изнашиваемой поверхности (S_0, мм^2) к площади абразивного потока (S_a, мм^2), определенные в одном сечении. Принимая нормальное распределение абразивных частиц по поверхности образцов при ускоренных испытаниях, имеем:

$$\eta_{\text{и}} = \frac{S_0}{S_a} p_{max}(x) = \frac{S_0}{S_a} (2\pi\sigma^2)^{-\frac{1}{2}}, \quad (7.13)$$

где $p_{max}(x)$ – максимальная величина вероятного распределения абразивных частиц по изнашиваемой поверхности образца, учитывающая их случайный характер взаимодействия и неравномерность износа с максимум в центральной части площадки износа;

σ – дисперсия распределения абразивных частиц по площадке контакта, принимаемая $\sigma \approx b/6$ с учетом правила «3σ», где b – ширина площадки контакта, мм.

Для условий эксплуатации рабочих лопаток, коэффициент вероятности (η) можно определить, зная закономерность распределения плотности абразивных частиц по высоте детали:

$$\eta_{\text{д}} = \frac{S_{\text{д}}}{S_a} \psi_{max}(y), \quad (7.14)$$

где $S_Д$ – изнашиваемая площадь детали, мм^2;

S_a – площадь абразивного потока, мм^2,

$\psi_{max}(y)$ – максимальная величина вероятного распределения абразивных частиц по высоте детали в плоскости сечения потока.

Величина ψ_{max} может быть получена при газодинамическом расчете абразивного потока в двигателе [302, 306] или определена замерами фактически изношенной лопатки (Рисунок 7.12) из предположения максимальной плотности и скорости абразивного потока в области ее торцевого сечения:

$$\psi_{max} = \Delta b / I, \quad (7.15)$$

где Δb – средняя величина износа хорды пера лопатки на расстоянии 1 мм от торца ее пера, мм^2;

I – суммарная величина линейного износа по высоте лопатки, мм^2.

Рисунок 7.12 – Пример оценки вероятности распределения абразивных частиц $\psi(y)$ по высоте пера при износе рабочих лопаток компрессора ГТД

Рассчитав по формуле (7.12) коэффициент ускорения испытаний ($K_{уск}$), эксплуатационная долговечность образцов с покрытиями ($T_п$) до достижения ими заданной предельной величины износа (h^*) с учетом выражений (7.7) и (7.8) может быть записана в виде:

$$T_{\text{п}} = K_{\text{уск}} \frac{t_{\text{п}}}{h_0}(h^* + h_0 - h_{\text{п}}), \text{ч} \qquad (7.16)$$

где соответствующие величины h определяются по кривым износостойкости (Рисунок 7.11).

Если для детали без упрочнения известно время достижения предельного износа (T^*, ч), полученное, например, при натурных испытаниях или из опыта эксплуатации, то формулу (7.16) с учетом (7.4) можно записать в виде:

$$T_{\text{п}} = K_{\text{уск}}\left(\frac{t_{\text{п}}}{h_0}h^* + \frac{t_{\text{п}}}{h_0}(h_0 - h_{\text{п}})\right) = K_{\text{уск}}\left(t_1 + t_{\text{п}}(1 - \frac{h_{\text{п}}}{h_0})\right), \text{ч}. \qquad (7.17)$$

Подставляя сюда известное время ускоренных испытаний материала без покрытия (t_1) в соответствии выражением (7.12), получаем:

$$T_{\text{п}} = T^* + K_{\text{уск}} \cdot t_{\text{п}} \left(1 - \frac{h_{\text{п}}}{h_0}\right), \text{ч.} \quad (7.18)$$

Зная коэффициент относительной износостойкости, определяемый при ускоренных испытаниях $\xi \approx h_0 / h_n$, подставив его в (7.18), получаем итоговую формулу для расчета прогнозируемой эксплуатационной долговечности деталей с покрытиями, работающих в условиях газоабразивного износа:

$$T_{\text{п}} = T^* + K_{\text{уск}} \cdot t_{\text{п}} \cdot \left(\frac{1-\xi}{\xi}\right), \text{ч} \quad (7.19)$$

7.4 Расчетное прогнозирование свойств многослойных покрытий при длительной эксплуатации лопаток компрессора ГТД

Расчетное прогнозирование эксплуатационной долговечности лопаток компрессора из титановых сплавов с нанесенным защитным покрытием проводили применительно к условиям эксплуатации наземных и авиационных ГТД в составе газоперекачивающих агрегатов и электрогенераторов электростанций на базе ГТД АЛ-31СТ и АЛ-31СТЭ, генератора сжатого воздуха ГСВ-95 и ГТД вертолетов НЦВ «Миль-Камов» различных модификаций.

Газотурбинные двигатели наземного базирования семейства АЛ-13СТ, являясь приводом для газоперекачивающих агрегатов серии ГПА-16Р «Уфа» и турбогенераторов энергоустановок ГТЭ-18 мощностью 18 МВт, эксплуатируется на предприятиях ПАО «Газпром» с 1996 года. Межремонтный ресурс этого двигателя в соответствии с ТЗ ГПА-001-99 и 29.02ТУ составляет 25000 часов. Рабочие и направляющие лопатки компрессора, изготовленные из титанового сплава ВТ6, представляют из себя сложный аэродинамический профиль с толщиной входной и выходной кромок ≈ 0,3 мм. Максимальная скорость вращения лопаток компрессора низкого давления составляет ω = 476 м/с. При этом максимальный допустимый износ профиля пера лопаток по уменьшению его хорды составляет для рабочих лопаток 1, 2-й ступени – 2,0 мм и для рабочих лопаток 6-й ступени – 1,5 мм. [304, 305]. Двигатели наземного базирования, работающие в составе ГПА и ГТЭ, оснащены специальными пылеулавливающими и фильтрационными устройствами, позволяющими сепарировать твердые абразивные частицы до десятков микрон. Для расчетов принят максимальный размер абразивных частиц в проточной части двигателя до 40 мкм с концентрацией c = 0,2 г/м^3, соответствующей промышленным зонам [306, 306].

Генератор сжатого воздуха ГСВ-95 с приводом от авиационного ГТД Р95Ш, используется для продувки магистральных газо- и нефтепроводов. Назначенный межремонтный ресурс этого двигателя составляет 1 000 часов. В работах [303, 306] приведены некоторые результаты преждевременного вывода из эксплуатации двигателя, проработавшего 128 часов на территории полупустынь Ставропольского края в условиях повышенной концентрации абразивных частиц. Прекращение эксплуатации произошло вследствие трёх последовательных помпажей на режиме холостого хода. Предельному состоянию соответствовал износ хорды в периферийном сечении рабочих лопаток 6-й ступени КВД из титанового сплава, составивший до 75% (≈ 25 мм). Характерный диаметр абразивных частиц ≈ 20 мкм, относительная скорость частиц при ударе с лопатками 373 м/с, расчетная концентрация частиц c = 500 мг/м^3 [306].

Рабочие лопатки компрессора турбовальных авиационных двигателей семейств ТВ3-117 (ПАО «Мотор-Сич») изготавливаются из титанового сплава ВТ-8 со сравнительно тонким аэродинамическим профилем. Наиболее изнашиваемой лопаткой, определяющей предельное состояние компрессора ТВ3-117 по частоте собственных колебаний, является рабочая лопатка КНД 3-й ступени [308]. По данным этого источника при наработке двигателя 740 часов РЛ КНД 3-й ступени выходит за допустимые переделы на собственные частоты колебаний по частоте основного тона от 830 до 925 Гц. При этом износ хорды в периферийной части пера лопатки, соответствующий предельному состоянию по частоте основного тона, составляет 3,5 мм. Межремонтный ресурс двигателей этого типа по данным различных источников [308-310] составляет ≈1000 ч.

Исследования запыленности при работы этих авиационных двигателей были проведены в работе [311], где было установлено, что максимальная концентрация пыли c = 0,20…0,25 г/м^3 наблюдается при полетах на высотах от 3 до 5 м на умеренных скоростях до 70 км/ч. Максимальная скорость соударений абразивных частиц с лопатками в этих условиях составляет 260 м/с, при этом отмечается [312], что износ лопаток по уменьшению массы прямо пропорционален произведению концентрации абразивных частиц и относительной скорости потока в степени 2,8, что косвенно подтверждает принятый критерий ускорения испытаний (7.12).

Рассмотренные характеристики ГТД, указанные в Таблице 7.5, были использованы при расчете прогнозируемого эксплуатационного ресурса компрессорных лопаток из титановых сплавов с многослойными ионно-плазменными покрытиями по результатам их ускоренных испытаний. Расчет эксплуатационной долговечности проводился для рабочих лопаток наиболее нагруженных ступеней компрессора. В качестве защитных покрытий рассматривали наиболее износостойкие из исследованных в настоящей работе – многослойные ионно-плазменные покрытия: Ti+Ti*N и (V,Ti)+(V,Ti)N. Характеристики и свойства защитных покрытий приведены в Таблице 7.6.

Таблица 7.5 – Характеристики наземных установок и авиационных ГТД с лопатками компрессора из титановых сплавов, эксплуатирующихся в запыленной атмосфере

Установка	ГТД, ступень	Конц-я частиц c, мг/м^3	Скорость удара ω, м/с	Пред. износ h^*, мм	Коэф-т вероятности $\eta \cdot 10^{-3}$	Меж-рем. ресурс T^*, ч
Уфа-16М [304, 305]	АЛ-31СТ, 1,2 ст. КНД	0,2	476	2,0	4,9	25000
	АЛ-31СТ, 6 ст. КВД	0,2	417	1,5	2,2	25000
ГСВ-95 [303, 306]	Р95Ш, 6 ст. КВД	200	373	25	4,1	128
ТВ3-117 [311, 312]	1 ст. КНД	100	260	2	2,7	1000
	6 ст. КВД	100	230	2	2,4	1050
Испытания п.5.1, глава 5	–	5900	110	–	387	–

Примечание – Приведены максимальные величины

Таблица 7.6 – Многослойные ионно-плазменные покрытия, рекомендованные к применению на рабочие лопатки ГТД, эксплуатирующихся в запыленной атмосфере

Вариант покрытия	Толщина покрытия h, мкм	Относительное повышение предела выносливости $\Delta\sigma_{-1}$	Относительная износостойкость ξ	Долговечность покрытия t_n, с
((V,Ti)+(V,Ti)N)x5	12±1,5	11,6%	12,3	2700
((V,Ti)+(V,Ti)N)x2	7±1	17,7%	11,7	1300
(Ti+Ti*N)x5	12±1,5	11,1%	4,9	1000

Примечания – Приведенные характеристики покрытий были определены при ускоренных испытаниях, описанных в пунктах 5.1 и 5.4, глава 5; Ti* – титановый сплав ВТ20 (TiAlZrVMo).

Указанные варианты покрытий были выбраны по результатам ускоренных испытаний на газоабразивный износ и многоцикловую усталостную прочность (пункт 5.1, 5.4, глава 5). Покрытия представляют собой многослойные композиции общей толщиной от 6 до 15 мкм с не менее чем четырьмя слоями, содержащими Ti, V и их нитриды (подробно металлографические исследования приведены в п. 5.5, глава 5).

Расчет прогнозируемой эксплуатационной долговечности проводили по формулам (7.12),

(7.19) по исходным данным, приведенным в Таблице 7.5 и Таблице 7.6. Результаты расчетов, приведенные в Таблице 7.7, показывают, что наиболее перспективным покрытием, рекомендуемом для нанесения на рабочие лопатки компрессора ГТД, работающих в условиях газоабразивного износа, является десятислойное покрытие ((V, Ti)+(V, Ti)N)x5 состоящее из чередующихся слоев Ti, V и их нитридов толщиной от 0,5 до 2,5 мкм. Это покрытие, общей толщиной 12±1,5 мкм, нанесенное в сочетании с ионной имплантации азота, обеспечивает повышение предела выносливости лопаток компрессора из титанового сплава ВТ6 на 11,6% (от 344 до 384 МПа, пункт 5.4, глава 5) и прогнозируемую величину эксплуатационной долговечности рабочей лопатки 1-й ступени КНД – до 130% (до 57 380 ч); рабочей лопатки 2-й ступени КВД АЛ-31СТ – до 182% (до 70 700 ч). График прогнозируемой величины износа входных кромок рабочих лопаток КНД 1 ст. ГТД АЛ-31СТ с различными покрытиями показан на Рисунке 7.13.

Таблица 7.7 – Прогнозируемая величина эксплуатационной долговечности ($T_{П}$) рабочих лопаток компрессора ГТД с покрытиями

Вариант обработки	АЛ-31СТ, 1, 2 ст. КНД	АЛ-31СТ, 2 ст. КВД	Р95Ш, 6 ст. КВД	ТВ3-117 3 ст. КНД**	ТВ3-117 6 ст. КВД
((V,Ti)+(V,Ti)N)x5	57380 ч (130%)	70700 ч (182%)	1920 ч (92%)	1330 ч (33%)	2070 ч (107%)
((V,Ti)+(V,Ti)N)x2	40520 ч (62%)	60710 ч (143%)	1440 ч (44%)	1160 ч (16%)	1510 ч (51%)
(Ti+Ti*N)x5	35390 ч (42%)	48900 ч (96%)	1290 ч (29%)	1110 ч (11%)	1340 ч (34%)

Примечания – Цифры в скобках содержат относительное увеличение эксплуатационной долговечности ($\Delta T/T^{*}\cdot 100\%$); Ti* – титановый сплав ВТ20 (TiAlZrVMo); ** – наиболее изнашиваемая ступень лопаток КНД по данным [308]

Рабочие лопатки компрессора ГТД АЛ-13СТ с износостойким покрытием проходили эксплуатацию в составе ГПА-16Р «Уфа» на КС-18А «Москово», газопровод «Уренгой-Новопсков» (ООО «Газпром трансгаз Уфа»). Общая наработка лопаток до съема с двигателя составила 3 600 часов. При внешнем осмотре следов износа и эксплуатационных дефектов покрытия на пере лопаток не выявлено. Все кромки находятся в отличном состоянии. Внешний вид лопаток после эксплуатации показан на Рисунке 7.14. Величина наработки деталей показана вертикальной линией на Рисунке 7.13, что подтверждает расчетную условно бездефектную эксплуатацию лопаток с покрытием. Дополнительным положительным эффектом от нанесения покрытия на лопатки было отмечено отсутствие или значительно меньшее по толщине солеотложение на пере лопаток,

что позволяет отказаться от их промывки и сократить время на сервисное обслуживание двигателя в целом.

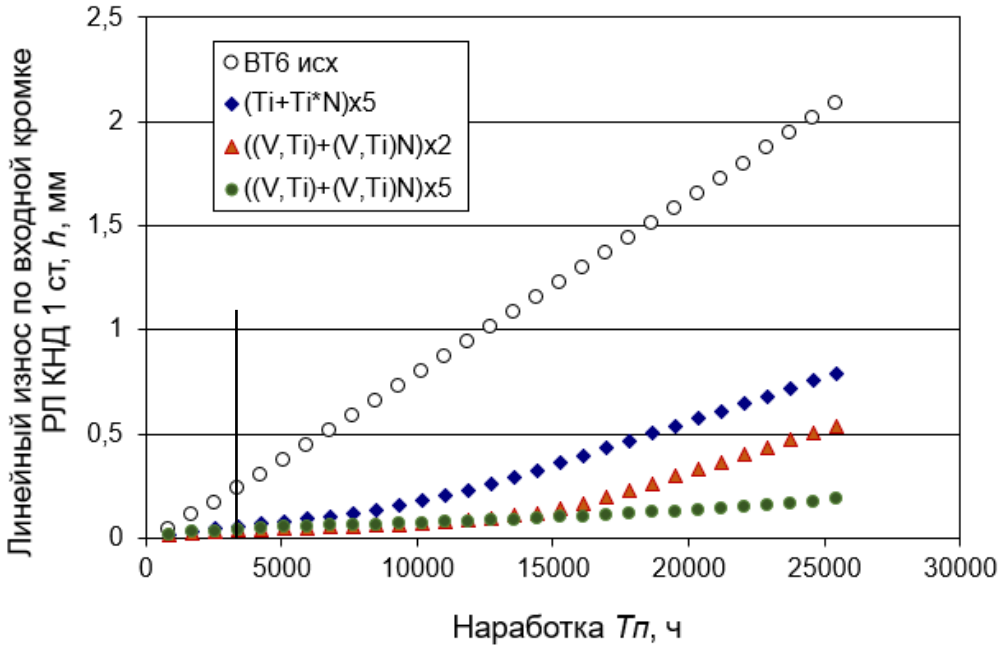
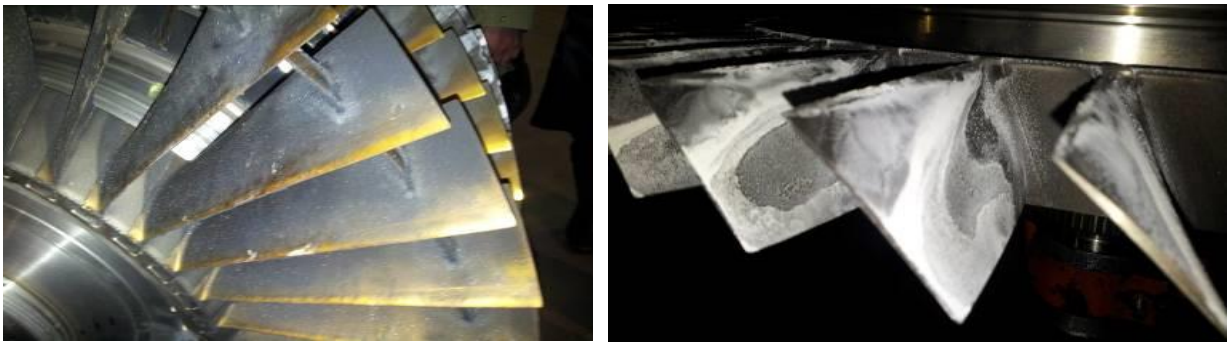


Рисунок 7.13 – Прогнозируемая динамика максимальной величины износа входных кромок рабочих лопаток КНД 1 ст. ГТД АЛ-31СТ с различными вариантами покрытия в течение межремонтного периода. Вертикальной линией указано время межремонтного осмотра лопаток после наработки T = 3600 ч (Рисунок 7.14)



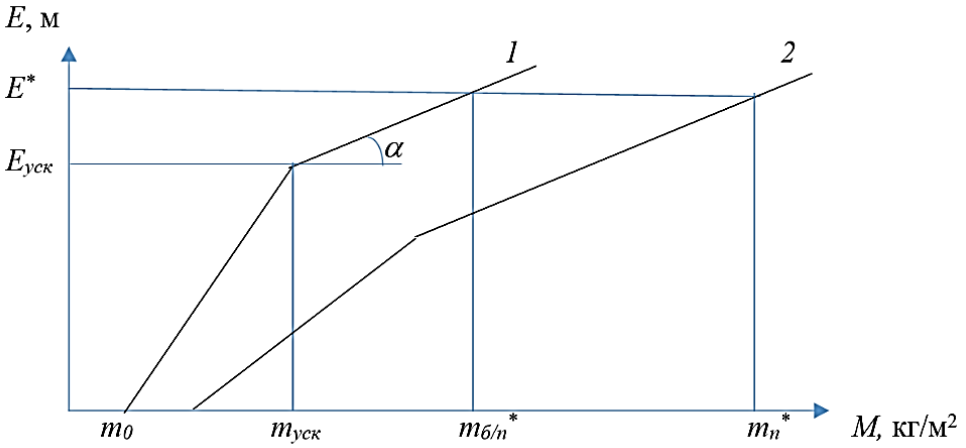
а *б*

а – лопатки КНД 1-й ступени с износостойким покрытием, минимальное солеотложение;
б – лопатки КНД 3-й ступени без покрытия с солевыми отложениями (для сравнения)

Рисунок 7.14 – Рабочие лопатки компрессора ГТД АЛ-31СТ после эксплуатации, наработка 3600 часов (по данным ПАО «ОДК-УМПО»)

7.5 Прогнозирование эксплуатационной долговечности лопаток с покрытиями при каплеударной эрозии

Расчет эксплуатационной долговечности при каплеударной эрозии проводился по кривым износостойкости аналогично газоабразивному износу (пункт 7.3) с учетом следующих особенностей. При каплеударной эрозии потеря массы образца или детали происходит на стадиях ускоренного износа (приработки) и нормального износа, после окончания инкубационного периода и накопления усталостных дефектов. Характерный внешний вид кинетических кривых эрозионного износа, получаемых при ускоренных испытаниях материалов на каплеударную эрозию показан на Рисунке 7.15.



1 – материал без упрочнения; *2* – материал с износостойким покрытием; E^* – предельная величина износа, мм; $E_{уск}$ – ускоренный износ материала, мм; m_0 – количество влаги, выпавшее на образец в течение инкубационного периода, с; $m_{уск}$ – количество влаги, соответствующее величине износа $E_{уск}$; $m_{б/п}{}^*$ – количество влаги, соответствующее предельной величине износа E^*; $m_п{}^*$ – количество влаги, соответствующее предельной величине износа образца с покрытием

Рисунок 7.15 – Кривые износостойкости при каплеударной эрозии

На эрозионной кривой можно условно выделить три участка: инкубационный период ($0…m_0$), область ускоренного износа или приработки ($m_0...m_{уск}$), область нормального износа ($M > m_{уск}$). Испытания проводили по методике НИУ «МЭИ» (г. Москва) на специализированном стенде «Эрозия», имитирующем эксплуатационные условия каплеударного воздействия на рабочие лопатки из титановых сплавов последних ступеней паровых турбин. Форсированным фактором ускоренных испытаний являлось количество влаги, воздействующей на единицу площади

изнашиваемой поверхности (M, кг/м^2). Критерием износостойкости была принято глубина износа (E, м). Подробнее о методике испытаний и полученных результатах изложено соответственно в пункте 4.10, глава 4 и пункте 5.2., глава 5.

По построенным кривым было определено количество влаги ($m^*_{б/п}$, кг/м^2) и ($m^*_{п}$, кг/м^2), необходимое для достижения принятой предельной величины износа (E^*, м) соответственно при ускоренных испытаниях материала без покрытия и с нанесенным защитным покрытием. Полагая, что при длительной эксплуатации (более 10 тыс. ч) износ материала без покрытия значительно превышает величину приработки: $E > E_{уск}$, величину ($m^*_{б/п}$, кг/м^2) можно определить по кривой *1* (Рисунок 7.15), решая уравнение:

$$m^*_{б/п} = m_{уск} + (E^* - E_{уск})/\mathrm{tg}\alpha = m_{уск} + (E^* - E_{уск})/v_н, \text{ кг/м}^2 \qquad (7.20)$$

где $m_{уск}$ – масса влаги до окончания приработки, кг/м^2 (определяется экспериментально);

$E_{уск}$ – величина износа по окончании приработки, м (определяется экспериментально);

$v_н$ – скорость нормального износа на участке $M > m_{уск}$, кг/м^2 (определяется по кривой износостойкости).

Аналогично было определено количество влаги $m^*_{п}$, кг/м^2, необходимое для достижения принятой предельной величины износа при ускоренных испытаниях материала с покрытием.

Результаты ускоренных испытаний в виде взаимосвязи количества влаги и соответствующей ей величины износа были использованы для прогнозного расчета эксплуатационной долговечности деталей. Зная количество влаги, вызывающей предельную величину износа при испытаниях (m^*, кг/м^2) и при эксплуатации ($m^*_{э}$, кг/м^2), коэффициент ускорения испытаний ($K_{уск}$) может быть представлен в виде отношения:

$$K_{\text{уск}} = \frac{m^*}{m^*_э} = \frac{T_э}{t^*}, \qquad (7.21)$$

где $T_э$ – долговечность при эксплуатации, ч;

t^* – время ускоренных испытаний до достижения предельной заданной величины износа ($t^*=m^*/W_и$), ч;

$W_и$ – скорость подачи влаги при испытаниях, кг/(м^2·ч).

Отсюда получаем:

$$T_э = t^* \frac{m^*}{m^*_э} = \frac{m^{*2}}{W_и m^*_э}, \text{ ч.} \qquad (7.22)$$

Количество влаги, вызывающей предельную величину износа деталей при их эксплуатации, можно определить, зная скорость протекания влаги ($W_э$, кг/(м^2·с)) через эрозионно-изнашиваемую ступень паровой турбины:

$$m^*_э = W_э \cdot T_{б/п} \cdot \eta, \tag{7.23}$$

где $T_{б/п}$ – время эксплуатации лопатки паровой турбины без упрочнения до достижения ею предельной величины износа, ч.

η – коэффициент вероятности попадания капель влаги на поверхность лопатки.

Величина $T_{б/п}$ может быть принята по нормативно-технической документации на лопатки или по опыту их эксплуатации, а коэффициент вероятности η можно определить по формуле (7.13), зная распределение плотности капель по высоте пера лопаток, например по результатам эксплуатации лопаток или принимая расчетные значения.

Определив величину $T_{б/п}$, с учетом (7.22) можно записать следующее отношение:

$$\frac{T_п}{T_{б/п}} = \frac{(m^*_п)^2}{W_и m^*_э} \frac{W_и m^*_э}{\left(m^*_{б/п}\right)^2} = \left(\frac{m^*_п}{m^*_{б/п}}\right)^2, \tag{7.24}$$

где $T_п$ – прогнозируемая эксплуатационная долговечность детали с покрытием, ч;

$m_{б/п}{}^*$ – количество влаги, необходимое для достижения предельного износа образцов без покрытия (E^*, м) при ускоренных испытаниях, определяемое по формуле (7.20);

$m_п{}^*$ – количество влаги, необходимое для достижения износа E^* образцов с покрытием, определяемое по формуле (7.20) на основании результатов ускоренных испытаний на каплеударную эрозию (кривая 2 на Рисунке 7.15).

Упростив формулу (7.20), окончательно получаем выражение для расчета прогнозируемой эксплуатационной долговечности рабочих лопаток паровых турбин с покрытием на основании результатов ускоренных испытаний на каплеударную эрозию:

$$T_п = T_{б/п}\left(\frac{m^*_п}{m^*_{б/п}}\right)^2, \text{ ч.} \tag{7.25}$$

7.6 Расчетное прогнозирование свойств многослойных покрытий при длительной эксплуатации лопаток паровых турбин

Прогнозирование эксплуатационной долговечности лопаток последних ступеней паровых

турбин из титановых сплавов с нанесенным защитным покрытием проводили применительно к условиям эксплуатации, принятых в соответствии с РД 153-34.1-17.462-00 «Методические указания о порядке оценки работоспособности рабочих лопаток паровых турбин в процессе изготовления, эксплуатации и ремонта» (Утверждены РАО «ЕЭС России», 23.08.2000 г.). Долговечность лопаток без упрочнения установлена на уровне межремонтного ресурса 6 лет (51,6 тыс. ч). При этом за величину предельного износа принимали уменьшение длины хорды лопаток на 10 мм.

Расчет эксплуатационной долговечности лопаток проводился для двух вариантов защитных многослойных покрытий типа Ti+TiN, характеристики и свойства которых приведены в Таблице 7.8. Указанные варианты покрытий были выбраны по результатам ускоренных испытаний на каплеударную эрозию и усталостную прочность (пункт 5.2, 5.4, глава 5). Покрытия представляют собой многослойные композиции общей толщиной от 7 до 25 мкм с чередующимися слоями, содержащими титан и его нитриды (подробно металлографические исследования покрытий приведены в пункте 5.5, глава 5).

Таблица 7.8 – Многослойные ионно-плазменные покрытия, рекомендованные к применению на рабочие лопатки паровых турбин, эксплуатирующихся в условиях каплеударной эрозии

Вариант обработки	Толщина покрытия h, мкм	Относительное повышение предела выносливости $\Delta\sigma_{-1}$	Коэффициент относительной эрозионной стойкости ζ
Без упрочнения	–	–	1,0
(Ti+TiN)	7...10	16,0%	1,47
(Ti+Ti*N)x2	20…25	4,9%	2,31

Примечания – Использованные материалы: Ti – сплав ВТ1-0, Ti* – сплав ВТ20 (TiAlZrVMo); Приведенные характеристики покрытий были получены и подтверждены при ускоренных испытаниях, описанных в пунктах 5.2 и 5.4 главы 5

Расчет прогнозируемой эксплуатационной долговечности проводили по формулам (7.21), (7.25) по исходным данным, приведенным в Таблице 7.8. Результаты расчетов прогнозируемой эксплуатационной долговечности, приведенные в Таблице 7.9, показывают, что оба варианта защитного покрытия могут обеспечить повышение эксплуатационной долговечности рабочих лопаток паровых турбин из титановых сплавов, работающих в условиях каплеударной эрозии, минимум на 7 тыс. часов, что было в последствии подтверждено на турбине К-255-162 ТЭС «Альхольма» (пункт 6.6, глава 6). Значения приведенных характеристик также подтверждены при

ускоренных испытаниях на каплеударную эрозию (пункт 5.2, глава 5).

Таким образом, наиболее перспективным покрытием, рекомендуемом для нанесения на рабочие лопатки, является четырехслойное покрытие (Ti+Ti*N)x2, состоящее из чередующихся тонких до 0,5 мкм слоев титана, легированного Al, Zr, V, Mo, и его нитридов толщиной 10 мкм. Это покрытие, общей толщиной 20^{+5} мкм, нанесенное в сочетании с ионной имплантации азота, обеспечивает повышение предела выносливости рабочих лопаток турбины из титанового сплава ВТ6 на 4,9% (от 405 до 425 МПа, пункт 5.4, глава 5) и прогнозируемую величину эксплуатационной долговечности на 12,5 тыс. ч (до 64,1 тыс. ч наработки) для паровых турбин типа К-225.

Таблица 7.9 – Прогнозируемая величина эксплуатационной долговечности рабочих лопаток паровых турбин, эксплуатирующихся в условиях каплеударной эрозии

Вариант обработки	$m_{уск}$, $\times 10^{-4}$ кг/м^2	$E_{уск}$, $\times 10^{-4}$ м	m^*_n, $\times 10^{-4}$ кг/м^2	Долговечность Tэ, тыс. ч	Увеличение долговечности ΔTэ, тыс. ч
Без упрочнения	3,5	1,2	10,7	51,6**	–
(Ti+TiN)	4,2	0,9	11,4	59,1	7,5
(Ti+Ti*N)x2	5,5	0,75	12,7	64,1	12,5

Примечания – Обозначение характеристик в соответствии с Рисунком 7.15; Ti – сплав ВТ1-0; Ti* – сплав ВТ20 (TiAlZrVMo); ** – долговечность лопаток без упрочнения принята на уровне межремонтного ресурса 6 лет в соответствии с требованиями ГОСТ 24278-2016 «Установки турбинные паровые стационарные. Общие технические требования»; $m_{уск}$, $E_{уск}$ – определены экспериментально при ускоренных испытаниях, описанных в пункте 5.2 главы 5

7.7 Выводы по главе 7

1 Показана возможность применения математического аппарата искусственных нейронных сетей для разработки многофакторной математической модели газоабразивного износа и каплеударной эрозии многослойных ионно-плазменных покрытий применительно к деталям газовых и паровых турбин.

2 Разработана математическая модель газоабразивного износа многослойных ионно-плазменных покрытий, представляющая собой многослойную однонаправленную нейронную сеть с одним скрытым слоем и сигмоидальной функцией активацией, связывающую входные

данные: параметры конструкции покрытия, свойства его материалов и технологические параметры нанесения с выходными параметрами: коэффициентом относительной износостойкости (ξ) и долговечности покрытия (t_n, ч). Граничными условиями работы нейросети приняты условия проведения ускоренных испытаний на газоабразивное изнашивание с использованием центробежного ускорителя по ГОСТ 23.201-78 «Метод испытания материалов и покрытий на газоабразивное изнашивание с помощью центробежного ускорителя».

Получены прогнозные ряды значений относительной износостойкости и долговечности многослойных покрытий типа Ti+(TiAlZrVMo)N и (V,Ti)+(V,Ti)N от толщины нитридных слоев покрытий, которые могут быть описаны непрерывными гладкими кривыми с относительной погрешностью от экспериментальных данных не более 16%.

3 В результате моделирования газоабразивного износа установлены закономерности изменения долговечности образцов из сплава ВТ6 с исследуемыми покрытиями Ti+TiN, (V, Ti)+(V, Ti)N в зависимости от количества и толщины нитридных слоев.

Установлена закономерность изменения относительной износостойкости титан-ванадиевого многослойного покрытия, увеличивающаяся в 3 раза (с 4,0 до 12,1) при изменении количественного соотношения элементов V : Ti в диапазоне от 0,1 до 4,0.

4 Разработана математическая модель каплеударной эрозии многослойных ионно-плазменных покрытий, в виде многослойной однонаправленной нейронной сети с одним скрытым слоем и сигмоидальной функцией активацией, связывающую входные данные: параметры конструкции покрытия, свойства его материалов, технологические параметры нанесения с выходными параметрами: коэффициентом относительной эрозионной стойкости (ζ); величиной инкубационного периода (m_0, кг/м^2) и максимальной скорости эрозии (dE/dM, м^3/кг). Граничными условиями работы нейросети приняты условия проведения ускоренных испытаний на каплеударную эрозию, соответствующие условиям работы паровой турбины типа К-255: диаметр капель 0,8 мм, скорость удара 400 м/с.

5 В результате моделирования каплеударной эрозии установлено, что многослойные ионно-плазменные покрытия нитрида титана типа Ti+TiN позволяют повысить стойкость к изнашиванию образцов из сплава ВТ6 при принятых условиях испытаний до 2,8 раз. При этом с увеличением количества слоев N и толщины покрытия h наблюдается значительное уменьшение скорости эрозионного износа в ≈ 3 раза (с 0,53 до 0,18 м^3/кг) и величины инкубационного периода m_0 в 2,2 раза (с $1{,}2\cdot10^{-4}$ до $2{,}7^{-4}$ кг/м^2).

6 Проведено прогнозирование эксплуатационной долговечности рабочих лопаток газовых (АЛ-31СТ, ТВ3-117, Р95Ш) и паровых турбин (типа К-255, К-1000, К-1200) из титановых

сплавов с исследуемыми покрытиями путем расчета коэффициента ускорения испытаний на газоабразивный износ и каплеударную эрозию. Граничными условиями прогнозирования были приняты предельная величина износа лопаток и величина гарантированного межремонтного ресурса.

7 Установлено, что наиболее перспективным покрытием, рекомендуемом для нанесения на рабочие лопатки компрессора ГТД, работающих в условиях газоабразивного износа, является десятислойное покрытие ((V, Ti)+(V, Ti)N)x5 состоящее из чередующихся слоев Ti, V и их нитридов толщиной от 0,5 до 2,5 мкм. Это покрытие, общей толщиной 12^{+3} мкм, нанесенное в сочетании с ионной имплантации азота, обеспечивает повышение предела выносливости лопаток компрессора из титанового сплава ВТ6 на 11,6% (от 344 до 384 МПа) и прогнозируемую величину эксплуатационной долговечности рабочей лопатки 1-й ступени КНД – в 2,3 раза (до 57,3 тыс. ч); рабочей лопатки 2-й ступени КВД АЛ-31СТ – в 2,8 раза (до 70,7 тыс. ч).

Установлено, что наиболее перспективным покрытием, рекомендуемом для нанесения на рабочие лопатки паровых турбин из титановых сплавов, является четырехслойное покрытие (Ti+(TiAlZrVMo)N)x2, состоящее из чередующихся слоев титана толщиной ≈ 0,5 мкм, легированного Al, Zr, V, Mo, и его нитридов толщиной 10 мкм. Это покрытие, общей толщиной 20^{+5} мкм, нанесенное после ионной имплантации азота (доза $D = 2 \cdot 10^{17}$ ион/см^2), обеспечивает повышение предела выносливости рабочих лопаток ЦНД турбины из титанового сплава ВТ6 на 4,9% (от 405 до 425 МПа) и прогнозируемую величину эксплуатационной долговечности в 1,24 раза (до 64 100 часов наработки) для паровых турбин типа К-225.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 Проведенный детальный анализ литературных источников и технической документации позволил научно обосновать возможность и эффективность применения многослойных ионно-плазменных покрытий на основе тугоплавких металлов IV-V групп и их нитридов для упрочнения лопаток турбомашин из титановых сплавов. Рассмотренные способы нанесения износостойких покрытий позволили аргументированно обосновать перспективность применения вакуумных ионно-плазменных методов упрочнения применительно к лопаткам газовых и паровых турбин.

2 На основе научной концепции формирования многослойных ионно-плазменных покрытий целенаправленным воздействием на обрабатываемую поверхность нескольких ионно-плазменных потоков разработаны математические модели многослойных покрытий, позволившие провести расчеты их напряженно-деформированного состояния при газоабразивном изнашивании и каплеударной эрозии, подтвержденные экспериментальными исследованиями, в результате чего установлено:

2.1 Повышение износостойкости при нанесении многослойных ионно-плазменных покрытий обеспечивается за счет сопротивления нитридных слоев покрытия к появлению первичных (зародышевых) трещин и сдерживания их развития на границах с металлическими слоями;

2.2 Для снижения вероятности появления в многослойном покрытии первичных трещин при газоабразивном и каплеударном воздействии необходимо обеспечить минимальную величину его деформации. Для этого толщина нитридных слоев должна не менее чем в два раза превышать глубину действия максимальных напряжений, возникающих от удара твердыми или жидкими частицами; твердость нитридных слоев должна превышать твердость абразивных частиц более чем в 1,5 раза.

2.3 Повышение износостойкости многослойных покрытий обеспечивается за счет чередования нитридных и металлических слоев при соотношении их толщин 4:1. При этом наблюдается двукратное уменьшение размеров зоны пластической деформации, возникающей перед трещиной в металлических слоях, так, что наиболее вероятным механизмом распространения трещины будет являться сдвиг вдоль слоев под действием касательных напряжений. Это позволило установить роль границ нитридных и металлических слоев в качестве эффективных барьеров, сдерживающих рост хрупких трещин за счет изменения направления их развития вдоль покрытия, без перехода в основной материал подложки;

2.4 Наиболее стойкими к каплеударной эрозии являются многослойные ионно-плазменные покрытия, способные, при прочих равных условиях, максимально полно рассеивать энергию упругой деформации на границах нитридных и металлических слоев. Для оценки этого процесса предложен критерий максимального рассеяния упругой волны $max(D)$, учитывающий параметры

конструкции многослойного покрытия (материал, толщина, количество слоев), физико-механические свойства (плотность, модуль упругости, скорость звука), а также конкретные условия эксплуатации рабочих лопаток паровых турбин (размер капель, угол падения, скорость удара, температура рабочей среды);

3 Разработана методика определения прочности материала ионно-плазменных покрытий при их упруго-пластическом деформировании алмазными полусферическими наконечниками, отличающаяся тем, что за критерий разрушения материала принимают не критическую нагрузку, зависящую от размеров и формы индентора, а максимальную величину контактного давления, определяемого в зависимости от степени деформации материала в области контакта. Методика расширяет исследовательские возможности известного способа инструментального индентирования ASTM C1624-2022, повышает его универсальность и достоверность получаемых результатов.

Спроектирована и изготовлена установка для испытания образцов с криволинейными поверхностями на фреттинг и фреттинг-коррозию, реализующая условия контактирования бандажных и антивибрационных полок рабочих лопаток газовых и паровых турбин. Установка отличается от известных тем, что в ней предусмотрена система компенсаторов и самоустанавливающихся элементов с целью обеспечения стабильности режимов испытания и повышения достоверности получаемых результатов (Патент РФ на изобретение №99122126).

4 Разработаны новые композиции многослойных ионно-плазменных покрытий путем осаждения из металлической плазмы тугоплавких металлов IV-V групп и их нитридов общей толщиной от 2 до 20 мкм и количеством слоев от 2 до 40. Установлено, что из числа исследованных, наиболее износостойкими являются многослойные покрытия, полученные из металлической плазмы, содержащей приблизительно одинаковое количество титана и ванадия. Это объясняется тем, что при нанесении в среде реакционного газа (азота) нитридных слоев титан-ванадиевого покрытия (V, Ti)+(V, Ti)N в результате протекания плазмохимических реакций образуются твердые растворы внедрения азота в кристаллическую решетку титана и ванадия. Это обусловливает формирование кристаллических структур с некогерентными межфазными границами, преимущественно соответствующих нитридным фазам: δ-TiN (55,4 отн. %) и VN (20,2 отн. %). Кроме этого, при одновременном нанесении титановых и ванадиевых слоев покрытия наблюдается образование твердого раствора внедрения V в α-Ti и стабилизация его в β-области, что дополнительно повышает прочность и твердость покрытия. Экспериментально подтверждено, что нанесением многослойных титан-ванадиевых нитридных покрытий на титановый сплав ВТ6 достигается повышение износостойкости при газоабразивном изнашивании от 2,5 до 12,3 раз.

Экспериментально подтверждена линейная зависимость изменения износостойкости мно-

гослойных ионно-плазменных покрытий (Ti+TiN) при капельно-ударной эрозии от критерия максимального рассеяния упругой волны *max*(*D*). Показано, что при нанесении на титановый сплав ВТ6 многослойных покрытий на основе нитридов титана с количеством слоев от 4 до 20 повышается стойкость к каплеударной эрозии от 2,0 до 2,8 раз за счет рассеивания энергии упругой волны на границах нитридных и металлических слоев.

Установлено повышение стойкости многослойных ионно-плазменных покрытий на основе нитридов титана к фреттинг-коррозии до 8,1 раза за счет присутствия в них промежуточных слоев α-Ti толщиной не менее 0,5 мкм, который в процессе фреттинга попадает в зону трения, окисляется и выступает в качестве твердой смазки, уменьшая скорость фреттинг-износа.

Установлена линейная зависимость изменения предела выносливости (σ_{-1}) при многоцикловой усталости двухфазного титанового сплава ВТ6 с многослойными ионно-плазменными покрытиями на основе титана и его нитридов. Показано, что повышение предела выносливости обеспечивается в результате предварительного проведения ионной имплантации азота (доза $2 \cdot 10^{17}$ ион/см^2), увеличивающей σ_{-1} на 18,2% (от 411 до 486 МПа, база испытания $2 \cdot 10^7$ циклов) для рабочих лопаток КНД АЛ-31СТ, что связано с дислокационным упрочнением материала поверхности ионами азота и формированием в ней остаточных напряжений сжатия от минус 720 до минус 850 МПа.

5 Проведено прогнозирование эксплуатационной долговечности рабочих лопаток газовых и паровых турбин из титановых сплавов с исследуемыми многослойными покрытиями путем расчета коэффициента ускорения испытаний на газоабразивный износ и каплеударную эрозию.

Наиболее износостойким покрытием, рекомендуемом для нанесения на рабочие лопатки компрессора ГТД из титановых сплавов, работающих в условиях газоабразивного износа, является десятислойное покрытие ((V, Ti)+(V, Ti)N)x5 состоящее из чередующихся слоев Ti, V и их нитридов толщиной от 0,5 до 2,5 мкм. Это покрытие, общей толщиной 12±1,5 мкм, нанесенное в сочетании с ионной имплантации азота (доза $2 \cdot 10^{17}$ ион/см^2), обеспечивает повышение стойкости к газоабразивному изнашиванию в 12,3 раза, увеличение предела выносливости на 11,6% (от 344 до 384 МПа) и прогнозируемую величину эксплуатационной долговечности рабочей лопатки 1-й ступени КНД – в 2,3 раза (до 57,3 тыс. ч); рабочей лопатки 2-й ступени КВД АЛ-31СТ – в 2,8 раза (до 70,7 тыс. ч).

Наиболее износостойким покрытием, рекомендуемом для нанесения на рабочие лопатки последних ступеней ЦНД паровых турбин из титановых сплавов, является четырехслойное покрытие (Ti+(TiAlZrMoV)N)x2, состоящее из чередующихся тонких до 0,5 мкм слоев титана, легированного Al, Zr, V, Mo и его нитридов. Это покрытие, общей толщиной 20^{+5} мкм, нанесенное

в сочетании с ионной имплантации азота (доза $2 \cdot 10^{17}$ ион/см^2), обеспечивает повышение стойкости к капельноударной эрозии в 2,31 раза, к фреттинг-коррозии до 8,1 раза, увеличение предела выносливости титанового сплава ВТ6 на 4,9% (от 405 до 425 МПа) и прогнозируемую величину эксплуатационной долговечности в 2,2 раза (до 64,1 тыс. ч) для рабочих лопаток 5-й ступени ЦНД паровых турбин типа К-225.

6 На основе многофакторной математической модели разработаны новые способы нанесения многослойных ионно-плазменных покрытий на лопатки газовых и паровых турбин из титановых сплавов при их сложном кинематическом вращении вокруг собственной оси и оси вакуумной камеры с несколькими одновременно работающими ионными источниками. Для численной реализации модели разработана компьютерная программа, позволяющая расчитывать толщины наносимых слоев покрытия в зависимости от времени обработки, а также соотношение конденсируемых материалов.

7 Проведена модернизация вакуумных установок и электрофизических устройств, позволившая объединить в одном вакуумном объеме процессы: ионного нагрева, ионной модификации (имплантации азота) и нанесения многослойных ионно-плазменных покрытий с нескольких ионных источников. На разработанные конструкции и способы обработки получено двадцать патентов на изобретение РФ, которые использованы в серийном производстве отечественных предприятий преимущественно для повышения износостойкости и долговечности рабочих и направляющих лопаток из титановых сплавов, эксплуатирующиеся в условиях газоабразивного изнашивания, каплеударной эрозии и фреттинг-коррозии.

Список сокращений и условных обозначений

АЭС – атомная электростанция

ВПТВЭ – вакуумно-плазменные технологии высоких энергий

ГПА – газоперекачивающий агрегат

ГТД – газотурбинный двигатель

ГТУ – газотурбинная установка

ЕАЭС – евразийский экономический союз

ИНС – искусственная нейронная сеть

КВД – компрессор высокого давления

КВИПО – комплексная вакуумная ионно-плазменная обработка

КИБ – метод конденсации и бомбардировки

КНД – компрессор низкого давления

ЛЮМ – люминисцентная капиллярная дефектоскопия

МКЭ – метод конечных элементов

НДС – напряженно-деформированное состояние материала

ОКР – область когерентного рассеивания

ОТК – отдел технического контроля

ПЭМ – просвечивающая электронная микроскопия

РКВД – рабочая лопатка компрессора низкого давления

РКНД – рабочая лопатка компрессора низкого давления

РФА – рентгенофазовый анализ

РЭМ – растровый электронный микроскоп

СКБ – специальное конструкторское бюро

ТНД – турбина низкого давления

ТЭК – топливно-энергетический комплекс

ТЭС – тепловая электростанция

ЦМ – капиллярная (цветная) дефектоскопия

ЦНД – цилиндр низкого давления

ЭДИ – электродуговой ионный источник

ЭПП – электролитно-плазменное полирование

PVD – Physical Vapor Deposition

CVD – Chemical Vapor Deposition

FEA – Finite Element Analys

Словарь терминов

Газоабразивное (гидроабразивное) изнашивание – абразивное изнашивание материала поверхности в результате действия на него твердых тел или твердых частиц, увлекаемых потоком газа (жидкости).

Газоабразивный (гидроабразивный) износ – результат газоабразивного (гидроабразивного) изнашивания, определяемый в установленных единицах.

Газоэрозионное (гидроэрозионное) изнашивание – изнашивание поверхности в результате воздействия потока газа (жидкости).

Долговечность (покрытия) – свойство покрытия защищать поверхность основного материала детали от изнашивания до достижения своего предельного состояния, разрушения, например, путем отслаивания от основного материала.

Изнашивание – процесс отделения материала с поверхности твердого тела и (или) увеличения его остаточной деформации при трении, проявляющийся в постепенном изменении размеров и (или) формы тела.

Износ – Результат изнашивания, определяемый в установленных единицах.

Каплеударная эрозия (капельная эрозия) – поверхностное разрушение твердых тел под действием струи газа с каплями жидкости.

Коалесценция – процесс взаимодействии островковых зародышей при осаждении тонких пленок, когда растущие соседние зерна объединяются под действием межатомных сил, формируя вместо двух свободных поверхностей, одну границу в условиях плоского напряжения растяжения.

Отслаивание (покрытия) – Отделение материала покрытия в виде чешуек, например, вследствие недостаточной прочности сцепления покрытия с основой.

Приработка – Процесс изменения геометрии поверхностей трения и физико-химических свойств поверхностных слоев материала в начальный период трения, обычно проявляющийся при постоянных внешних условиях в уменьшении силы трения, температуры и интенсивности изнашивания

Схватывание – явление местного соединения двух твердых тел, происходящего вследствие действия молекулярных сил при трении

Трещиностойкость (*вязкость разрушения*) – способность материала (конструкции) сопротивляться развитию трещин. Согласно механике разрушения твердых тел, трещиностойкость определяется при статической нагрузке коэффициентом интенсивности напряжений: $K = \sigma \cdot l^{1/2}$ [МПа·м$^{1/2}$], где σ – напряжения, МПа; l – длина трещины при переменном (циклическом) нагружении, м.

Фреттинг – изнашивание материала, возникающее вследствие вибрации при колебательном перемещении двух контактирующих поверхностей относительно друг друга, совмещающий в себе несколько процессов изнашивания: механического (абразивного); коррозионного; усталостного. При описании ведущего процесса изнашивания при фреттинге соответственно различают: *фреттинг-износ*; *фреттинг-коррозию*, *фреттинг-усталость*.

Фреттинг-коррозия – коррозия при колебательном перемещении двух поверхностей относительно друг друга в условиях воздействия коррозионной среды

Фреттинг-износ – механический или абразивный износ, возникающий при фреттинге.

Фреттинг-усталость – усталостный износ материала, возникающий вследствие знакопеременного циклически повторяющегося механического воздействия на контактирующие поверхности при фреттинге.

Царапание – образование углублений на поверхности трения в направлении скольжения при воздействии выступов твердого тела или твердых частиц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стратегия энергетической политики России до 2035. Утверждена распоряжением Правительства РФ от 9 июня 2020 г., № 1523-р [Электронный ресурс]. URL: https://docs.cntd.ru/document/565068231 (дата обращения: 21.03.2025).
2. Прогноз научно-технологического развития Российской Федерации на период до 2030 года (утв. Правительством РФ 3 января 2014 г.) [Электронный ресурс]. URL: http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70484380/#ixzz5gFsj5Bv4 (дата обращения: 26.03.2025).
3. Информационный обзор "Единая энергетическая система России: промежуточные итоги" (оперативные данные) / Системный оператор ЕЭС, Москва. – Июнь 2022. – 27 с. [Электронный источник]. URL: https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/reports/ups-review/2022/ups_review_0622.pdf (дата обращения: 21.03.2025).
4. Трухний, А. Д. Стационарные паровые турбины / А. Д. Трухний. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 640 с. : ил.
5. Новые проекты паровых турбин ОАО "Силовые машины" для АЭС [Электронный ресурс]. URL: http://www.atomeks.ru/old/mediafiles/u/files/presentSZ/ Nedavnij_V.V..pdf (дата обращения: 26.04.2024).
6. Каблов, Е. Н. Наноструктурные моно-плазменные защитные и упрочняющие покрытия для лопаток газотурбинных двигателей / Е. Н. Каблов, С. А. Мубояджан // Вопросы материаловедения. – 2008. – № 2 (54). – С. 175–186.
7. Кишалов, А. Е. Анализ нагрузок, действующих на элементы конструкции ГТД / А. Е. Кишалов, В. М. Кудоярова, К. В. Маркина, О. И. Игнатьев // Молодой ученый. – 2012. – № 11 (46). – С. 52–60. – URL: https://moluch.ru/archive/46/5693/ (дата обращения: 20.10.2024).
8. Каблов, Е. Н. Ионно-плазменные защитные покрытия для лопаток ГТД / Е. Н. Каблов, С. А. Мубояджан // Литье лопаток газотурбинных двигателей (сплавы, технологии, покрытия). – М. : МИСИС, 2001. – С. 531–609.
9. Мубояджян, С. А. Современные вакуумные процессы ионной обработки поверхности // Конверсия в машиностроении. – 2004. – № 4. – С. 69–77.
10. Каблов, Е. Н. Ионно-плазменные защитные покрытия для лопаток газотурбинных двигателей / Е. Н. Каблов, С. А. Мубояджян, С. А. Будиновский, А. Н. Луценко // Металлы. – 2007. – № 5. – С. 23–34.

11. Луценко, А. Н. Промышленные технологические процессы ионной обработки поверхности / А. Н. Луценко, С. А. Мубояджян, С. А. Будиновский // Авиационные материалы и технологии. – 2005. – № 1. – С. 30-40.
12. Мубояджян, С. А. Ионное модифицирование поверхности – перспективный процесс для защиты лопаток компрессора ГТД от солевой коррозии и эрозии / С. А. Мубояджян, А. Н. Луценко // Труды междунар. науч.-техн. конф., посвященной 100-летию со дня рождения академика С. Т. Кишкина. – М.: ВИАМ, 2006. – С. 314–319.
13. Мубояджян, С. А. Перспективы применения ионноплазменных покрытий для титановых сплавов / С. А. Мубояджян, А. Н. Луценко, Д. С. Горлов // Перспективы развития и применения титановых сплавов для самолетов, ракет, двигателей и судов. – М.: ВИАМ, 2006. – С. 286-315.
14. Каблов, Е.Н. Защитные и упрочняющие покрытия лопаток и деталей ГТД /Е.Н. Каблов, С.А. Мубояджян, С.А. Будиновский и др.// 75 лет. Авиационные материалы. – М.: ВИАМ, 2007.
15. Чепкин, В. М. Опыт и проблемы применения титановых сплавов в авиационных двигателях // Титан. – 1995. – № 1–2. – С. 13–14.
16. Залужский, В. С. Повышение надежности лопаток последних ступеней паровых турбин / В. С. Залужский, П. Н. Плотников // Конференция молодых ученых. – Екатеринбург: УралЭНИН, ФГАОУ ВПО «УрФУ», 2016. – С. 107–110.
17. Мурманский, Б. Е. Разработка, апробация и реализация методов повышения надежности и совершенствования системы ремонтов паротурбинных установок в условиях эксплуатации: дис. … докт. техн. наук: 05.04.12. – Екатеринбург, 2015. – 457 с.
18. Поздышев, А. А. Особенности повреждений стареющего парка паровых турбин / А. А. Поздышев, В. С. Рабенко // Вестник ИГЭУ. – 2004. – Вып. 2. – С. 1–7.
19. Петухов, А. Н. Сопротивление усталости деталей ГТД. – М.: Машиностроение, 1993. – 240 с.
20. Дубин, А. И. Повышение сопротивления усталости лопаток компрессора газотурбинных двигателей на основе улучшения поверхностного слоя: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 01.02.06 / А. И. Дубин. – Уфа, 2014. – 16 с.
21. Дубин, А. И. Упрочняющая обработка в технологии производства деталей ГТД: учебное электронное издание / А. И. Дубин, А. М. Смыслов. – Уфа : РИК УГАТУ, 2019.
22. Рыженков, В. А. Повышение износостойкости оборудования паротурбинных установок электрических станций: дис. ... докт. техн. наук. – М., 2002.
23. Das, G. Turbine blade failure in a thermal power plant / G. Das et al. // Engineering Failure Analysis. – 2003. – Vol. 10. – P. 85–91.

24. Ziegler, D. Investigation of turbine blade failure in a thermal power plant / D. Ziegler, M. Puccinelli, B. Bergallo, A. Picasso // Biochem. Pharmacol. – 2013. – Vol. 1. – P. 192–199.
25. Шанявский, А. А. Моделирование усталостных разрушений металлов = Modeling of fatigue cracking of metals: синергетика в авиации / А. А. Шанявский. – Уфа : Монография, 2007. – 498 с.
26. Методические указания о порядке оценки работоспособности рабочих лопаток паровых турбин в процессе изготовления, эксплуатации и ремонта. – М. : ВТИ, 2001. – (РД 153-34.1-17.462-00).
27. Combined Cycle Journal [Электронный ресурс]. – URL: http://www.ccj-online.com/alert-steam-can-flow-backwards-and-erode-trailing-edges-of-last-stage-turbine-blades/ (дата обращения: 26.04.2022).
28. Power Engineering Journal [Электронный ресурс]. – URL: https://www.power-eng.com/articles/print/volume-120/issue-5/features/steam-turbine-maintenance-repair-management.html (дата обращения: 26.04.2024).
29. Water Droplet Erosion of Turbine Blades [Электронный ресурс]. – URL: https://docplayer.net/42217114-10-water-droplet-erosion-of-turbine-blades.html (дата обращения: 26.04.2024).
30. Спринжер, Дж. С. Эрозия при воздействии капель жидкости / Дж. С. Спринжер. – М. : Машиностроение, 1981. – 200 с.
31. Эванс, А. Эрозия / А. Эванс, А. Рафф, С. Видерхорн, У. Эдлер, Дж. Бартон, М. Рочестер, К. Прис, К. Мерч, Б. Вайс, Д. Самерс ; под ред. К. Прис. – М. : Мир, 1982.
32. Варавка, В. Н. Исследования в области каплеударной эрозии энергетического оборудования: ретроспективный обзор и анализ текущего состояния / В. Н. Варавка и др. // Вестник Донского государственного технического университета. – 2016. – № 1 (84). – С. 67–76.
33. Варавка, В. Н. Закономерности износа стали при воздействии дискретного водно-капельного потока. Часть 1: начальная стадия каплеударной эрозии / В. Н. Варавка, О. В. Кудряков // Трение и износ. – 2015. – Т. 36, № 1. – С. 89–99.
34. Кудряков, О. В. Механизмы формирования эрозионного износа металлических материалов при высокоскоростных капельных соударениях: части 1 и 2 / О. В. Кудряков, В. Н. Варавка // Материаловедение. – 2012. – № 5. – С. 36–43.
35. Верещака, А. С. Повышение эффективности инструмента путем управления составом, структурой и свойствами покрытий / А. С. Верещака, А. А. Верещака // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2005. – № 9. – С. 918.
36. Селезнев, Л. И. Эрозионный износ конструкционных материалов / Л. И. Селезнев, В. А. Рыженков // Технология металлов. – 2007. – № 3. – С. 19–24.

37. Селезнев, Л. И. Феноменология эрозионного износа материала конструкционных сталей и сплавов жидкими частицами / Л. И. Селезнев, В. А. Рыженков, А. Ф. Медников // Теплоэнергетика. – 2010. – № 9. – С. 12–16.
38. Медников, А. Ф. Определение длительности инкубационного периода процесса каплеударной эрозии рабочих лопаток последних ступеней проектируемых паровых турбин большой мощности : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук : специальность 05.04.12 / Медников Александр Феликсович. – Москва, 2012.
39. Haller, K. K. Computational study of high-speed liquid droplet impact / K. K. Haller, Y. Ventikos, D. Poulikakos, P. Monkewitz // Journal of Applied Physics. – 2002. – Vol. 92, No. 5. – P. 2821–2828.
40. Imano, A. M. Deformation of water droplets on solid surface in electric field / A. M. Imano, A. Beroual // Journal of Colloid and Interface Science. – 2006. – Vol. 298. – P. 869–879.
41. Zhou, Q. Analysis of water drop erosion on turbine blades based on a nonlinear liquid-solid impact model / Q. Zhou, N. Li, X. Chen, T. Xu, S. Hui, D. Zhang // International Journal of Impact Engineering. – 2009. – Vol. 36. – P. 1156–1171.
42. Nicolici, S. Study of fluid-structure interaction in liquid droplet impingement phenomena / S. Nicolici, I. Prisecaru, P. Ghitescu // U.P.B. Sci. Bull., Series D. – 2012. – Vol. 74, Iss. 1. – P. 148–154.
43. Hattori, S. Comparison of cavitation erosion rate with liquid impingement erosion rate / S. Hattori, M. Takinami // Wear. – 2010. – Vol. 269. – P. 310–316.
44. Vanstone, R. W. Investigation into steam turbine materials selection, life management and performance enhancement. Edited by J. E. Oakey. / Power Plant Life Management and Performance Improvement // Vanstone R. W., Osgerby S. – Woodhead Publishing. – 2011. – P. 518-534.
45. Экспериментальный комплекс уникальных стендов и установок - "Гидроударный стенд Эрозия-М" [Эл. рес.]. – URL: http://usu-erosion.mpei.ru (дата обращения: 26.04.2024).
46. Ногин, В. И. Исследование эффективности применения ионно-вакуумных покрытий для защиты от коррозионного и эрозионного повреждения рабочих лопаток паровых турбин / В. И. Ногин, В. А. Рыженков, А. И. Лебедева, С. И. Погорелов // Энергосбережение и водоподготовка. – 1999. – № 1. – С. 30–36.
47. В Тополянский, П.А. Повышение эрозионной стойкости входных кромок лопаток ступеней низкого давления паровых турбин (обзор) // Технологии ремонта, восстановления, упрочнения и обновления машин, механизмов, оборудования и металлоконструкций. Материалы 4-й Всероссийской практической конференции 16-18 апреля 2002 г. Санкт-Петербург. Изд. СПбГТУ, 2002. – С. 30-49.

48. ГОСТ 23.211-80. Метод испытаний материалов на изнашивание при фреттинге и фреттинг-коррозии. – М. : Гос. комитет СССР по стандартам, 1980. – 8 с.
49. Уотерхауз, Р. Б. Фреттинг-коррозия / Р. Б. Уотерхауз. – Л. : Машиностроение, 1976. – 270 с.
50. Любимов, Р. В. Прогнозирование и технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей ГТД, работающих в условиях фреттинг-коррозии: дис. ... канд. техн. наук / Р. В. Любимов. – Рыбинск : Изд-во РГАТА, 2000. – 193 с.
51. Улиг, Г. Г. Коррозия и борьба с ней. Введение в коррозионную науку и технику / Г. Г. Улиг, Р. У. Реви ; пер. с англ. А. М. Сухотина и А. И. Хентов ; под ред. А. М. Сухотина. – Л. : Химия, Ленинградское отделение, 1989. – 455 с.
52. Петухов, А. Н. Усталость замковых соединений лопаток компрессоров : труды ЦИАМ № 1213 / А. Н. Петухов. – М., 1987. – 36 с.
53. Петухов, А. Н. Методические особенности исследования процесса фреттинг-коррозии в связи с усталостью материалов / А. Н. Петухов // Заводская лаборатория. – 1974. – № 10. – С. 1246–1250.
54. Петухов, А. Н. Фреттинг и фреттинг-усталость высоко-нагруженных малоподвижных соединений газотурбинных установок / А. Н. Петухов, К. С. Селиванов, А. М. Смыслов. – М. : Машиностроение, 2012. – 276 с.
55. Костецкий, Б. И. Фреттинг-процесс / Б. И. Костецкий, Л. Х. Федоровский, Л. И. Бершадский, О. В. Шульга // Трение и износ. – 1989. – № 3. – С. 36–39.
56. Чичков, Б. А. Рабочие лопатки авиационных ГТД. Часть 1. Эксплуатационная повреждаемость рабочих лопаток: учебное пособие / Б. А. Чичков. – М. : МГТУ ГА, 2000. – 74 с.
57. Цанев, С. В. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций: учебное пособие / С. В. Цанев. – М. : МЭИ, 2002. – 584 с.
58. Ланина, А. А. Особенности структурных и фазовых превращений в титановых лопатках паровых турбин в процессе каплеударного воздействия: тема дис. и автореф. по ВАК 05.02.01, к.т.н. / А. А. Ланина. – 2009.
59. Смыслов, А. М. Технология защитно-упрочняющей обработки деталей ГТД: уч. пос. / А. М. Смыслов, М. К. Смыслова, А. Д. Мингажев, А. А. Бибин, К. С. Селиванов, В. Ю. Гордеев, Ю. М. Дыбленко. – Уфа, 2015.
60. Шторх, В. Ремонт и восстановление изношенных эрозией рабочих лопаток последних ступеней / В. Шторх, Ф. Мюль, В. Кум // Энергомашиностроение. – 1989. – № 2. – С. 24.
61. Гонсеровский, Ф. Г. Упрочнение и ремонт стальных паротурбинных рабочих лопаток после эрозионного износа // Электрические станции. – 1988. – № 8. – С. 35.

62. Гонсеровский, Ф. Г. Об эксплуатации титановых лопаток с различным упрочнением их входных кромок / Ф. Г. Гонсеровский, Е. Д. Консон, О. Н. Симин // Электрические станции. – 1990. – № 1. – С. 40.

63. Сельский, С. В. Повышение эрозионной стойкости лопаток турбин закалкой с нагревом ВТ4 / С. В. Сельский, Т. М. Сорокина // Металловедение и термическая обработка. – 2000. – № 4. – С. 25.

64. Способ упрочнения поверхности входных кромок турбинных лопаток: а.с. СССР № 565993, кл. F 01 D 5/28, 25.07.1977.

65. Захарова, Л. В. Анодно-оксидное покрытие – защита титановых сплавов от горячесолевой коррозии // Труды ВИАМ. – 2015. – № 10. – С. 8–15.

66. Райтзенштейн, В. Основы лазерной закалки металлов // Лазерная технология АН/НФВ: науч. докл. – Дрезден, 1984. – Вып. 26. – С. 135–158.

67. Скрипченко, А. И. Лазерное модифицирование поверхности – специфика и разнообразие технологии / А. И. Скрипченко, В. О. Попов // Ритм. – 2010. – № 6 (54). – С. 23–30.

68. Григорьянц, А. Г. Основы лазерного термоупрочнения сплавов / А. Г. Григорьянц, А. Н. Сафонов. – М.: Высш. шк., 1988. – 159 с.

69. Коваленко, В. С. Упрочнение деталей лучом лазера / В. С. Коваленко и др. – Киев: Техника, 1982. – 130 с.

70. Galenko, P. K. Physics of dendrites / P. K. Galenko, V. A. Zhuravlev. – Singapore: World Scientific, 1994. – 240 p.

71. Luong, H. The effect of laser peening on high-cycle fatigue in 7085-T7651 aluminum alloy / H. Luong, M. R. Hill // Materials Science and Engineering A. – 2008. – Vol. 477, no. 1–2. – P. 208–216.

72. Патент № 2333365 РФ, МПК C23C 24/08(2006.01), F01D 5/28(2006.01), C22C 19/07(2006.01), C23C 24/10(2006.01), C23C 30/00(2006.01). Авторы: Джанноцци Массимо. Заявка № 2003130976/06, 2003.10.20. Опубликовано 2008.09.10. Патентообладатель: НУОВО ПИНЬОНЕ ХОЛДИНГ СПА (IT).

73. Патент № 2415964 C1 Российская Федерация, МПК C23C 8/26. Способ низкотемпературного азотирования стальных деталей: № 2009139309/02; заявл. 26.10.2009; опубл. 10.04.2011 / Л. Г. Петрова, О. В. Чудина, В. А. Александров [и др.]; заявитель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Московский автомобильно-дорожный институт (государственный технический университет).

74. Laser surface alloying of steam turbine blades for enhanced erosion resistance [Электронный ресурс]. Engineering and Physical Sciences Research Council. URL: https://www.epsrc.ac.uk/research/projects/EP/C513353/1 (дата обращения: 10.09.2024).

75. Anti-erosion metal coating for steam turbine blades / GE Power Systems – Nuovo Pignone // Conversions, Modifications and Uprates. – 2001. – October. – P. 37.

76. Патент № 2375465 C1 Российская Федерация, МПК C21D 1/09, C21D 7/06. способ поверхностного упрочнения : № 2008131983/02 : заявл. 01.08.2008 : опубл. 10.12.2009 / С. Ф. Кукин, О. Г. Девойно, А. А. Баркун, А. С. Кукин ; заявитель Республиканское унитарное предприятие "Минский тракторный завод".

77. Патент № 2366553 C2 Российская Федерация, МПК B23K 26/34, C23C 4/12. Способ наплавки поверхности лучом лазера : № 2007125941/02 : заявл. 09.07.2007 : опубл. 10.09.2009 / А. В. Баранов, В. И. Горынин, В. О. Попов [и др.] ; заявитель Федеральное государственное унитарное предприятие "Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов "ПРОМЕТЕЙ" (ФГУП "ЦНИИ КМ "ПРОМЕТЕЙ").

78. Патент № 2297310 C2 Российская Федерация, МПК B23K 26/00. Способ нанесения наплавки лучом лазера : № 2005111462/02 : заявл. 18.04.2005 : опубл. 20.04.2007 / А. В. Баранов, В. О. Попов, Л. П. Розовская, И. П. Попова ; заявитель Федеральное государственное унитарное предприятие "Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов "ПРОМЕТЕЙ" (ФГУП "ЦНИИ КМ "ПРОМЕТЕЙ").

79. Патент № 2123418 C1 Российская Федерация, МПК B23K 26/34, B23K 9/04, B23K 26/00. способ порошковой лазерной наплавки уголковых изделий : № 97120196/02 : заявл. 25.11.1997 : опубл. 20.12.1998 / А. М. Забелин, А. Н. Сафонов, И. Н. Ильичев, А. А. Чирков ; заявитель Закрытое акционерное общество "ТехноЛазер", Научно-исследовательский институт конструкционных материалов и технологических процессов МГТУ им. Баумана.

80. Патент № 2100479 C1 Российская Федерация, МПК C23C 26/00, B23K 26/00, B23K 26/34. Способ газопорошковой лазерной наплавки с двухсопловой подачей порошка : № 96100473/02 : заявл. 04.01.1996 : опубл. 27.12.1997 / А. Н. Сафонов, А. М. Забелин ; заявитель Научно-исследовательский центр по технологическим лазерам РАН.

81. Колобов, Ю. Р. О выборе параметров ионно-лучевого упрочнения материалов / Ю. Р. Колобов, А. Д. Короков, А. О. Савченко [и др.] // II Всесоюзная конференция "Модификация свойств конструкционных материалов пучками заряженных частиц". – 1991. – С. 100–200.

82. Kan, I. G. The effect of nitrogen and boron ion implantation on cyclic deformation response in Ti-24V alloy / I. G. Kan, R. F. Kochman // Materials Science and Engineering. – 1987. – Vol. 90. – P. 317–325. – (РЖМет, 1988, 3И525).

83. Dearnaley, G. Ion implantation for surface modification of materials // Nuclear Instruments and Methods. – 1981. – Vol. 182/183. – P. 899–914.

84. Заболотный, В. Т. Влияние ионной имплантации на циклическую прочность лопаток для двигателя / В. Т. Заболотный, В. П. Квядарас, В. А. Махлин [и др.] // Физика и химия обработки материалов. – 1985. – № 5. – С. 138–140.

85. Модификация свойств конструкционных материалов пучками заряженных частиц : II Всесоюзная научно-техническая конференция : тез.докл. / АН СССР, УрО, Ин-т электрофизики [и др.] ; [отв. ред. В. В. Овчинников]. – Свердловск, 21–24 мая 1991 г. : в 3 т. – Т. 1. – 3 с.

86. Диденко, А. Н. Исследование свойств материалов / А. Н. Диденко, В. А. Жулов, Г. Е. Ремнев // II Всесоюзная конференция "Модификация свойств конструкционных материалов пучками заряженных частиц". – 1991. – Т. 3. – С. 65–72.

87. Burakowski, T. Ion implantation in metals / T. Burakowski // Prace Institutu Lotnictwa. – Warszawa, 1990. – No. 2–3. – P. 5–50.

88. Полещенко, К. Н. Физико-механические явления при резании титановых сплавов имплантированным инструментом : автореф. дис. … канд. техн. наук / К. Н. Полещенко. – Томск, 1990. – 22 с.

89. Белый, А. В. Ионно-лучевое легирование и фрикционные свойства металлов и сплавов / А. В. Белый, С. К. Ших // Трение и износ. – 1987. – Т. 8, № 2. – С. 330–343.

90. Модифицирование и легирование поверхности лазерными, ионными и электронными пучками / под ред. Дж.-М. Поута. – М. : Машиностроение, 1987. – 424 с.

91. Хирвонен, Д.-М. Ионная имплантация / под ред. Д.-М. Хирвонена. – М. : Металлургия, 1985. – 391 с.

92. Рисел, Х. Ионная имплантация / Рисел Х., Руге И. – М. : Мир, 1983. – 360 с.

93. Vagdiman, R. G., Greighton, D. The Effect of ion implantation on fretting fatigue in Ti-6Al-4V. In: Ion implantation for material processing. – University of Missouri, USA, 1982. – P. 165–192.

94. Гусева, М. И. Ионная имплантация в неполупроводниковые материалы // Итоги науки и техники. Раздел «Физические основы лазерной и пучковой технологии». – М., 1989. – Т. 5. – С. 5–49.

95. Ягодкин, Ю. Д. Ионно-лучевая обработка металлов и сплавов // Итоги науки и техники. ВИНИТИ. Сер. «Металловедение и термообработка». – 1990. – С. 167–221.

96. Ягодкин, Ю. Д. Влияние ионного легирования на жаростойкость сплавов на основе Ni и Ti / Ю. Д. Ягодкин, А. М. Сулима, В. А. Шулов // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 1989. – № 10. – С. 37–43.

97. Владимиров, Б. Г. Поверхностный слой, точность и эксплуатационные свойства деталей машин и приборов / Б. Г. Владимиров, М. И. Гусева, А. Н. Напольнов [и др.] // В кн.: *МДНТП*. – М., 1984. – С. 48–57.

98. Picraux, S. T. // Ann. Rev. Mater. Sci. – 1984. – V. 14. – P. 335–372.

99. Перри, Дж. А. Ионная имплантация титановых сплавов, используемых в качестве биоматериалов и для других целей // Surface Engineering. – 1987. – V. 3, № 2. – P. 154–160.

100. Васильев, В. Ю. Исследование поверхностей / В. Ю. Васильев, Н. И. Исаев, М. И. Гусева [и др.] // Поверхность. Физика, химия, механика. – 1984. – № 5. – С. 144–147.

101. Баянкин, В. Я. Исследование защитных покрытий / В. Я. Баянкин, Б. Г. Владимиров, М. И. Гусева [и др.] // Защита металлов. – 1987. – № 3. – С. 487–492.

102. Lu, H. Влияние имплантации ионов N, B, Cr и Mo на коррозию и микротвердость чистого железа / H. Lu, H. Su, O. Yango // Tech. – 1988. – № 3. – С. 15–17. – (РЖМет, 1988, 8И1017).

103. Pons, M. Oxidation of ion-implanted titanium in the 750–950 °C temperature range / M. Pons, M. Caillet, A. Galerie // J. Less-Common Metals. – 1985. – Vol. 109. – P. 45–46. – (РЖМет, 1986, 1И223).

104. Белый, А. В. Структура и методы формирования износостойких поверхностных слоев / А. В. Белый, Г. Д. Карпенко, Н. К. Мышкин. – М. : Машиностроение, 1991. – 208 с.

105. Смыслов, А. М. Комбинированные технологии на базе ионно-имплантационного модифицирования поверхности, обеспечивающие повышение ресурса и надежности лопаток компрессора и турбины ГТД : диссертация... доктора технических наук : 05.07.05 / Смыслов Анатолий Михайлович. – Уфа : Уфимский авиационный институт, 1993. – 326 с.

106. Смыслов, А. М. Повышение эксплуатационных свойств лопаток компрессора из титановых сплавов ионным модифицированием поверхности на установке "ВИТА" / А. М. Смыслов, М. И. Гусева, М. К. Новикова [и др.] // Авиационная промышленность. – 1992. – № 5. – С. 18–24.

107. Сафин, Э. В. Комбинированная модификация титановых сплавов с целью повышения их сопротивления усталости : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.02.08, 05.02.01 / Сафин Эдуард Вилардович. – Уфа : УГАТУ, 1999. – 16 с.

108. Дыбленко, Ю. М. Комбинированные ионно-имплантационные и вакуумно-плазменные технологии модифицирования поверхности, обеспечивающие повышение эксплуатационных свойств лопаток ЦНД паровых турбин : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.02.08 / Дыбленко Юрий Михайлович. – Уфа : УГАТУ, 2003. – 15 с.

109. Данилин, Б. С. Применение низкотемпературной плазмы для нанесения тонких пленок. – Москва : Энергоатомиздат, 1989. – 328 с.

110. Барвинок, В. А. Управление напряженным состоянием и свойствами плазменных покрытий. – Москва : Машиностроение, 1990. – 384 с.

111. Кипарисов, С. С. Карбид титана: получение, свойства, применение / С. С. Кипарисов, Ю. В. Левинский, А. П. Петров. – М. : Металлургия, 1987. – 216 с.

112. Витязь, П. А. Газофазное осаждение покрытий из нитрида титана / П.А. Витязь, Г.Н. Дубровская, Л.М. Кирилюк. – Минск : Наука и техника, 1983. – 96 с.

113. Самсонов, Г. В. Нитриды / Г.В. Самсонов. – Киев: Наукова думка. – 1969. – 380 с.

114. Самсонов, Г. В. Тугоплавкие соединения: Справочник / Г. В. Самсонов, И. М. Виницкий. – Москва : Металлургия, 1976. – 560 с.

115. Верещака, А. С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями / А. С. Верещака. – Москва : Машиностроение, 1993. – 336 с.

116. Верещака, А. С. Тенденции совершенствования и методология создания функциональных покрытий для режущего инструмента / А. С. Верещака, А. А. Верещака // Современные технологии в машиностроении: сборник научных статей / под ред. А. И. Грабченко. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2007. – С. 192–235.

117. Верещака, А. С. Методологические принципы создания функциональных покрытий для режущего инструмента / А. С. Верещака, С. Н. Григорьев, В. П. Табаков // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2013. – № 2. – С. 18–39.

118. Верещака, А. С. Повышение работоспособности режущего инструмента при обработке труднообрабатываемых материалов путем применения наноструктурированного износостойкого покрытия и твердого сплава оптимального состава / А. С. Верещака, А. В. Дачева, А. И. Аникеев // Известия МГТУ "МАМИ". – 2010. – № 1(9). – С. 112–127.

119. Будилов, В. В. Физические основы вакуумно-плазменной технологии нанесения покрытий : учебное пособие / В. В. Будилов. – Уфа, 1993. – 74 с.

120. Panckow, A. N. Application of novel vacuum-arc ion-plating technologies for the design of advanced wear resistant coatings / A. N. Panckow, J. Steffenhagen, D. Wegener, L. Dubner, F. Lierath // Surface and Coating Technologies. – 2001. – Vol. 138. – P. 71–76.

121. Mattox, D. M. Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing: Film Formation, Adhesion, Surface Preparation and Contamination Control / D. M. Mattox. – Westwood, NJ: Noyes Publications, 1998.

122. Григорьев, С. Н. Технологические методы повышения износостойкости контактных площадок режущего инструмента / С. Н. Григорьев, В. П. Табаков, М. А. Волосова. – Старый Оскол: ТНТ, 2011. – 269 с.

123. Табаков, В. П. Методологические подходы к формированию многослойных покрытий на режущем инструменте / В. П. Табаков, А. С. Верещака, А. А. Верещака, А. Д. Батако // Вестник машиностроения. – 2015. – № 9. – С. 82–88.

124. Tabakov, V. P. Development of technological means for formation of multilayer composite coatings, providing increased wear resistance of carbide tools, for different machining conditions / V. P. Tabakov, A. S. Vereschaka // Key Engineering Materials. – 2014. – Vol. 581. – P. 55–61.
125. Мы впервые в мировой практике применили принцип конструирования покрытия. Интервью с начальником лаборатории «Защитные ионно-плазменные, газотермические и газоциркуляционные покрытия деталей ГТД» Всероссийского научно-исследовательского института авиационных материалов (ВИАМ) Сергеем Артемовичем Мубояджяном [Электронный ресурс]. URL:// https://viam.ru/interview/2044?ysclid=llevnetz44309666615 (дата обращения: 17.08.2024).
126. Белан, Н. В. Повышение эрозионной стойкости рабочих лопаток компрессора ГТД / Н. В. Белан, В. В. Омельченко, А. Н. Прокопенко и др. // Авиационная промышленность. – 1986. – № 10. – С. 19–20.
127. Душкин, А. М. Защитные покрытия для стальных лопаток компрессора ГТД / А. М. Душкин, А. Б. Прощин, Е. Г. Иванов // Авиационная промышленность. – 1988. – № 7. – С. 13–15.
128. Будилов, В. В. Обеспечение эксплуатационных свойств деталей ГТД вакуумными ионно-плазменными методами обработки с учетом технологической наследственности : автореферат диссертации... доктора технических наук : 05.07.05 / Будилов В. В. – Москва, Московский авиационный институт. 1995. – 41 с.
129. Мухин, В.С. Физические методы нанесения нанопокрытий : учебное пособие для вузов / В. С. Мухин [и др.] ; под редакцией В. С. Мухина, С. Р. Шехтмана. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Издательство Юрайт, 2023. – 333 с.
130. Рысин, Л. С. Пыль как фактор, подлежащий анализу и учету при конструировании вертолетного двигателя / Л. С. Рысин // Тезисы докладов международной научной конференции «Двигатели века XX». – Москва, 2000. – С. 78–79.
131. Будилов, В. В. Обеспечение эксплуатационных свойств лопаток компрессора ГТД вакуумными ионно-плазменными методами обработки / В. В. Будилов, Р. Д. Агзамов // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2005. – Т. 6, № 1. – С. 47–59.
132. Экспериментальные исследования износостойких вакуумных ионно-плазменных покрытий в запыленном потоке воздуха : технический отчет ЦИАМ № 10790. – Москва, 1987. – 37 с.
133. Шехтман, С. Р. Нанотехнологии обработки поверхности деталей на основе вакуумных ионно-плазменных методов: физические основы и технические решения / С. Р. Шехтман, В. В. Будилов, В. С. Мухин. – Москва : Наука, 2008. – 194 с.

134. Мубояджян, С. А. Вакуумно-плазменная технология получения защитных покрытий из сложнолегированных сплавов / С. А. Мубояджян, Е. Н. Каблов, С. А. Будиновский // МиТОМ. – 1995. – № 2. – С. 15–18.
135. Мубояджян, С. А. Промышленная установка МАП-1 для нанесения защитных покрытий различного назначения / С. А. Мубояджян, С. А. Будиновский // Авиационная промышленность. – 1995. – № 7–8. – С. 44–48.
136. Будиновский, С. А. Вакуумная плазменная технология высоких энергий – эффективный путь создания новых покрытий и материалов / С. А. Будиновский, Е. Н. Каблов, С. А. Мубояджян и др. // Авиационные материалы на рубеже XX–XXI веков. – Москва : ВИАМ, 1994. – С. 314–325.
137. Мубояджян, С. А. Защитные покрытия для лопаток компрессора ГТД / С. А. Мубояджян, Я. А. Помелов // Авиационные материалы и технологии. Выпуск: Высокожаропрочные материалы для современных и перспективных газотурбинных двигателей и прогрессивные технологии их производства. – Москва : ВИАМ, 2003. – С. 116–131.
138. Мубояджян, С. А. Модифицирование металлической поверхности в плазме вакуумно-дугового разряда методом термостимулированной ионной диффузии / С. А. Мубояджян // Металлы. – 2008. – № 6.
139. Мубояджян, С. А. Эрозионностойкие покрытия для лопаток компрессора ГТД / С. А. Мубояджян // Металлы. – 2009. – № 3.
140. Мубояджян, С. А., Луценко, А. Н., Александров, Д. А., Горлов, Д. С., Журавлева, П. Л. Исследование свойств нанослойных эрозионностойких покрытий на основе карбидов и нитридов металлов / С. А. Мубояджян, А. Н. Луценко, Д. А. Александров, Д. С. Горлов, П. Л. Журавлева // Металлы. – 2011. – № 4.
141. Александров, Д. А. Нанослойные упрочняющие покрытия для защиты стальных и титановых лопаток компрессора ГТД / Д. А. Александров, Д. С. Горлов, С. А. Мубояджян // Авиационные материалы и технологии. – 2011. – № 3.
142. Мубояджян, С. А. Исследование нового процесса ионного модифицирования поверхности компрессорных сталей в вакуумно-дуговой плазме титана / С. А. Мубояджян, Е. Н. Азаровский // Металлы. – 2013. – № 6.
143. Мубояджян, С. А. Защитные и упрочняющие ионно-плазменные покрытия для лопаток и других ответственных деталей компрессора ГТД / С. А. Мубояджян, Д. А. Александров, Д. С. Горлов, Л. П. Егорова, Е. Е. Булавинцева.
144. Мубояджян, С. А. Исследование демпфирующей способности ионно-плазменных покрытий / С. А. Мубояджян, Д. С. Горлов, А. А. Щепилов, В. И. Коннова // Авиационные материалы и технологии. – 2014. – № S5. – С. 67–72.

145. 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.
146. Кривобоков, В. П. Плазменные покрытия (методы и оборудование) : учебное пособие / В. П. Кривобоков, Н. С. Сочугов, А. А. Соловьев. – Томск : Изд-во ТПУ, 2008. – 104 с. – С. 9.
147. Патент на полезную модель № 63004 РФ. Компрессорная лопатка газотурбинного двигателя с защитным покрытием / Ю. П. Тарасенко, И. Н. Царева, Я. А. Фель, П. Ю. Тарасенко, Д. А. Мышляев ; заявл. 24.06.2006 ; опубл. 10.05.2007.
148. Патент № 2478140 РФ, МПК B22F 3/08. Способ получения ионно-плазменного покрытия на лопатках компрессора из титановых сплавов / заявители и патентообладатели Павлинич С. П., Дыбленко М. Ю., Селиванов К. С., Гордеев В. Ю., Смыслов А. М., Смыслова М. К., Гонтюрев В. А., Мингажев А. Д. ; заявка № 2011122477/02 от 02.06.2011 ; опубл. 10.12.2012, Бюл. № 9.
149. Быкадоров, В.В. Повышение ремонтопригодности лопаток с защитными покрытиями при техническом обслуживании газотурбинных двигателей / Быкадоров В.В., Данилейченко А.А., Любченко Д.И. – Луганск: Луганский нац. унив-т им. Вл. Даля, 2019. – 113 с.
150. Хворостухин, Л. А. Исследование эрозионной прочности ионно-плазменного покрытия из нитрида титана / Л. А. Хворостухин, Ю. А. Ножницкий, А. Е. Болманенков // Авиационная промышленность. – 1988. – № 6. – С. 59–61.
151. Виноградов, В. Н. Абразивное изнашивание / В. Н. Виноградов. – Москва : Машиностроение, 1990. – С. 170–181.
152. Рыженков, В. А. Исследование коррозионной стойкости титановых ионно-плазменных покрытий / В. А. Рыженков, В. К. Крайнов, С. И. Нефедкин [и др.] // Вакуумные технологии и оборудование : материалы IV Международного симпозиума, Харьков, 23–27 апреля 2001 г. – Харьков, 2001. – С. 292–294.
153. Крайнов, В. К. Влияние обработки поверхности ионами аргона на эрозионную стойкость лопаточных сталей / В. К. Крайнов, В. А. Рыженков, С. И. Погорелов и др. // Прикладная физика. – 2001. – № 2. – С. 71–74.
154. Крайнов, В. К. Перспективы применения многослойных ионно-вакуумных покрытий для защиты элементов энергетического оборудования от эрозионного и коррозионного воздействия / В. К. Крайнов, В. А. Рыженков, С. И. Погорелов и др. // Российское национальное симпозиум по энергетике : сб. докл., 10–14 сентября 2001 г. – Казань, 2001. – С. 146–149.

155. Маринин, В. Г. Эрозия PVD-покрытий при воздействии кавитации и пароводяного конденсата / В. Г. Маринин // Вакуумные технологии и оборудование : сб. докл. V Международной конференции, Харьков, 22–27 апреля 2002 года. – Харьков, 2002. – С. 177–180.
156. Третьяков, И. П. Режущие инструменты с износостойкими покрытиями / И. П. Третьяков, А. С. Верещака. – Москва : Машиностроение, 1986. – 192 с.
157. Мухин, В. С. Износ инструмента, качество и долговечность деталей из авиационных материалов : учебное пособие / В. С. Мухин, Л. Ш. Шустер. – Уфа : Уфимский авиационный институт, 1987. – 217 с.
158. Мигранов, М. Ш. Эксплуатационные свойства многослойных покрытий для металлорежущего инструмента / М. Ш. Мигранов, В. В. Постнов, Л. Ш. Шустер // Перспективные технологии физико-химической размерной обработки и формирования эксплуатационных свойств металлов и сплавов : Всероссийская научно-практическая конференция, Уфа, 10–14 сентября 2001 года. – Уфа : Уфимский авиационный институт, 2001. – С. 287–290.
159. Саблев, Л. П. Модернизация установки ННВ-6.6И1 для комплексной плазменной обработки изделий / Л. П. Саблев, А. А. Андреев и др. // Современное электротермическое оборудование для поверхностного упрочнения деталей машин и инструментов : II Всесоюзный научный технический симпозиум. – Саратов, 1990. – 133 с.
160. Лапшин, В. И. Вакуумные технологии в производстве инструмента из быстрорежущих сталей с повышенными служебными характеристиками / В. И. Лапшин, В. М. Шулаев, А. А. Андреев // ОТТОМ-3. Часть 1. – Харьков, 2002. – С. 33–37.
161. Лесневский, Л. Н. Материалы и процессы получения твердых смазочных покрытий : монография / Л. Н. Лесневский. – Москва : Московский авиационный институт, 2021. – 185 с.
162. Пантелеенко, Ф. И. Исследование структуры плазменных износостойких покрытий на основе оксидной керамики с включениями твердой смазки / Ф. И. Пантелеенко [и др.] // Наука и техника. – 2013. – № 5. – С. 15–21.
163. Оковитый, В. А. Керамический материал системы оксид титана – оксид алюминия – твердая смазка / В. А. Оковитый [и др.] // Вестник Белорусского национального технического университета. – 2011. – № 1. – С. 16–20.
164. Hagmark, S. Design and evaluation of tribological coatings // Hagmark S., Jacobson S., Larsson M. / Wear. – №246 . – 2000. – p. 20-33.
165. Holmberg, K. Coating Tribology. Properties, Techniques and Applications in Surface Engineering / K. Holmberg, A. Matthews. – Amsterdam, Netherlands : Elsevier Science B.V., 1994. – 442 p.
166. Смыслов, А. М. Применение ионно-имплантационных и вакуумно-плазменных технологий для повышения служебных свойств лопаток паровых турбин из титановых сплавов / А. М.

Смыслов, Ю. М. Дыбленко, М. К. Смыслова // Состояние и перспективы развития вакуумной техники : X Международная научно-техническая конференция. – Казань, 2001. – С. 127–128.

167. Смыслов, А. М. Технология и оборудование для упрочнения большеразмерных лопаток паровых турбин из титановых сплавов / А. М. Смыслов, Ю. М. Дыбленко, М. К. Смыслова // Механика и прочность авиационных конструкций : Российская научно-техническая конференция. – Уфа, 2001. – С. 224–226.
168. Рыженков, В. А. Исследование антикоррозионных свойств износостойких покрытий для защиты рабочих лопаток паровых турбин мощных энергоблоков / В. А. Рыженков, С. И. Погорелов, С. И. Нефедкин // Вестник Московского энергетического института. – 2001. – № 5. – С. 38–41.
169. Резинских, В. Ф. Исследование перспективных защитных покрытий для лопаток последних ступеней паровых турбин / В. Ф. Резинских, А. Ф. Богачев, В. А. Рыженков и др. // Теплоэнергетика. – 1996. – № 12. – С. 28–31.
170. Lewis, D. B. Structure and stress of TiAlN/CrN layer thickness / D. B. Lewis, I. Wadsworth, W.-D. Münz, R. Kusel Jr., V. Valvoda // Surf. Coat. Technol. – 1999. – Vol. 116–119. – P. 284–291.
171. Münz, W.-D. Properties of various large-scale fabricated TiAlN and CrN-based superlattice coatings grown by combined cathodic arc-unbalanced magnetron sputter deposition / W.-D. Münz, L. A. Donohue, P. E. Hovsepian // Surf. Coat. Technol. – 2000. – Vol. 125. – P. 269–277.
172. Münz, W.-D. Wear resistant PVD coatings for high temperature (950 °C) applications / W.-D. Münz, I. J. Smith // Society of Vacuum Coaters. 42nd Annual Technical Conference Proceedings. – 1999. – P. 350–356.
173. Фукс-Рабинович, Г. С. Влияние ионно-плазменных покрытий из нитрида титана на износостойкость и контактную выносливость высоколегированных подшипниковых сталей / Г. С. Фукс-Рабинович, Л. Я. Контер // Трение и износ. – 1991. – Т. 12, № 2. – С. 306–309.
174. Bertrand, G. A study of corrosion behavior and protective quality of sputtered chromium nitride coatings / G. Bertrand, H. Mahdjoub, C. Meunier // Surf. Coat. Technol. – 2000. – Vol. 126. – P. 199–209.
175. Navinšek, B. Industrial application of CrN (PVD) coatings, deposited at high and low temperatures / B. Navinšek, P. Panjan, I. Milošev // Surf. Coat. Technol. – 1997. – Vol. 97. – P. 182–191.
176. Буров, И. В. Современное состояние и перспективы развития технологии вакуумно-дугового нанесения износостойких покрытий / И. В. Буров, В. Г. Кузнецов // Труды 6-й Межд. конф. "ПП-2001". – Санкт-Петербург, 2001. – С. 131–136.

177. Сайдахмедов, Р. Х. Разработка ионно-плазменных покрытий на основе нитридов и карбидов переходных металлов с регулируемой стехиометрией : дис. ... докт. техн. наук / Р. Х. Сайдахмедов. – 2002.
178. Karlsson, L. Growth, microstructure and mechanical properties of arc evaporated TiCN films / L. Karlsson, L. Hultman, M. P. Johansson, J. E. Sundgren, H. Ljungcrantz // Surf. Coat. Technol. – 2000. – Vol. 126. – P. 1–14.
179. Tanaka, Y. Properties of $(Ti_{1-x}Al_x)N$ coatings for cutting tools prepared by the cathodic arc ion plating method / Y. Tanaka, T. M. Gur, M. Kelly et al. // J. Vac. Sci. Technol. A. – 1992. – Vol. 10, No. 4 (Jul/Aug). – P. 1749–1756.
180. Патент № 2191220 C2 Российская Федерация, МПК C23C 14/06. износостойкое покрытие : № 2000121734/02 : заявл. 14.08.2000 : опубл. 20.10.2002 / А. В. Лобанов, А. В. Попков, В. А. Лобанов, А. И. Семенченок ; заявитель Уральский электрохимический комбинат.
181. Патент 4115616 Германии, C23C 28/00, B23B 27/00. Многослойно-композиционное покрытие для режущего инструмента для обработки титановых сплавов в условиях прерывистого резания : №2019141143 ; заявл. 2019.12.12 ; опубл. 2020.07.02
182. Патент № 7,186,092 США. Airfoil having improved impact and erosion resistance and method for preparing same ; заявл. 26.07.2004 ; опубл. 26.07.2004 ; заявитель General Electric Company.
183. Табаков, В. П. Исследование износостойкости покрытий режущего инструмента, полученных с применением составных катодов / В. П. Табаков // «Станки, инструмент». – 1996. – № 3. – стр. 14–17.
184. Биргер, И. А. Остаточные напряжения / И. А. Биргер. – Москва : Машиностроение, 1963. – 232 с.
185. Земляницына, А. П. Специальные главы материаловедения : учебно-методическое пособие для студентов машиностроительного факультета / А. П. Земляницына, И. А. Хворова ; Томский политехнический университет. – Томск, 2007.
186. Hencky, H. Über einige statisch bestimmte Fälle des Gleichgewichts in plastischen Körpern / H. Hencky // Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik. – 1923. – Band 3. – P. 241–251.
187. Сорокин, В. Г. Марочник сталей и сплавов / В. Г. Сорокин, А. В. Волосникова, С. А. Вяткин и др. – Москва : Машиностроение, 1989. – 640 с.
188. Каблов, Е. Н. Авиационные материалы : справочник в 12 томах / под общей редакцией Е. Н. Каблова ; Всероссийский институт авиационных материалов. – 7-е изд., перераб. и доп. – Москва : ВИАМ, 2011.
189. Titanium Nitride [Электронный ресурс]. URL: http://www.matweb.com (дата обращения: 22.05.2022).

190. Escobar, C. Mechanical and Tribological Behavior of VN and HfN Films Deposited via Reactive Magnetron Sputtering / C. Escobar, M. Villarreal et al. // Surface Review and Letters. – 2013. – Vol. 20, No. 03n04. – Article ID 1350040.
191. Зайцев, Ю. В. Моделирование деформаций и прочности бетона методами механики разрушения / Ю. В. Зайцев. – Москва : Стройиздат, 1982. – 196 с.
192. Белов, Н. Н. Математическое моделирование динамической прочности конструкционных материалов : в 3 томах / Н. Н. Белов, Д. Г. Копаница, Н. Т. Югов. – Томск : STT, 2010. – 318 с.
193. Буханько, А. А. Деформационно-энергетический подход: предельные состояния и разрушение конструкционных материалов : учебное пособие / А. А. Буханько, Е. П. Кочеров, А. И. Хромов. – Самара : Самарский государственный аэрокосмический университет, 2011. – 88 с.
194. Кушнаренко, В. М. Физическая природа разрушения : учебное пособие / В. М. Кушнаренко, Ю. А. Чирков, В. Ю. Полищук, В. С. Репях. – Оренбург : Оренбургский государственный университет, 2012.
195. Елисеев, В. В. Механика деформируемого твердого тела: теория трещин и механика композиционных материалов / В. В. Елисеев, С. Г. Орлов. – Санкт-Петербург: Издательство Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, 2008. – 72 с.
196. Griffith, A. A. The phenomena of rupture in solids / A. A. Griffith // Transactions of the Royal Society of London. Series A. – 1920. – Vol. 221. – P. 163–197.
197. Irwin, G. R. Fracture dynamics / G. R. Irwin // Fracturing of metals. – Cleveland : American Society for Metals, 1948. – P. 147–166.
198. Черепанов, Г. П. Распространение трещин в сплошной среде / Г. П. Черепанов // Журнал прикладной математики и механики. – 1967. – Т. 31, № 3. – С. 503–512.
199. Rice, J. R. A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks / J. R. Rice // Journal of Applied Mechanics. – 1968. – Vol. 35. – P. 379–386.
200. Фудзии, Т. Механика разрушения композиционных материалов / Т. Фудзии, М. Дзако ; пер. с японского. – 1982. – 232 с.
201. Давиденков, Н. Н. Об изменении остаточных напряжений / Н. Н. Давиденков // Заводская лаборатория. – 1950. – № 2. – С. 188–192.
202. Withers, P. J. Residual stress and its role in failure / P. J. Withers // Reports on Progress in Physics. – 2007. – Vol. 70. – P. 2211–2264.
203. Шугуров, А. Р. Механизмы возникновения напряжений в тонких пленках и покрытиях / А. Р. Шугуров, А. В. Панин // Журнал технической физики. – 2020. – Т. 90, Вып. 12. – С. 1971–1994.

204. Панин, В. Е. Структурные уровни деформации твердых тел / В. Е. Панин, В. А. Лихачев, Ю. В. Гриняев. – Новосибирск : Наука, 1985.
205. Крагельский, И. В. Основы расчетов на трение и износ / И. В. Крагельский [и др.]. – Москва : Машиностроение, 1977. – 526 с.
206. Марковец, М. П. Определение механических свойств металлов по твердости / М. П. Марковец. – Москва : Машиностроение, 1979. – 191 с.
207. Биргер, И. А. Прочность, устойчивость, колебания : в 2 томах / под общей редакцией И. А. Биргера и Я. Г. Пановко. – Москва : Машиностроение, 1968. – Т. 2. – 463 с.
208. Джонсон, К. Механика контактного взаимодействия / К. Джонсон ; пер. с английского. – Москва : Мир, 1989. – 510 с.
209. Hertz, H. Über die Berührung fester elastischer Körper / H. Hertz // Journal für die reine und angewandte Mathematik. – 1882. – Vol. 92. – P. 156–171.
210. Попов, В. Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения / В. Л. Попов. – Москва : Физматлит, 2012. – 348 с.
211. Перельман, Р. Г. Эрозия элементов паровых турбин / Р. Г. Перельман, В. В. Пряхин. – Москва : Энергоатомиздат, 1986. – 184 с.
212. Johnson, W. J. Mech. Eng. Science / W. Johnson, G. W. Vickers. – 1973. – Vol. 15. – P. 320–310.
213. Hwang, J. G. The impact between a liquid drop and elastic half-space : dissertation / J. G. Hwang. – University of Michigan, 1975. – 158 p.
214. Дерябин, А. А. Контроль качества сварных соединений : курс лекций / А. А. Дерябин. – М: Изд-во «МГТУ им. Баумана», 2015. – 255 с.
215. Савельев, И. В. Курс общей физики : в 5 томах. Том 3. Колебания и волны / И. В. Савельев. – Москва : Лань, 2011.
216. Пановко, Я. Г. Введение в теорию механического удара / Я. Г. Пановко. – Москва : Наука, 1977. – 224 с.
217. Алешин, Н. П. Физические методы неразрушающего контроля сварных соединений: уч. пос. / Н. П. Алешин. – 2-е издание. – Москва : Машиностроение, 2013. – 576 с.
218. Зацепин, А. Ф. Акустический контроль : в 2 частях. Часть 1. Введение в физику акустического контроля / А. Ф. Зацепин. – Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2005. – 88 с.
219. Викторов, И. А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике / И. А. Викторов. – Москва : Наука, 1966. – 168 с.
220. Трухний, А. Д. Теплофикационные паровые турбины и турбоустановки : учебное пособие для вузов / А. Д. Трухний, Б. В. Ломакин. – Москва : Альянс, 2021. – 540 с.
221. Голдсмит, В. Удар. Теоретические и физические свойства соударяемых тел / В. Голдсмит. – Москва : Стройиздат, 1965. – 448 с.

222. Hunt, K. H. Coefficient of restitution interpreted as damping in vibroimpact / K. H. Hunt, F. R. E. Crossley // ASME Journal of Applied Mechanics. – 1975. – Vol. 42, Issue 2. – P. 440–445.
223. Боровин, Г. К. Обобщенная модель удара Герца-Ханта-Кроссли / Г. К. Боровин, В. В. Лапшин // Вестник МГТУ имени Н. Э. Баумана. Серия "Естественные науки". – 2018. – № 6. – ISSN 1812-3368. – С. 18–30.
224. Физический энциклопедический словарь / под гл. ред. А. М. Прохорова. – Москва : Большая российская энциклопедия, 1995. – 928 с.
225. Андреев, А. А. Вакуумно-дуговые устройства и покрытия / А. А. Андреев, Л. П. Саблев, В. М. Шулаев, С. Н. Григорьев. – Харьков : Национальный научный центр "Харьковский физико-технический институт", 2005. – С. 236.
226. Кунченко, Ю. В. Модель формирования слоистой структуры покрытий, получаемых методом вакуумно-дугового осаждения.
227. Аксёнов, И. И. Вакуумная дуга в эрозионных источниках плазмы / И. И. Аксёнов. – Харьков: Национальный научный центр "Харьковский физико-технический институт", 2005. – С. 212.
228. Любимов, В. В. Комплексная модель процесса осаждения покрытий методом КИБ / В. В. Любимов, А. В. Иванов // Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов в машиностроении (ОТТОМ). – Харьков, 2003. – Раздел 3. – С. 281–286.
229. Будилов, В. В. Математическое моделирование процессов осаждения вакуумных ионно-плазменных покрытий / В. В. Будилов, В. С. Мухин, О. Б. Минаева // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 1995. – № 1. – С. 92–95.
230. Аксёнов, И. И. Вакуумная дуга в эрозионных источниках плазмы / И. И. Аксёнов // Харьков : Национальный научный центр "Харьковский физико-технический институт". – 2005. – С. 212.
231. Барвинок, В. А. Физические основы и математическое моделирование процессов вакуумного ионно-плазменного напыления / В. А. Барвинок. – Москва : Машиностроение, 1999. – 309 с.
232. Трофимов, В. И. Рост и морфология тонких плёнок / В. И. Трофимов, В. А. Осадченко. – Москва : Энергоатомиздат, 1993. – 265 с.
233. Иноземцев, А. А. Современные титановые сплавы и проблемы их развития / А. А. Иноземцев, И. Г. Башкатов, А. С. Коряковцев // Журнал "Все материалы. Энциклопедический справочник". – 2010. – № 5. – С. 2–8.
234. Павлов, Т. В. Титановые сплавы для газотурбинных двигателей / Т. В. Павлов, О. С. Кашапов, Н. А. Ночовная // Журнал "Все материалы. Энциклопедический справочник". – 2012. – № 5. – С. 2–8.

235. Борисова, Е. А. Титановые сплавы. Металлография титановых сплавов / Е. А. Борисова, Г. А. Бочвар, М. Я. Брун и др. – Москва : Металлургия, 1980. – 464 с.
236. Горелик, С. С. Рентгенографический и электронно-оптический анализ : учебное пособие для вузов / С. С. Горелик, Ю. А. Скаков, Л. Н. Расторгуев. – 3-е изд., доп. и перераб. – Москва : МИСиС, 1994. – 328 с.
237. Приборы и методы физического металловедения / под ред. Ф. В. Вейнерберга. – Выпуск 2. – Москва : Мир, 1974. – 363 с.
238. Основы просвечивающей электронной микроскопии / перевод с англ. В. М. Кардонного и А. Г. Хачатуряна. – Москва : Мир, 1966. – 471 с.
239. Эндрюс, К. Электронограммы и их интерпретация / К. Эндрюс, Д. Дайсон, С. Киоун; перевод с англ. М. П. Усикова; под ред. Л. Г. Орлова. – Москва : Мир, 1971. – 256 с.
240. Горелик, С. С. Рентгенографический и электронно-оптический анализ : практическое руководство по рентгенографии, электронографии и электронной микроскопии металлов, полупроводников и диэлектриков : учебное пособие / С. С. Горелик, Л. Н. Расторгуев, Ю. А. Скаков. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва : Металлургия, 1970. – 366 с.
241. Определение остаточных напряжений в поверхностном слое пера лопаток двигателей. Методические материалы / НИАТ. – 1965. – 20 с.
242. Букатый, С. А. Автоматизированная система определения остаточных напряжений в образцах сложной формы / С. А. Букатый, А. С. Букатый // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. акад. С. П. Королёва. – 2006.
243. Комплексы автоматизированные для измерения поверхностных остаточных напряжений в металлах и сплавах механическим методом. [Электронный источник]. URL: http://ooo-technolog.ru/index.php/pion.html (дата обращения: 26.04.2023).
244. Freedman, M. X-ray analysis of residual elastic strain in quartzose rocks. – Proc. 10th Symp. Rock Mech. Fustintex, New York, 1972.
245. Комяков, Н. И. Рентгеновские методы и аппаратура для определения напряжений. – Москва : Машиностроение, 1972.
246. Кузнецова, Е. В. Рентгенография металлов и сплавов : учебное пособие / Е. В. Кузнецова, О. А. Косинова и др. // Липецкий государственный технический университет, 2019. – 187 с.
247. Медников, А. Ф. Исследование процесса изменения характеристик рельефа поверхности лопаточной стали в инкубационном периоде развития каплеударной эрозии / А. Ф. Медников, В. А. Рыженков, Л. И. Селезнев, А. И. Лебедева // Теплоэнергетика. – 2012. – № 5. – С. 69–75.

248. Экспериментальный комплекс уникальных стендов и установок – «Гидроударный стенд Эрозия-М». [Электронный источник]. URL: https://usu-erosion.mpei.ru/Pages/default.aspx (дата обращения: 26.04.2023).
249. Беркович, И. И. Трибология. Физические основы, механика и технические приложения : учебник для вузов / И. И. Беркович, Д. Г. Громаковский ; под ред. Д. Г. Громаковского ; Самарский государственный технический университет. – Самара, 2000. – 268 с.
250. Ефимов , Ю.В. Ванадий и его сплавы / Ю. В. Ефимов, В. В. Барон, Е. М. Савицкий. – Москва : Наука, 1969. – 254 с.
251. Медников, А. Ф. Исследование процесса изменения характеристик рельефа поверхности лопаточной стали в инкубационном периоде развития каплеударной эрозии / А. Ф. Медников, В. А. Рыженков, Л. И. Селезнев, А. И. Лебедева // Теплоэнергетика. – 2012. – № 5. – С. 69–75.
252. Рыженков, В. А. Современное состояние и способы решения проблемы эрозионного износа лопаток влажнопаровых ступеней турбин // Теплоэнергетика. – 2011. – № 9. – С. 8–13.
253. Амелюшкин, В. Н. Эрозия рабочих лопаток паровых турбин со стеллитовой защитой // Энергетик. – 2002. – № 8. – С. 35–36.
254. Варавка, В. Н. Применение нанокомпозитных покрытий для защиты энергетического оборудования от каплеударной эрозии / В. Н. Варавка, О. В. Кудряков, А. В. Рыженков и др. // Теплоэнергетика. – 2014. – № 11. – С. 29–35.
255. Варавка, В. Н. Закономерности и параметры каплеударной эрозии титановых сплавов / В. Н. Варавка, О. В. Кудряков, А. Ф. Медников, В. А. Ирха // Изв. вузов. Сев.-Кавказ. регион. Технические науки. – 2011. – № 6. – С. 92–98.
256. Дергачев, К. В. Электронная система прогнозирования эрозии рабочих лопаток турбин атомных станций // Изв. вузов. Ядерная энергетика. – 2001. – № 3. – С. 3–13.
257. Лагерев, А. Б. Вероятностное прогнозирование эрозии в системах технической диагностики влажнопаровых турбомашин // Изв. РАН. Энергетика. – 1997. – № 2. – С. 134–143.
258. Buckley, D. H. Influence of Various Physical Properties of Metals on Their Friction and Wear Behavior in Vacuum // Metals Engineering Quarterly. – 1967. – May. – P. 44–53.
259. Семенов, А. П. Методика и некоторые результаты исследования трения и адгезионного взаимодействия при высоких температурах в вакууме и газовых средах / А. П. Семенов, В. В. Поздняков // Сборник трудов: Структура и свойства жаропрочных металлических материалов. – Москва: Наука, 1967. – С. 101–109.
260. Носовский, И. Г. О роли кристаллического строения при трении и схватывании металлов / И. Г. Носовский, И. В. Исаев, Б. И. Костецкий // Доклады Академии наук СССР. – 1971. – Т. 198, № 1. – С. 79–82.

261. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник: В 3 т.: Т. 3. Кн. 2 / Под общ. ред. Н. П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 2000. – 448 с.
262. Brotzen, F. Decomposition of Beta Titanium / F. Brotzen, R.Franz, E. L. Harmon, A. R. Troiano // JOM. – №7. – 1955. – P. 413-419.
263. Бельченко, Г. И. Основы металлографии и пластической деформации стали / Г. И. Бельченко, С. И. Губенко. – М. : Высшая школа, 1987. – 240 с.
264. Патент РФ № 2355828 C2, МПК B23H9/16. Способ электролитно-плазменной обработки деталей / авторы: Смыслов А. М., Смыслова М. К., Мингажев А. Д., Селиванов К. С., Гордеев В. Ю., Павлинич С. П. : № 2007115768/02 заявл. 25.04.2007 ; опубл. 20.05.2009, Бюл. № 14 ; заявитель: ООО "НПП Уралавиаспецтехнология".
265. Патент РФ № 2373306 C2, МПК B22F3/08. Способ многоэтапного электролитно-плазменного полирования изделий из титана и титановых сплавов / авторы: Смыслов А. М., Смыслова М. К., Копцев С. Н., Мингажев А. Д., Селиванов К. С., Гордеев В. Ю., Мосалев Г. В., Павлинич С. П., Таминдаров Д. Р., Останина А. А. : № 2007123850/02 заявка от 25.06.2007; опубл.: 20.11.2009 ; заявитель : ООО "НПП Уралавиаспецтехнология".
266. Куликов, И. С. Электролитно-плазменная обработка материалов / И. С. Куликов, С. В. Ващенко, А. Я. Каменев. – Минск : Беларус. навука, 2010. – 232 с.
267. Захаров, С. В. Повышение эффективности обработки методом электролитно-плазменного полирования на основе ионизационной модели парогазовой оболочки : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.06 / С.В. Захаров. – Москва, 2022. – 147 с.
268. Плотников, Н. В. К вопросу о модели электролитно-плазменного полирования поверхности / Н. В. Плотников, Д. Р. Таминдаров, А. М. Смыслов // Вестник УГАТУ. – 2017. – Т. 17, № 4 (57). – С. 90–95.
269. Таран, В. М. Очистка поверхностей изделий перед напылением газовыми разрядами / В. М. Таран, Б. С. Митин, Г. В. Бобров // Теория и практика газотермического нанесения покрытий : тезисы докладов. – Дмитров, 1983. – С. 52–56.
270. Крапивина, С. А. Плазмохимические технологические процессы / С. А. Крапивина. – Ленинград : Химия, 1981. – 248 с.
271. Лясников, В. Н. Плазменное напыление покрытий в производстве изделий электронной техники / В. Н. Лясников, В. С. Украинский, Г. Ф. Богатырев. – Саратов: Издательство Саратовского университета, 1985. – 200 с.
272. Бекренев, Н. В. Обеспечение качества деталей высокоточных изделий на основе формирования однородных структур покрытий при их плазменном напылении и абразивно-алмазной обработке с воздействием ультразвука : диссертация доктора технических наук : 05.07.04 / Н. В. Бекренев. – Саратов, 1999. – 563 с.

273. Патент № 2425173 C2 Российская Федерация, МПК C23C 14/02, C23C 14/22, C23C 14/56. Установка для комбинированной ионно-плазменной обработки : № 2009100667/02 : заявл. 11.01.2009 : опубл. 27.07.2011 / А. М. Смыслов, М. К. Смыслова, М. Ю. Дыбленко [и др.] ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью Научно-производственное предприятие "Уралавиаспецтехнология".
274. Патент № 2710809 C1 Российская Федерация, МПК C23C 14/00, C23C 4/12, C23C 14/24. Установка для нанесения ионно-плазменных покрытий : № 2019124707 : заявл. 05.08.2019 : опубл. 14.01.2020 / В. А. Гонтюрев, А. М. Смыслов, Ю. М. Дыбленко [и др.] ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью "НПП "Уралавиаспецтехнология".
275. Патент № 2380457 C2 Российская Федерация, МПК C23C 14/34, C23C 14/56. Катодный узел электродугового испарителя : № 2007145766/02 : заявл. 10.12.2007 : опубл. 27.01.2010 / А. М. Смыслов, М. К. Смыслова, А. Д. Мингажев [и др.] ; заявитель ООО "НПП Уралавиаспецтехнология".
276. Патент № 2404284 C2 Российская Федерация, МПК C23C 14/24. протяженный электродуговой испаритель токопроводящих материалов : № 2008137326/02 : заявл. 17.09.2008 : опубл. 20.11.2010 / А. М. Смыслов, М. К. Смыслова, А. Д. Мингажев [и др.] ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью Научно-производственное предприятие "Уралавиаспецтехнология".
277. Патент № 2420608 C1 Российская Федерация, МПК C23C 14/32. Электродуговой испаритель с составным вращающимся катодом : № 2009141158/02 : заявл. 09.11.2009 : опубл. 10.06.2011 / А. М. Смыслов, М. К. Смыслова, А. Д. Мингажев [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение "Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт".
278. Патент № 2380456 C1 Российская Федерация, МПК C23C 14/34, C23C 14/02, C23C 14/56. Способ нанесения ионно-плазменных покрытий и установка для его осуществления : № 2008117934/02 : заявл. 04.05.2008 : опубл. 27.01.2010 / А. М. Смыслов, М. К. Смыслова, А. Д. Мингажев [и др.] ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью "Научно-производственное предприятие "Уралавиаспецтехнология".
279. Патент № 2399692 C2 Российская Федерация, МПК C23C 14/34, C23C 14/56. Способ нанесения покрытия и электродуговой испаритель с вращающимся катодом для осуществления способа : № 2008113908/02 : заявл. 08.04.2008 : опубл. 20.09.2010 / А. М. Смыслов, М. К. Смыслова, Ю. М. Дыбленко [и др.] ; заявитель Федеральное государственное учреждение Российский научный центр "Курчатовский институт".

280. Патент № 2376398 C2 Российская Федерация, МПК C23C 14/24, C23C 14/14. Способ нанесения ионно-плазменного покрытия и узел электродугового испарителя с составным катодом : № 2008101693/02 : заявл. 15.01.2008 : опубл. 20.12.2009 / А. М. Смыслов, М. К. Смыслова, Ю. М. Дыбленко [и др.] ; заявитель Федеральное Государственное учреждение Российский научный центр "Курчатовский институт".
281. Смыслов, А. М. Новая вакуумная установка и технология комбинированной упрочняющей обработки, нанесения покрытий на детали ГТД и энергетических установок / А. М. Смыслов, К. С. Селиванов [и др.] // Вестник УГАТУ. – 2016. – Т. 17, № 1 (54). – С. 108–113.
282. Чучуева, И. А. Модель прогнозирования временных рядов по выборке максимального подобия : диссертация... кандидата технических наук : 05.13.18 / Чучуева Ирина Александровна. – Москва, 2012. – 123 с.
283. Вознесенский, В. А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях / В. А. Вознесенский. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Финансы и статистика, 1981. – 263 с.
284. Круглов, В. В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика / В. В. Круглов, В. В. Борисов. – Москва : Горячая линия-Телеком, 2001. – 382 с.
285. Осовский, С. Нейронные сети для обработки информации / С. Осовский. – Москва : Финансы и статистика, 2004. – 344 с.
286. Гулаков, К. В. Выбор архитектуры нейронной сети для решения задач аппроксимации и регрессионного анализа экспериментальных данных / К. В. Гулаков // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2013. – № 2 (38). – С. 95–105.
287. Волкова, В. Н. Основы теории систем и системного анализа / В. Н. Волкова, А. А. Денисов. – Санкт-Петербург : Издательство СПбГТУ, 1997. – 510 с.
288. Иванов, А. М. Общая теория систем / А. М. Иванов, В. П. Петров, И. С. Сидоров, К. А. Козлов. – Санкт-Петербург : Научная мысль, 2005. – 480 с.
289. Rojas, R. Neural Networks / R. Rojas. – Berlin : Springer-Verlag, 1996. – 512 p.
290. Рутковская, Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский. – Москва : РиС, 2013. – 384 с.
291. Хайкин, С. Нейронные сети / С. Хайкин. – М. : Диалектика, 2019. – 1104 с.
292. Круглов, В. В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика / В. В. Круглов, В. В. Борисов. – Москва : Горячая линия-Телеком, 2001. – 382 с.
293. Осовский, С. Нейронные сети для обработки информации / С. Осовский. – Москва : Финансы и статистика, 2004. – 344 с.
294. Masters, T. Practical Neural Network Recipes in C++ / T. Masters. – Boston : Academic Press, 1993. – 493 p.

295. Галушкин, А. И. Нейронные сети: основы теории / А. И. Галушкин. – Москва : РиС, 2015. – 496 с.
296. Хайкин, С. Нейронные сети: полный курс / С. Хайкин. – Москва : Диалектика, 2019. – 1104 с.
297. Гиясов, Б. И. Стендовые ускоренные испытания технических систем на надежность : уч. пос. / Б. И. Гиясов, Н. Г. Серегин, Д. Н. Серегин, В. А. Беляков. – Москва : Издательство АСВ, 2017. – 74 с.
298. Гишваров, А. С. Моделирование ускоренных испытаний технических систем на надежность и ресурс / А. С. Гишваров // Вестник УГАТУ. – 2007. – Т. 9, № 1 (19). – С. 26–40.
299. Березин, Г. В. Оценка эксплуатационной эффективности совместного применения пылезащитного устройства и защитного покрытия лопаток компрессора вертолетного ГТД / Г. В. Березин, В. М. Сушенцов // Конструкция двигателей летательных аппаратов, их прочность и надежность : сборник научных трудов. – Москва : МАИ, 1992. – С. 18–24.
300. ГОСТ 21708–96. Угли бурые, каменные и антрацит. Метод определения коэффициента абразивности золы. – М. : Изд-во стандартов, 1996.– 7 с.
301. Shandu, R. D. Experimental investigation of erosion caused by gas-borne ash particles : a dissertation submitted to the Faculty of Engineering, University of the Witwatersrand, in fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Engineering / R. D. Shandu. – Johannesburg, 2007. – 122 p.
302. Кривошеев, И. А. Особенности движения частиц пыли в проточной части и изменения геометрии лопаток компрессоров в процессе эксплуатации газотурбинных установок / И. А. Кривошеев, Р. Ф. Камаева, С. А. Струговец // Вестник УГАТУ. – 2011. – Т. 15, № 3 (43). – С. 18–28.
303. Гумеров, А. В. Предельное состояние осевого компрессора ГТД в условиях эксплуатации в запыленной атмосфере : диссертация... кандидата технических наук / Гумеров Александр Витальевич. – 2011. – 147 с.
304. Техническое описание и работа двигателя АЛ-31СТ / НТЦ им. А. Люльки ОАО «НПО» Сатурн». – Москва, 2005. – 709 с.
305. Назаров, А. П. Конструкция АЛ-31 : учебное пособие / А. П. Назаров. – Москва : ВВИА им. проф. Жуковского, 1987. – 363 с.
306. Кривошеев, И. А. Анализ влияния частиц пыли на параметры ступеней осевого компрессора / И. А. Кривошеев, С. А. Струговец, Р. Ф. Камаева // Вестник ВГТУ. – 2011. – № 7. [Электронный ресурс]. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-vliyaniya-chastits-pyli-na-parametry-stupeney-osevogo-kompressora (дата обращения: 26.04.2023).

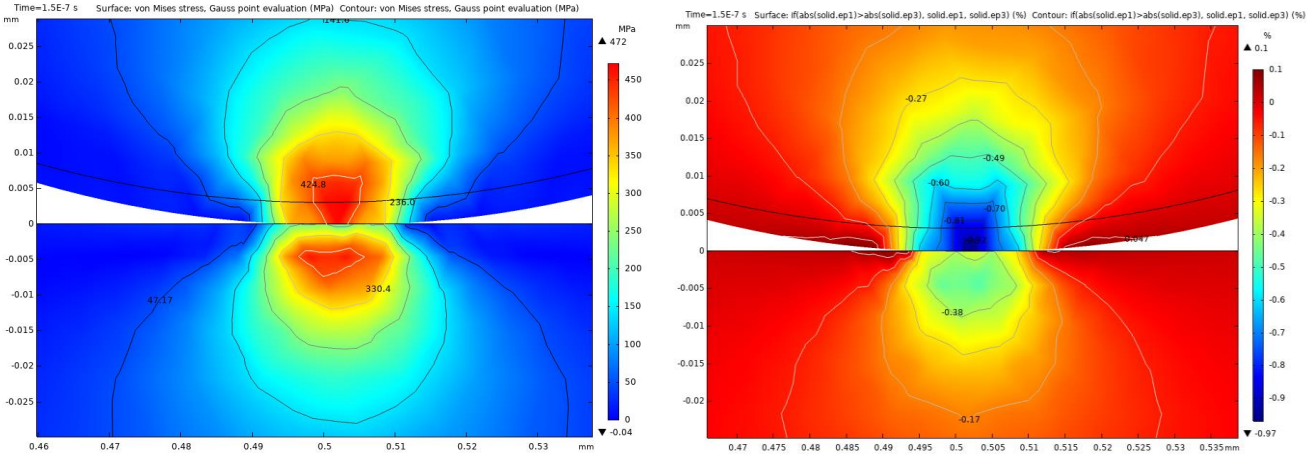
307. Hamed, A. Experimental and numerical simulation of ingested particles in gas turbine engines / A. Hamed, W. Tabakoff // AGARD (NATO) 83rd Symposium of Propulsion and Energetics Panel on Turbines. – Rotterdam, The Netherlands, 1994.
308. Двирник, Я. В. Оценка предельного состояния лопаток компрессора вертолетных ГТД по частоте собственных колебаний / Я. В. Двирник, Д. В. Павленко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2016. – № 7 (134). – С. 79–83.
309. Авиационный турбореактивный двигатель ТВ2-117А и редуктор ВР-8А / под ред. В. И. Солоницына. – Москва : Машиностроение, 1987. – 256 с. – С. 227–231.
310. Фактор запыленности воздуха как решающий при определении облика перспективного вертолетного ГТД : техническая справка № 13286 / ЦИАМ им. П. И. Баранова. – Москва, 2007.
311. Гинзбург, Л. Е. Исследование запыленности воздуха вблизи вертолетов Ми-1 и Ми-4 в эксплуатационных условиях / Л. Е. Гинзбург, Е. И. Никитин // Вертолетные газотурбинные двигатели : сборн. статей. – М. : Машиностроение, 1966. – 145-165 с.
312. Шальман, Ю. И. Износ и изменение параметров осевой и центробежной ступеней при работе на запыленном воздухе / Ю. И. Шальман // Вертолетные газотурбинные двигатели : сборник статей. / Под. ред. М.М. Масленникова. – Москва : Машиностроение, 1966. – С.163-199.

Приложение А
(Обязательное)

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ УДАРА ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ О ПОВЕРХНОСТЬ С МНОГОСЛОЙНЫМ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫМ ПОКРЫТИЕМ

А.1 Эпюры эквивалентных напряжений и величин деформаций многослойных покрытий, нанесенных на сплав ВТ6, при ударе частицы кварцевого песка в момент их максимального сближения

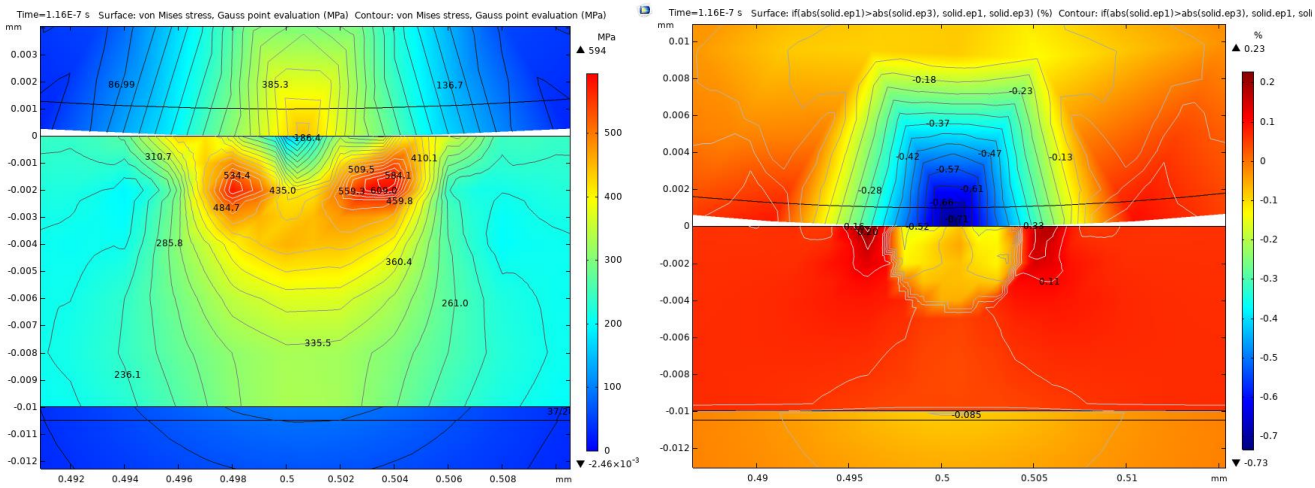
Размер частицы ∅0,3 мм, скорость частицы 76 м/с, угол атаки 60°



а *б*

а – эквивалентные напряжения; *б* – величина деформации

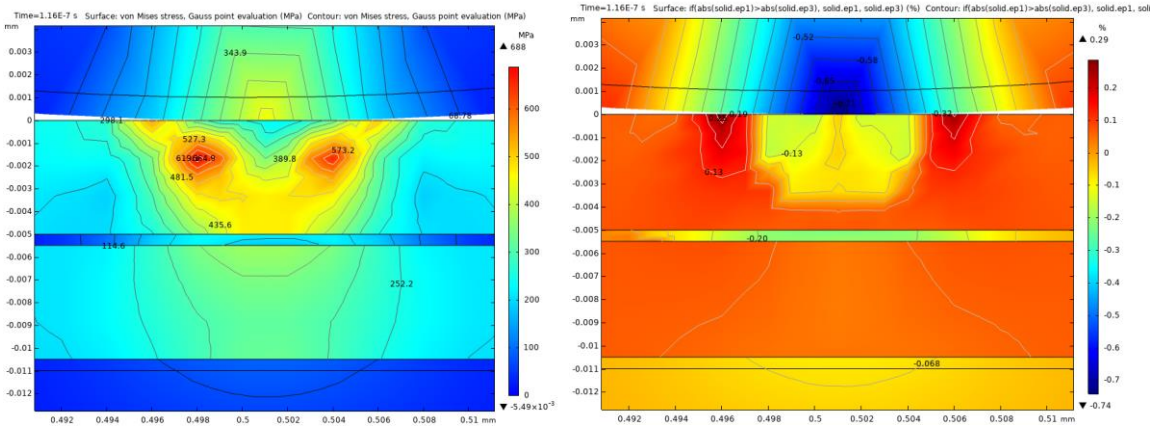
Рисунок А.1 – Основной материал (сплав ВТ6) без покрытия



а *б*

а – эквивалентные напряжения; *б* – величина деформации

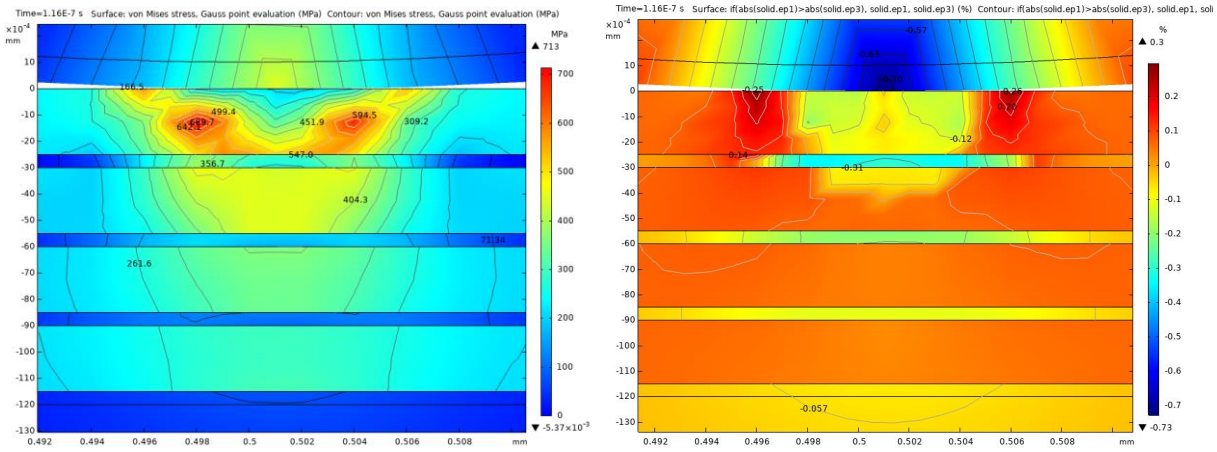
Рисунок А.2 – Многослойное покрытие 10TiN



а *б*

а – эквивалентные напряжения; *б* – величина деформации

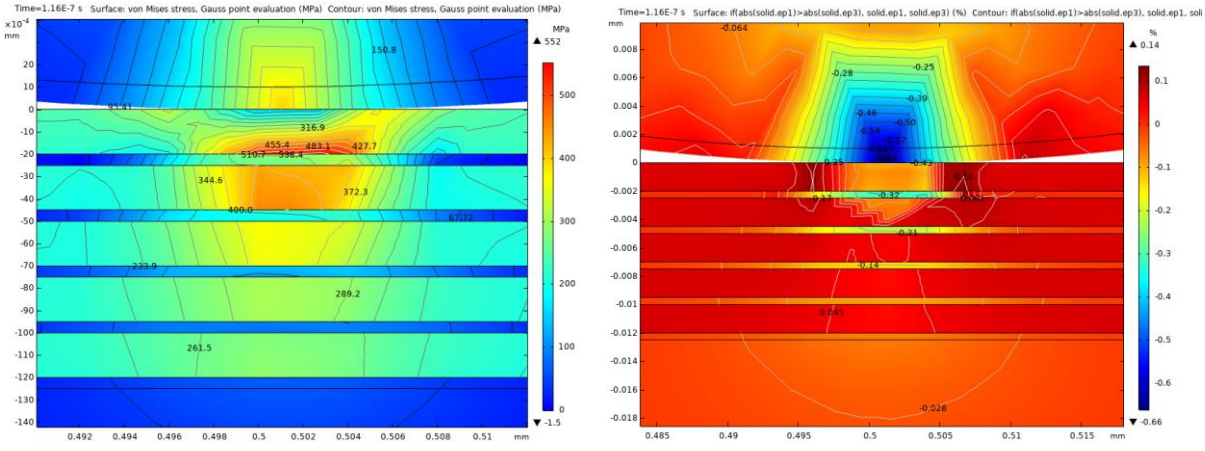
Рисунок А.3 – Многослойное покрытие (0,5Ti-5TiN)x2



а *б*

а – эквивалентные напряжения; *б* – величина деформации

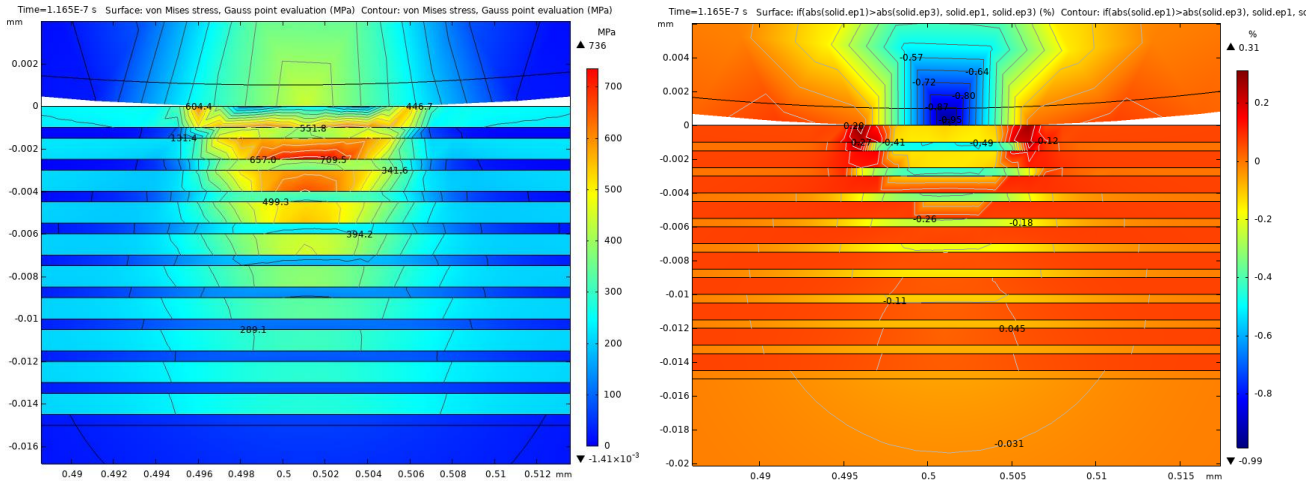
Рисунок А.4 – Многослойное покрытие (0,5Ti-2,5TiN)x4



а *б*

а – эквивалентные напряжения; *б* – величина деформации

Рисунок А.5 – Многослойное покрытие (0,5Ti-2TiN)x5



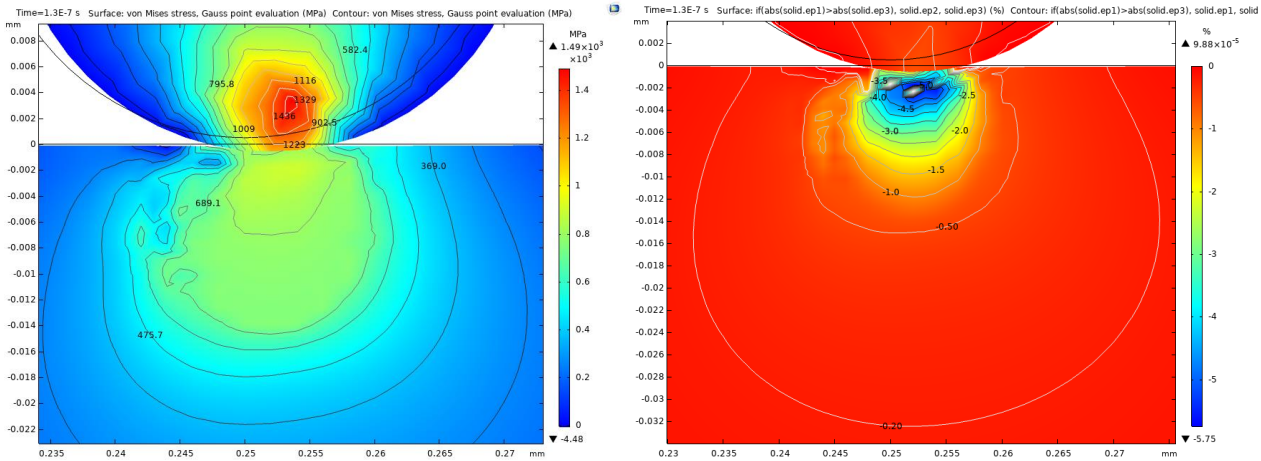
а *б*

а – эквивалентные напряжения; *б* – величина деформации

Рисунок А.6 – Многослойное покрытие (0,5Ti-1TiN)x10

А.2 Эпюры эквивалентных напряжений и деформаций, возникающих в многослойных покрытиях при ударе частицей электрокорунда в момент максимального сближения

Размер частицы ∅0,04 мм, скорость частицы 76 м/с, угол атаки 60^{O}

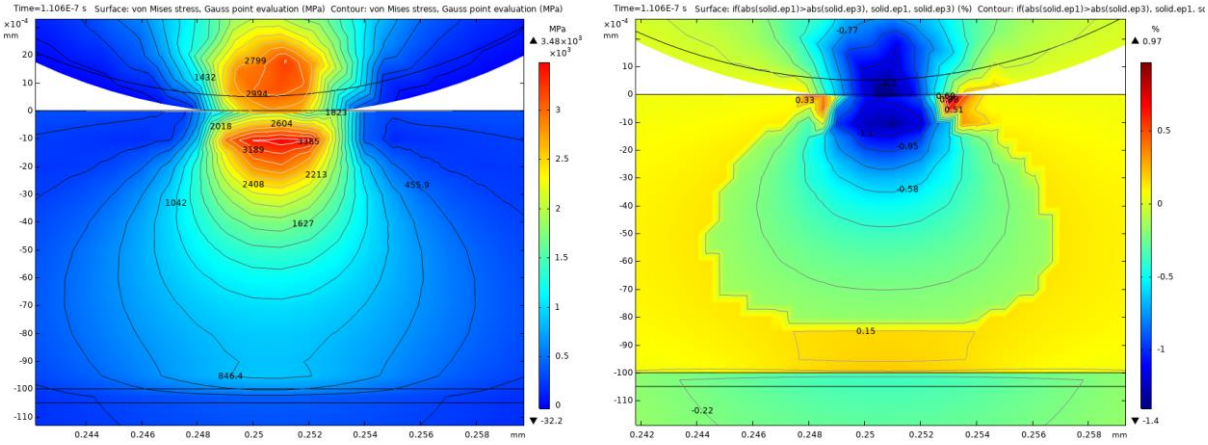


а *б*

а – эквивалентные напряжения; *б* – величина деформации

При максимальном сближении абразивная частица не разрушается

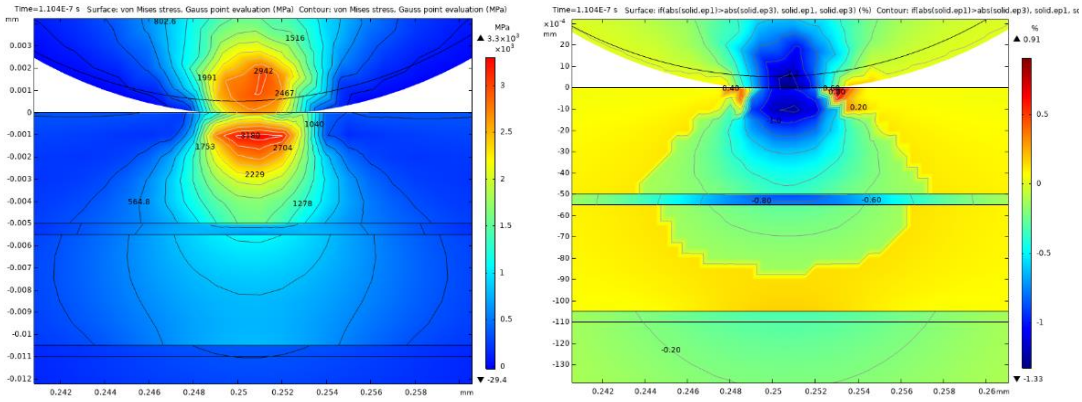
Рисунок А.7 – Основной материал (сплав ВТ6) без покрытия



а *б*

а – эквивалентные напряжения; *б* – величина деформации

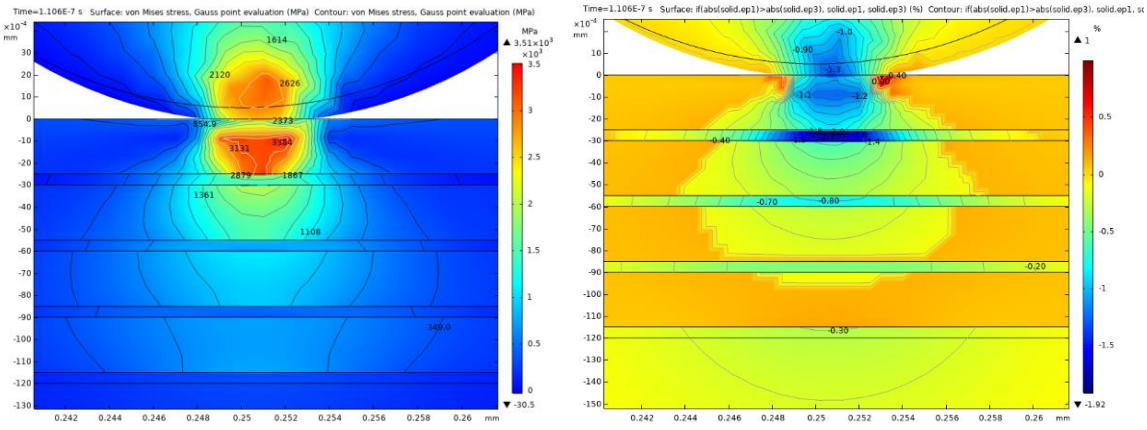
Рисунок А.7 – Многослойное покрытие 10TiN



а *б*

а – эквивалентные напряжения; *б* – величина деформации

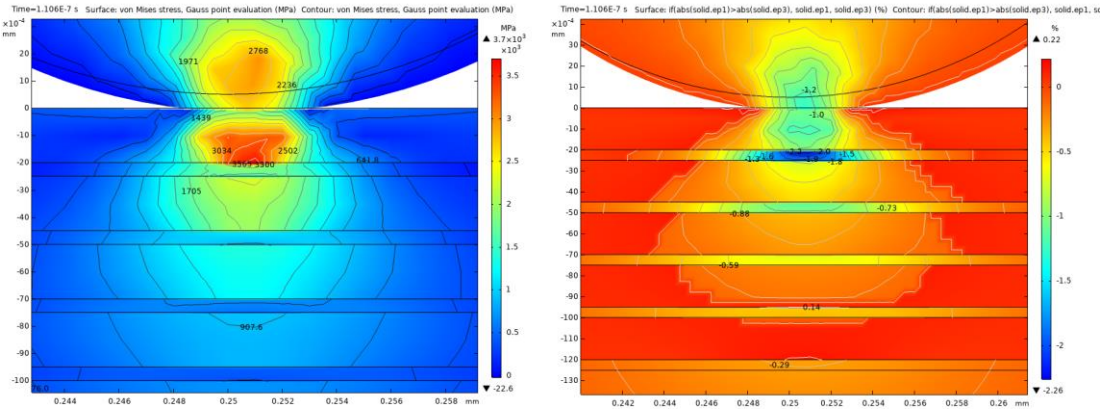
Рисунок А.8 – Многослойное покрытие (0,5Ti-5TiN)x2



а *б*

а – эквивалентные напряжения; *б* – величина деформации

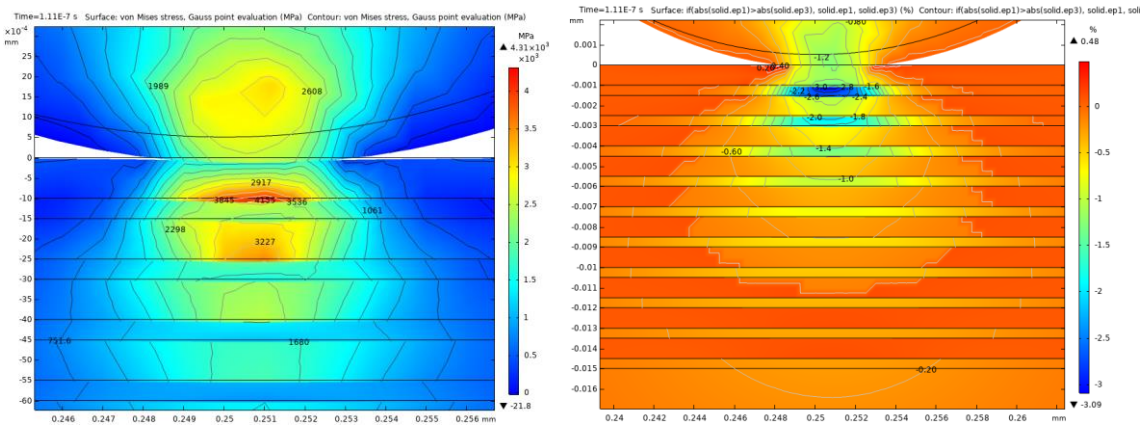
Рисунок А.9 – Многослойное покрытие (0,5Ti-2,5TiN)x4



а *б*

а – эквивалентные напряжения; *б* – величина деформации

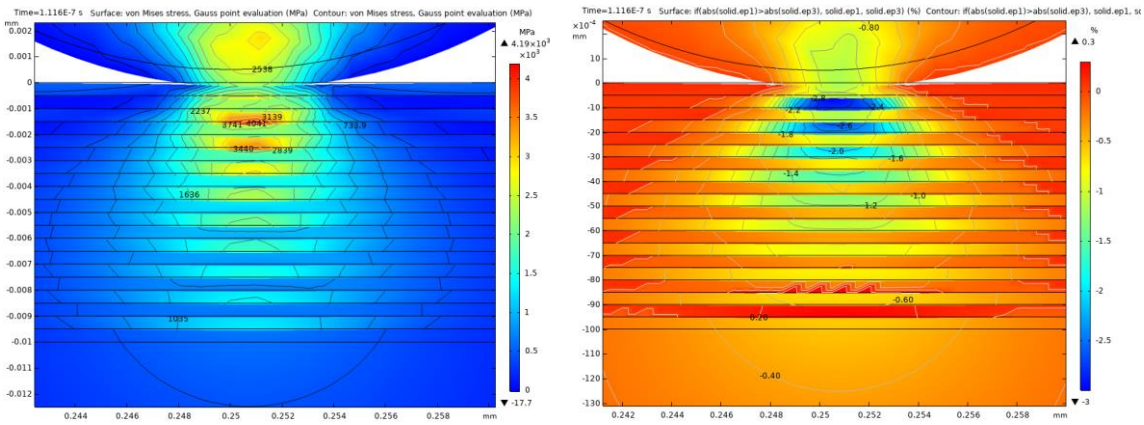
Рисунок А.10 – Многослойное покрытие (0,5Ti-2TiN)x5



а *б*

а – эквивалентные напряжения; *б* – величина деформации

Рисунок А.11 – Многослойное покрытие (0,5Ti-1TiN)x10



а *б*

а – эквивалентные напряжения; *б* – величина деформации

Рисунок А.12 – Многослойное покрытие (0,5Ti-0,5TiN)x10

Приложение Б

(Обязательное)

ПРОЦЕССЫ КОМПЛЕКСНОЙ ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ

- Генерация низкотемпературной плазмы и транспорт ионного потока к обрабатываемым деталям;
- Влияние шероховатости поверхности детали на плотность тока;
- Рассеяние ионов при их движении от ионного источника к детали;
- Искажение электрического поля у поверхности детали;
- Взаимодействие ускоренных ионов с поверхностью детали;
- Ионное распыление (очистка) материала поверхности;
- Ионное легирование (имплантация);
- Постимплантационный отжиг.

Генерация низкотемпературной плазмы и транспорт ионного потока к обрабатываемым деталям

При ионно-плазменной обработке инструментом воздействия на поверхность являются ионы плазмы, формируемые при электрическом разряде в атмосфере газа при давлении $10^3 \ldots 10^{-1}$ Па, например, при катодном распылении. В ионно-лучевых процессах используют ионный поток, полученный с помощью ионного источника и направленный в область более высокого вакуума. В обоих случаях энергетическое воздействие и обработка поверхности происходит за счет формирования и управления ионным потоком с различной плотностью и энергией заряженных частиц. Управляя этими параметрами, можно одновременно или последовательно реализовывать процессы: ионного распыления (травления), нагрева, термической обработки, ионного легирования (имплантации), конденсации покрытий, пленок[5] и др.

Под термином комплексная вакуумная ионно-плазменная обработка (КВИПО) будем понимать способ совместного (одновременного или последовательного) целенаправленного воздействия на обрабатываемую поверхность нескольких ионно-плазменных или ионно-лучевых процессов, совмещенных в одном вакуумном пространстве. Классификация методов КВИПО по изменению ее основных параметров: плотности (n, см$^{-3}$) и энергии заряженных частиц (E, эВ), показана на диаграмме, Рисунок Б.1. Область I диаграммы (менее 1 эВ) соответствует процессам

[5] *Пленка* – тонкий слой конденсированного вещества, толщина которого соизмерима с расстоянием действия поверхностных сил [Технология тонких пленок и покрытий Уч.пос. / Маскаева Л.Н. и др., Урал. фед. ун-т. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2019. – 236 с.]

с тепловой природой: низкотемпературные плазменные процессы вакуумного испарения и конденсации, в основном из паровой фазы, реализуемые без формирования направленного ионного потока. В отечественной литературе эти методы обработки известны как «*химическое парофазное осаждение*», а в зарубежной – *Chemical vapor deposition* (CVD). К ним относят: резистивное испарение, испарение электронным лучом, лазерное испарение, испарение взрывом.

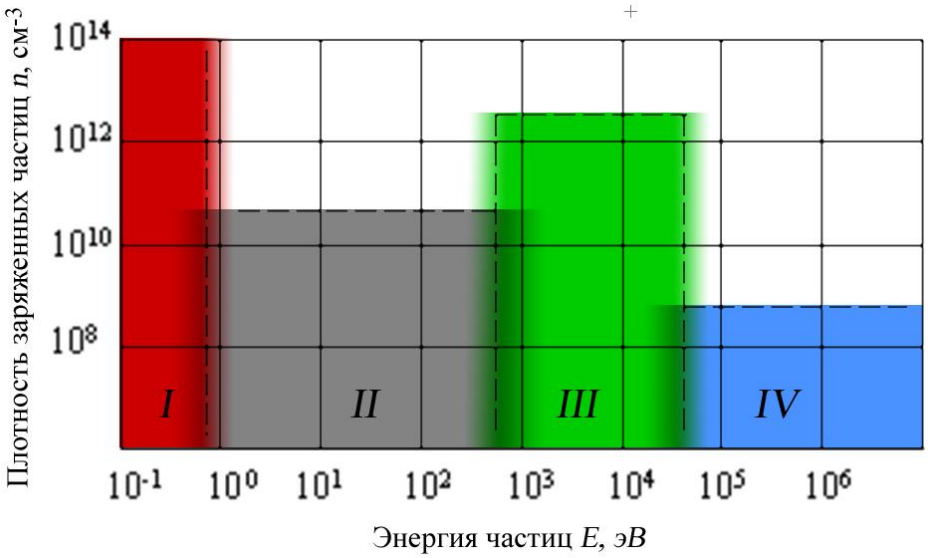


Рисунок Б.1 – Диаграмма процессов комплексной вакуумной ионно-плазменной обработки (КВИПО), обозначения в тексте

Область II диаграммы (от 1 до 1000 эВ) соответствует конденсации из ускоренного ионного потока, например, ионное осаждение, известное в отечественной литературе как «*конденсация с ионной бомбардировкой*» (метод КИБ), а в зарубежной – *Physical vapor deposition* (PVD). К ним относят магнетронное распыление и электродуговое катодное распыление с последующей конденсацией.

Область III диаграммы (от 1 до 10 кэВ) соответствует энергиям, при которых наблюдается ионное распыление поверхности и начинают проявляться эффекты внедрения ионов в глубь кристаллической решетки. Эта область диаграммы соответствует процессам ионного травления (ионной очистки), широко используемой в качестве подготовки поверхности перед нанесением покрытия.

Область IV диаграммы (более 10 кэВ), где основным процессом является процесс высокоэнергетической ионной имплантации и создания специфической структуры материала поверхно-

сти, содержащий квазиаморфный поверхностный слой с высоким уровнем сжимающих напряжений (порядка 1 ГПа) и концентрацией радиационно-стимулированных дефектов в виде дислокаций, атомов внедрения и пар Френкеля[6,7].

Необходимо отметить, что указанные на диаграмме границы (Рисунок Б.1) являются условными и определяют области ведущих процессов энергетического воздействия, так как на практике из-за неравномерности энергий плазменных частиц во всех указанных областях с той или иной интенсивностью будут протекать процессы разогрева, распыления, внедрения и конденсации. Таким образом, КВИПО, объединяя рассмотренные процессы в одном вакуумном объеме, позволяет реализовать упрочняющую обработку лопаток паровых и газовых турбин, включающую в себя последовательное проведение процессов ионной очистки, ионной имплантации (модификации) поверхности, ионного нагрева и осаждения различных материалов покрытий с нескольких электродуговых испарителей. При этом, изменяя скорость осаждения различных материалов и давление реакционного газа, реализуют требуемую структуру многослойных композитных покрытий, сочетающих в себе чередование основного материала покрытия и его нитридных, карбидных и др. химических соединений требуемого стехиометрического состава.

Общим для всех вакуумно-плазменных процессов КВИПО является формирование в объеме вакуумной камеры плазменного облака вследствие эрозии (распыления) мишени из напыляемого материала под воздействием концентрированного потока энергии, например, электродугового разряда. От идеального газа плазма отличается тем, что, кроме нейтральных частиц, она содержит большое число заряженных электронов и ионов, участвующих в кулоновском взаимодействии. В результате взаимодействия большого количества заряженных частиц плазменное облако, содержащее эти частицы, в своем объеме является интегрально квазинейтральным, то есть выполняется равенство:

$$n_e e \cong Z n_i e, \qquad \text{(Б.1)}$$

где n_e – объемная плотность электронов;

n_i – объемная плотность ионов;

Z – кратность заряда ионов;

e – заряд электрона.

Масштаб квазинейтральности невозмущенной плазмы, в котором выполняется условие (1), характеризуют так называемым Дебаевским радиусом r_D. Плазменное облако с размерами

---

[6] Хирвонен Ионная имплантация. Под ред. Хирвонена Д.-М.: "Металлургия", 1985, 391 с.

[7] Рисел Х., Руге И. Ионная имплантация. М.: "Мир", 1983, 360 с.

меньшими порядка r_D нельзя рассматривать как квазинейтральное. Это одно из основных условий, которое необходимо учитывать при моделировании и проектировании технологических процессов ионно-плазменной обработки лопаток вследствие их сложной геометрии.

Дебаевский радиус находят из выражения[8]:

$$r_D = \sqrt{\frac{\varepsilon_0 kT}{2Zn_i e^2}}, \text{ м} \qquad \text{(Б.2)}$$

где $\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}$ – электрическая постоянная, Кл^2/Н·м^2;

$k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ – постоянная Больцмана, Дж/К;

T – средняя температура заряженных частиц невозмущенной плазмы при незначительном отличии температуры электронов и ионов, К.

Смысл величины Дебаевского радиуса заключается в том, что на расстояниях меньших r_D плазма не является однородной, в ней наблюдаются локальные электрические поля и их флуктуации. Так, например, вблизи заряженной частицы, на расстоянии $r << r_D$, потенциал поля совпадает с потенциалом поля этой частицы в вакууме $\phi \approx q/r$, где q – заряд частицы. При увеличении расстояния $r > r_D$ плазма экранирует это электрическое поле и оно экспоненциально быстро затухает[8]. Кроме этого, на границе облака плазмы электроны, имея большую тепловую скорость, стремятся покинуть это облако, но, в результате кулоновского взаимодействия с остальными заряженными частицами, вылететь на расстояние, существенно больше, чем r_D, не могут.

Таким образом, в объеме вакуумной камеры, намного превосходящем $r_D \approx 10^{-2}$ мм, низкотемпературную плазму можно рассматривать, как нейтральную среду со средней концентрацией заряженных частиц n и температурой T.

Одним из важнейших технологических параметров формирования плазмы является ток дуги электродугового источника ($I_д$), определяющий скорость испарения материала мишени (катода) и, следовательно, производительность процесса напыления. Обозначим удельную производительность электродугового источника плазмы ($P_{эд}$) через следующее соотношение:

$$\text{Р}_{\text{эд}} = \text{К}\frac{\langle \mu_{\text{эр}} \rangle}{\text{М}_\text{а} S_{\text{раб}} \langle I_{\text{раб}} \rangle} \left(\frac{\text{ион}}{\text{с·м}^2\text{·А}}\right), \qquad \text{(Б.3)}$$

[8] Основы физических процессов в плазме и плазменных установках / С.К. Жданов, В.А. Курнаев, М.К. Романовский, И.В. Цветков; Под ред. В.А. Курнаева. М: МИФИ, 2007. 368 с.

где K – относительное содержание заряженных частиц в плазменном потоке, например, для мишеней из титановых сплавов с незначительной пористостью относительное содержание ионизированной плазмы составляет[9] K = 0,5…0,8;

$<\mu_э>$ – коэффициент равный средней скорости эрозии катода, которая находится как отношение потери массы катода за все время его работы, кг/с;

$I_{раб}$ – средняя величина тока дуги источника за время его работы, А;

M_a – масса атома основного материала катода, кг;

$S_{раб}$ – площадь рабочей поверхности катода, м^2.

В зависимости от величины задаваемого тока дуги I_0 поток частиц dN_0/dt, эмитируемых в вакуумную камеру со всей площади катодного пятна $S_{кп}$, можно определить по формуле[9]:

$$dN_0/dt = Р_{эд} I_д S_{кп}, \text{ ион/с} \qquad (Б.4)$$

где N_0 – количество частиц, эмитируемых ионным источником в единицу времени при условии, что площадь катодного пятна условно постоянная величина, зависящая от заданного тока дуги $S_{кп} = f(I_д)$.

Зная поток частиц, генерируемых ионным источником, можно определить плотность ионного тока, вызванного распылением материала катода, на расстоянии L от источника при условии свободного пробега частиц в камере:

$$j_0(L) = \frac{dN_0}{dt}\frac{eZ}{S(L)^2} = \frac{dN_0}{dt}\frac{eZ}{2\theta_к L^2}, \text{ А/м}^2 \qquad (Б.5)$$

где e – заряд электрона, эВ;

Z – кратность заряда ионов;

$S(L)$, м^2 – площадь полусферы разлета ионного потока на расстоянии L от источника;

$\Theta_к$, рад – угол разлета ионов, (определяется конструкцией ионного источника).

Параметры плазмы некоторых материалов приведены в Таблице Б.1.

Кроме заряженных частиц, в плазме присутствуют нейтральные продукты эрозии катода – это паровая (атомарная) и капельная фазы, которые разлетаются от поверхности мишени изотропно в пределах полусферы. Относительное содержание этих фаз зависит от марки и структуры материала мишени, наличия внутренних дефектов, пористости, а также технологических режимов, влияющих на скорость испарения материала и степень его ионизации.

---

[9] Барвинок В.А. Физические основы и математическое моделирование процессов вакуумного ионно-плазменного напыления. – М.: Машиностроение, 1999. – 309 с.

Таблица Б.1 – Параметры плазмы некоторых материалов[11]

Основной материал мишени	Минимальный критический ток Iд, А	Коэффициент эрозии катода $\mu_э$, 10^{-9} кг/с·А	Средняя кратность ионизации ионов Z	Средняя энергия иона в невозмущенной плазме W_{i0}, 10^{-19} Дж
Ti	85	53	1,79	122
Zr	160	79	1,94	147
Al	60	125	1,58	101
Cr	90	42	1,94	122
Mo	130	47	1,95	176
C	200	17	1,04	49
Ni	90	101	1,53	86

Для вакуумно-дуговых источников ионного тока при заданном давлении плазмообразующего газа (обычно аргона) существует минимальный критический ток электрической дуги, ниже которого электродуговой разряд не устойчив (Таблица Б.1). С увеличением тока дуги практически линейно увеличивается скорость эрозии (распыления) катода, поток эмитированных частиц (формула (Б.4)), и, следовательно, растет скорость осаждения покрытия за счет увеличения плотности ионного тока, количества нейтральных атомарных частиц и микрокапельной фазы[10]. При этом состав плазмы и средняя энергия ионов практически не меняются[11].

Энергию ионов и плотность ионного тока можно значительно увеличить, подав на деталь отрицательное напряжение смещения. Рассмотрим наиболее общий случай, когда при включении ионных источников вокруг деталей формируется невозмущенное облако квазинейтральной плазмы со средней концентрации заряженных частиц n, движущихся хаотично со скоростями, соответствующими максвеловскому распределению. Деталь при этом будет находиться под «*плавающим потенциалом*» (U_f) за счет более подвижных электронов, обусловливающих повышенный электронный поток на поверхность. При подаче на деталь небольшого, порядка нескольких вольт, отрицательного напряжения ($U_{см}$), ионная компонента плазмы ускорится в направление детали и уравновесит на ее поверхности электронный ток. При дальнейшем смещении напряжения в отрицательную область ($U_{см} < -U_f$) концентрация и скорость ионов у поверхности будет увеличиваться, а количество электронов, наоборот, будет уменьшаться так, что часть из них перестанет достигать детали. При некоторой величине напряжения смещения на поверхность будет попадать только ускоренные ионы с энергией[12]:

[10] Нейтральные частицы материала катода в виде капель микронного размера

[11] Барвинок В.А. Управление напряженным состоянием и свойствами плазменных покрытий / В.А. Барвинок – М.: Машиностроение. – 1990. – 384 с.

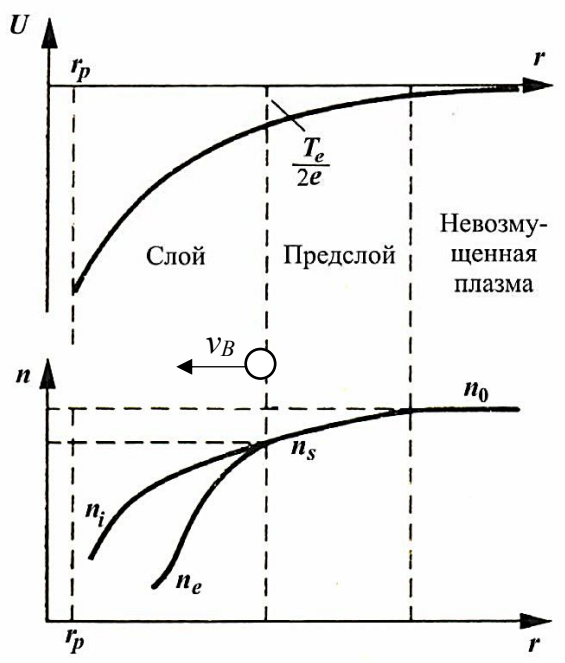
[12] Орлов К. Е. Диагностика низкотемпературной плазмы: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2005. 110 с.

$w_s(x) = w_0 + ZeU(x)$, Дж (Б.6)

где $w_0 = 0{,}5m_i v_0^2 \approx 4kT/\pi$, Дж – начальная кинетическая энергия иона на границе положительного электрического слоя;

$U(x)$ – величина отрицательного потенциала, приложенного к детали, на расстоянии x от поверхности.

Таким образом возле поверхности детали будет происходить разделение заряда и образование двойного электрического слоя величиной (d) с ускоряющим предслоем (Рисунок Б.2).



v_B – минимальная скорость которой должен обладать ион при вхождении в слой, чтобы достигнуть поверхности, Бомовская скорость
Обозначения приведены в тексте
Рисунок Б.2 – Модель двойного электрического слоя у поверхности детали, находящейся в плазме[13]

Из выражения (Б.6) можно рассчитать скорость иона на поверхности:

$$v_s = \sqrt{v_0^2 + \frac{2ZeU_{\text{см}}}{m_i}} \quad \text{(Б.7)}$$

где v_0 – начальная скорость иона, входящего в приповерхностный положительный слой, м/с;

[13] Орлов К. Е. Диагностика низкотемпературной плазмы: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2005. 110 с.

$U_{см}$ – величина отрицательного потенциала (напряжение смещения), приложенная к детали, В.

Из условия непрерывности в слое (Рисунок Б.2) плотность ионного потока на поверхности и на границе слоя должны совпадать: $Zen_s v_s \equiv Zen_0 v_0$. В этом случае средняя плотность ионного тока на поверхности детали при приложении к ней отрицательного напряжения смещения $U_{см}$ будет равна:

$$\langle j_s \rangle = Zen_S v_S = Zen_0 \sqrt{v_0^2 + \frac{2ZeU_{\text{см}}}{m_i}} = j_0(L)\sqrt{1 + \frac{2ZeU_{\text{см}}}{v_0^2\, m_i}}, \text{ А/м}^2 \qquad \text{(Б.8)}$$

где n_0 – плотность ионов в области детали, на границе с приповерхностным положительным слоем, ион/м^3;

j_0 – плотность ионного тока, вызванного распылением материала катода, на расстоянии L от источника, определяемая по формуле (Б.5).

При этом, исходя из известного условия Бома, чтобы ион достигнул поверхности, его начальная скорость на границе со слоем должна быть не менее бомовской, $v_0 \geq v_B$:

$$v_0 = \frac{8kT}{\pi m_i} \geq v_B = \sqrt{\frac{kT_e}{m_i}} \qquad \text{, м/с} \qquad \text{(Б.9)}$$

где T_e – температура электронов плазмы, Дж;

m_i – масса иона, кг.

Определить размеры положительного электрического слоя у поверхности детали, образованного только ионным током, можно из известного уравнения Пуассона[14]. Все размерные величины уравнения примем функциями одной координаты, в этом случае, соответствующем плоско симметричной задаче, получим:

$$\frac{d^2\phi}{dx^2} = \frac{Zen_0}{\varepsilon_0}\left(1 + \frac{Ze\phi(x)}{w_{io}}\right)^{-\frac{1}{2}} \qquad \text{(Б.10)}$$

где $\varphi(x)$ – функция распределения потенциала в положительном слое от $\varphi(0) = 0$ до $\varphi(d) = U_{см}$, В;

d – размер искомого положительного электрического слоя, м;

[14] Барвинок В.А. Физические основы и математическое моделирование процессов вакуумного ионно-плазменного напыления. – М.: Машиностроение, 1999. – 309 с.

$w_{io} \approx 4kT/\pi$, Дж – средняя тепловая энергия ионов в отсутствие электрического потенциала на детали[14];

k – коэффициент Больцмана, Дж/К;

T – средняя температура ионной компоненты, К.

Используя преобразование $\frac{d^2\phi}{dx^2} = \frac{1}{2}\frac{d}{d\phi}\left(\frac{d\phi}{dx}\right)^2$, проинтегрируем уравнение (Б.10) по $d\varphi$, получим $\left(\frac{d\phi}{dx}\right)^2 = \frac{2n_0 w_{io}}{\varepsilon_0}\left(1 + \frac{Ze\phi(x)}{w_{io}}\right)^{\frac{1}{2}}$. Повторно интегрируя это выражение методом разделения переменных в пределах [0; d] и пренебрегая константами интегрирования порядка 10^{-4} м, получим:

$$d^2 = \frac{4\varepsilon_0 w_{io}}{(Ze)^2 n_0}\left(1 + \frac{ZeU_{\text{см}}}{w_{io}}\right)^{\frac{3}{2}}, \text{ м} \qquad \text{(Б.11)}$$

Из формулы (Б.11) видно, что квадрат величины положительного электрического слоя с увеличением $U_{\text{см}}$ изменяться по известному закону Чайлда-Ленгмюра с поправкой на тепловую энергию и концентрацию ионов плазмы (первый множитель). Это связано с тем, что с ростом прикладываемого напряжения происходит увеличение толщины электрического слоя у поверхности детали и, следовательно, площади "собирающей поверхности", вовлекающей новые ионы в направление к детали и тем самым увеличивающей их концентрацию.

Пример расчета зависимости размера положительного электрического слоя (d) от напряжения ($U_{см}$) для титановой плазмы приведен в Таблице Б.2.

Таблица Б.2 – Рассчитанные характеристики ионов титана Ti^+ и величины положительного электрического слоя поверхности при ее различных потенциалах

Напряжение смещения $U_{см}$, *В*	Средняя энергия ионов на поверхности w_s, *эВ* по формуле (6)	Средняя концентрация ионов на поверхности n_s, м$^{-3}$ из формулы (8)	Размер слоя *d, мм* по формуле (11)
1	*2*	*3*	*4*
-10	96	$1{,}0\cdot10^{16}$	0,8
-50	167	$7{,}9\cdot10^{15}$	1,5
-100	256	$6{,}4\cdot10^{15}$	2,3
-200	434	$4{,}9\cdot10^{15}$	3,8
-400	790	$3{,}6\cdot10^{15}$	7,0

Окончание таблицы Б.2

1	*2*	*3*	*4*
-600	1146	$3{,}0\cdot10^{15}$	10,1
-800	1502	$2{,}6\cdot10^{15}$	13,2
-1000	1858	$2{,}4\cdot10^{15}$	16,4
-1500	2748	$1{,}9\cdot10^{15}$	24,2
-2000	3638	$1{,}7\cdot10^{15}$	32,0

Примечания – 1) Режим напыления титана: I_d = 280, А; j_0 = 4,5 мА/см^2; p = $6{,}3\cdot10^{-2}$ Па; 2) Характеристики ионов титана[15]: Z = 1,78, w_{i0} = 78 эВ

Влияние шероховатости поверхности детали на плотность тока

Приведенные выше формулы справедливы для идеального случая равномерного распределения заряда по поверхности шара или бесконечной плоскости. Наличие же на поверхности реальных деталей шероховатостей, рисок, острых кромок, заусенцев и проч. приводит к локальному изменению концентрации заряда и, следовательно, напряженности электрического поля. Известно, например, что на конце цилиндрического выступа с высотой (h) и малым радиусом ($r<<h$) будет происходить кратное усиление напряженности электрического поля (E_o) в соответствие с выражением[16]:

$$E \approx \beta E_o \text{, В/м} \qquad \text{(Б.12)}$$

где $\beta = \frac{h}{2r} > 1$– коэффициент усиления электрического поля цилиндрическим выступом.

Для концентратора напряженности электрического поля в виде выступа или впадины с известным углом при вершине предлагается использовать следующую формулу коэффициента усиления[17]:

$$\beta \approx \left(\sqrt{\frac{h}{2r}} + 5\cos\alpha\right)^a, \qquad \text{(Б.13)}$$

где α – угол при вершине;

---

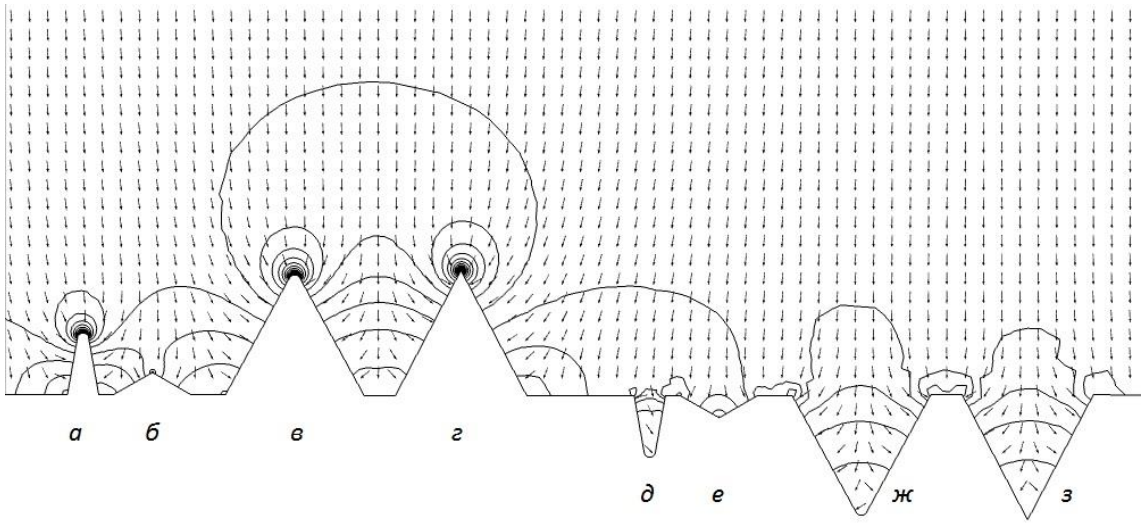
[15] Барвинок В.А. Физические основы и математическое моделирование процессов вакуумного ионно-плазменного напыления. – М.: Машиностроение, 1999. – 309 с.

[16] Бельский М.Д., Бочаров Г.С, Елецкий А.В. Усиление электрического поля в холодных полевых катодах на основе углеродных нано трубок // Журнал технической физики. 2010, вып. 2. С. 130 – 137.

[17] Anurat Wisitsorat-at. Micropatterned diamond vacuum field emission devices: dissertation doctor of philosophy / Vanderbilt University, Nashville, 2002

a – коэффициент, равный $a = 1$ для вершин, $a = -5$ для впадин.

Более точный расчет напряженности электрического поля в приповерхностном слое детали проводили методом конечных элементов (МКА) в системе Comsol Multiphysics. Исследуемая модель поверхностного слоя предполагала наличие на ней выступов и впадин шероховатости различных размеров и форм. Между поверхностью детали и плоскостью, отстоящей от детали на расстоянии порядка толщины электрического слоя (d), устанавливалась разность потенциалов, равная напряжению смещения ($U_{см}$). В окружающей деталь среде, имитирующей вакуум, возникало электрическое поле, силовые и эквипотенциальный линии которого показаны на Рисунке Б.3. Результаты расчетов напряженности электрического поля, возникающего вблизи выступов и впадин, приведены в Таблице Б.3.



а...г – выступы; *д...з* – впадины

Стрелками показаны силовые линии электрического поля, влияющие на направление движения заряженных частиц в направлении к поверхности

Рисунок Б.3 – Схема электрического поля возле неровностей поверхности

Анализ полученных результатов показывает, что наибольшими концентраторами электрического поля являются выступы шероховатости, "притягивающие" к себе отрицательно заряженные частицы и, тем самым, многократно увеличивающие локальную плотность ионного тока на вершинах. Во впадинах, даже при их сравнительно небольшой глубине (Рисунок Б.3 е), напряженность электрического поля практически отсутствует, а силовые линии замыкаются на границе с поверхностью.

Повышенная напряженность поля на выступах поверхности обусловливает пропорциональное увеличение силы $F = EZe$, действующей на ионы в направлении этих выступов. В случае движения всех ионов по силовым линиям электрического поля, величина ионного тока на вершине выступа вырастет и составит:

$$j_s^* = \beta \langle j_s \rangle, \text{ А/м}^2 \qquad \text{(Б.14)}$$

где $\langle j_s \rangle$ – средняя плотность ионного тока по плоской поверхности детали, А/м^2.

Необходимо отметить, что увеличение ионного тока в области выступов приводит к уменьшению количества ионов на границе с плазмой, что по формуле (Б.11) должно увеличивать ширину электрического слоя (d). Кроме того, значительное увеличение напряженности электрического поля, более 10^9 В/м, например, на острых кромках или заусенцах, может вызвать процессы автоэлектронной эмиссии[18], что может приводить к появлению электронной компоненты в слое, ионизации нейтральных молекул, изменению ионного тока и параметров электрического слоя. Эти и другие предельные случаи, обусловленные высоким напряжением электрического поля, являются не характерными для рассматриваемых процессов КВИПО и в настоящей работе не рассматривались.

Таблица Б.3 – Коэффициент усиления напряженности электрического поля на выступах и во впадинах поверхности (к Рисунку Б.3)

Обозначение неровности	Высота неровности *h, мм*	Радиус при вершине *r, мм*	Угол при вершине α	Коэффициент усиления, формула (9) β	Коэффициент усиления (МКА) β
а	5	0,5	20°	6,9	4,5
б	3	0,05	120°	2,9	2,5
в	10	0,5	60°	5,6	5,2
г	10	0,05	60°	12,5	14,0
д	5	0,5	20°	$6\cdot10^{-5}$	$6\cdot10^{-5}$
е	3	0,05	120°	$4\cdot10^{-3}$	$4\cdot10^{-3}$
ж	10	0,5	60°	$2\cdot10^{-4}$	$2\cdot10^{-4}$
з	10	0,05	60°	$4\cdot10^{-6}$	$7\cdot10^{-6}$

Рассеяние ионов при их движении от ионного источника к детали

Под действием электрического поля ионный поток будет ускоряться по направлению к детали (формула (Б.6)) и в случае большой концентрации нейтральных частиц в плазме необходимо учитывать их столкновение с более быстрыми ионами, приводящее к рассеиванию энергии и торможению последних.

[18] Шредник В. Н. Автоэлектронная эмиссия // Физическая энциклопедия. – М.: Советская энциклопедия, 1988.– Т.1.–С. 21.

За вероятное количество столкновений ионов с нейтральными частицами примем отношение размера рабочей камеры вакуумной установки к средней длине свободного пробега ионов λ_i. По кинетической теории идеального газа длина свободного пробега нейтральных частиц λ_a обратно пропорциональна их концентрации n_a, выражаемой величиной давления остаточных газов $p = n_a kT$. При этом, в отличие от нейтральных частиц, ионы являются более подвижными и их средняя длина свободного пробега λ_i несколько превышает величину λ_a. Известно соотношение[19]:

$$\lambda_i \approx 4\lambda_a = \frac{1}{\sqrt{2} n_a S} = \frac{kT_a}{\sqrt{2} pS}, \text{ м} \qquad \text{(Б.15)}$$

где λ_a – длина свободного пробега атомов или молекул идеального газа, м;

$S \approx \pi R^2$ – газодинамическое сечение нейтрального атома с радиусом R, м;

p – давление остаточных газов в вакуумной камере, Па;

T_a – температура остаточных газов, К.

Влиянием электронов при расчете пробега ионов в приповерхностном электрическом слое можно пренебречь ввиду их незначительной концентрации.

Из формулы (Б.15) следует, что при описании ионно-плазменных процессов при давлении остаточных газов менее 0,1 Па в вакуумных камерах размерами менее 2000 мм пролет большинства ионов металлов можно принять условно безстолкновительным. С увеличением давления газов необходимо учитывать случайные столкновения ионов с нейтральными атомами, которые подразделяют на упругие или неупругие.

Неупругое взаимодействие характерно для высокотемпературных плазменных процессов и, как правило, сопровождается изменением внутренней энергии частиц или их химического состояния. При упругом столкновении происходит только перераспределение кинетической энергии взаимодействующих частиц без изменения их внутренней энергии. Среднюю долю энергии, теряемую ионом при единичном упругом столкновении с нейтральной движущейся частицей, можно определить после интегрирования по всем возможным углам взаимодействия[20]:

$$-dw = w_i \frac{2m_i M}{(m_i + M)^2}, \text{ Дж} \qquad \text{(Б.16)}$$

где m_i, M – масса иона и нейтральной частицы соответственно, кг;

---

[19] Злобина А.Ф. Вакуумная и плазменная электроника: Уч. пос.-Томск: Томский межвузовский центр дистанционного образования, 2003. – 106 с.

[20] Власов В. В. Элементарные процессы в плазме газового разряда – Х.: ХНУ, 2008. – 175 с.

w_i – энергия иона до столкновения, Дж.

Предположим, что ион с начальной энергией w_{i0}, пролетев в однородном электрическом поле с напряженностью E расстояние x, испытает $g = x / \lambda_i$ последовательных столкновений с однородными нейтральными частицами, после чего его энергия с учетом выражений (Б.11) и (Б.15) дискретно изменится и станет равной:

$$w_i\ (g) = \Big((w_{i0} + Ze\lambda_i E + W_1)u + Ze\lambda_i E + W_2)u + \ldots)u + Ze\lambda_i E + W_g\Big)\,u, \text{ Дж} \qquad (Б.17)$$

где $u = \frac{2m_i M}{(m_i+M)^2} \leq 0{,}5$;

$E = U_{см}/d$ – средняя напряженность электрического поля в поверхностном слое шириной d, В/м;

$W_a = 1{,}5kT$ – средняя тепловая энергия нейтральной частицы для максвелловского распределения скоростей, Дж.

Упростив выражение (Б.17), получим формулу для определения предельной энергии иона, достигающего поверхность детали после многочисленных столкновений:

$$w_i(g) = (Ze\lambda_i E + W_\text{a}) \sum_{j=1..g} u^j + w_{i0}u^g, \text{ Дж.} \qquad (Б.18)$$

Можно заметить, что после некоторого количества взаимодействий, например $g > 10$, начальная энергия иона (w_{i0}) нивелируется процессами энергетического обмена и далее не влияет на конечную величину кинетической энергии. Таким образом, энергия иона, движущегося в электрическом поле и испытывающего большое количество ударных взаимодействий с нейтральными частицами, стремится к постоянной величине, линейно зависящей от энергии электрического поля и тепловой энергии нейтральных частиц плазмы:

$$w_i(g) = (Ze\lambda_i E + W_\text{a}) \frac{u}{1-u}, \text{ Дж} \qquad (Б.19)$$

Полученная формула справедлива при следующих допущениях:

а) нейтральные частицы, взаимодействующие с ионами, однородны по своей массе и энергии;

б) количество взаимодействий достаточно велико для рассеяния начальной энергии иона w_{i0}, например при $u < 0{,}5$ и $g > 10$;

в) электрическое поле однородно.

Взаимодействие ионного потока с облаком нейтральных частиц кроме изменения кинетической энергии, приводит к тому, что часть ионов может отклониться от направления потока и рассеяться. Это приводит к уменьшению концентрации ионов на величину *dn*, рассчитываемую по формуле[21]:

$$-dn = n(x)\frac{dx}{\lambda}, \text{ ион/м}^3. \quad \text{(Б.20)}$$

Интегрируя уравнение (17), получим концентрацию ионов после прохождения ими расстояния *x*:

$$n(x) = n_0\, exp\left(-\frac{x}{\lambda}\right), \text{ ион/м}^3 \quad \text{(Б.21)}$$

где n_0, ион/м^3 – исходная концентрация ионов, до начала взаимодействий с нейтральными частицами.

Обобщая вышесказанное, с учетом зависимостей (Б.8), (Б.14), (Б.19), (Б.21) получаем, что на поверхность детали с величиной положительной электрической зоны $d > 0$ и концентрацией электрического заряда $\beta \geq 1$, будет воздействовать ионный поток, максимальная плотность (j_s^*) которого рассчитывается по формулам:

а) при отсутствии или возможности пренебречь столкновениями с нейтральными частицами:

$$j_s^* = Zen_0\beta\sqrt{v_0^2 + \frac{2ZeU_{\text{см}}}{m_i}} = j_0(L)\beta\sqrt{1 + \frac{2ZeU_{\text{см}}}{v_0^2 m_i}}, \text{ А/м}^2; \quad \text{(Б.22)}$$

б) при условии большого количества столкновений $g \approx x / \lambda_i > 10$:

$$j_s^{**} = Zen_0\beta\sqrt{\frac{2w_i(g)}{m_i}}\exp(-g) = j_0(L)\beta\sqrt{\frac{2w_i(g)}{v_0^2 m_i}}\, exp(-g), \text{ А/м}^2 \quad \text{(Б.23)}$$

где Z – кратность заряда ионов;

e – заряд электрона;

[21] А.К. Кикоин, И.К. Кикоин. Молекулярная физика. М.:Наука, 1976

n_0 – плотность ионов в области детали, на границе с приповерхностным положительным слоем, ион/м^3;

v_0 – начальная скорость иона, м/с;

β – коэффициент усиления электрического поля локальным выступом поверхности, формула (Б.13);

m_i – масса иона, кг;

w_i(g) – энергия иона после столкновений, формула (Б.18), Дж;

g – количество столкновений;

j_0 – плотность ионного тока, вызванного распылением материала катода, на расстоянии L от источника, формула (Б.5).

При этом средняя величина кинетической энергии одного иона, воздействующего на поверхность при отсутствии столкновений с нейтральными частицами, рассчитывается по формуле (Б.6), а в случае большого количества столкновений – по формуле (Б.19).

Искажение электрического поля у поверхности детали

Для описания взаимодействия ионного потока с поверхностью рабочих лопаток необходимо учитывать их геометрические особенности, влияющие на формирование ускоряющего электрического поля у ее поверхности. Рассмотрим формирование двойного электрического поля и распределение его напряженности на примере рабочей лопатки осевого компрессора газотурбинной установки, которая в общем случае состоит из пера, антивибрационных полок и хвостовика (Рисунок Б.4).

Перо компрессорной лопатки является сложным пространственным объектом, который условно делят на выгнутую протяженную поверхность («спинку»), вогнутую поверхность («корыто»), входную и выходную кромки (Рисунок Б.5), а также криволинейную поверхность радиуса перехода пера в полку хвостовика. Геометрию пера лопатки описывают сечениями различной формы, меняющимися по высоте лопатки от ее хвостовика до вершины.

Геометрической особенностью компрессорных лопаток ГТУ является достаточно протяженные поверхности спинки и корыта при малых радиусах скругления входной и выходной кромок, например, от 0,5 до 0,1 мм.

При ионно-плазменной обработке на детали подают отрицательное напряжение смещения ($U_{см}$), ускоряя ионный поток по направлению к обрабатываемой поверхности, и, таким образом, формируя вокруг них положительный электрический слой. Толщину электрического слоя на поверхности детали (d) можно считать условно постоянной величиной, зависящей от плотности ионного тока и энергии частиц (формула (Б.11)). Напряженность электрического слоя на различ-

ных участках детали будут различная в зависимости от их геометрических особенностей. На выступах и кромках поверхности напряженность будет увеличиваться, во впадинах – уменьшаться, аналогично выступам и впадинам шероховатости (Рисунок Б.4).

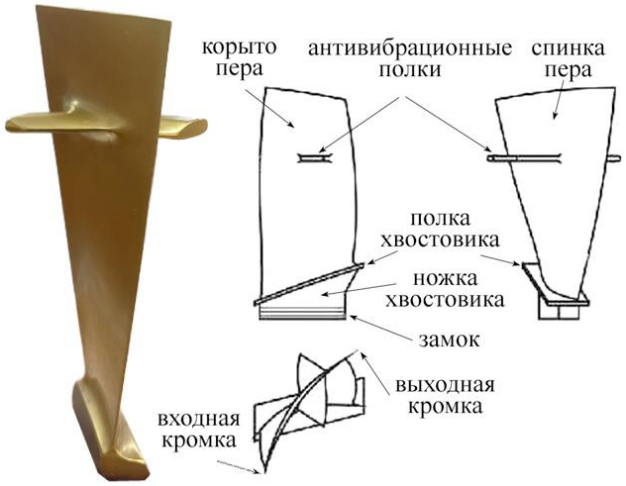
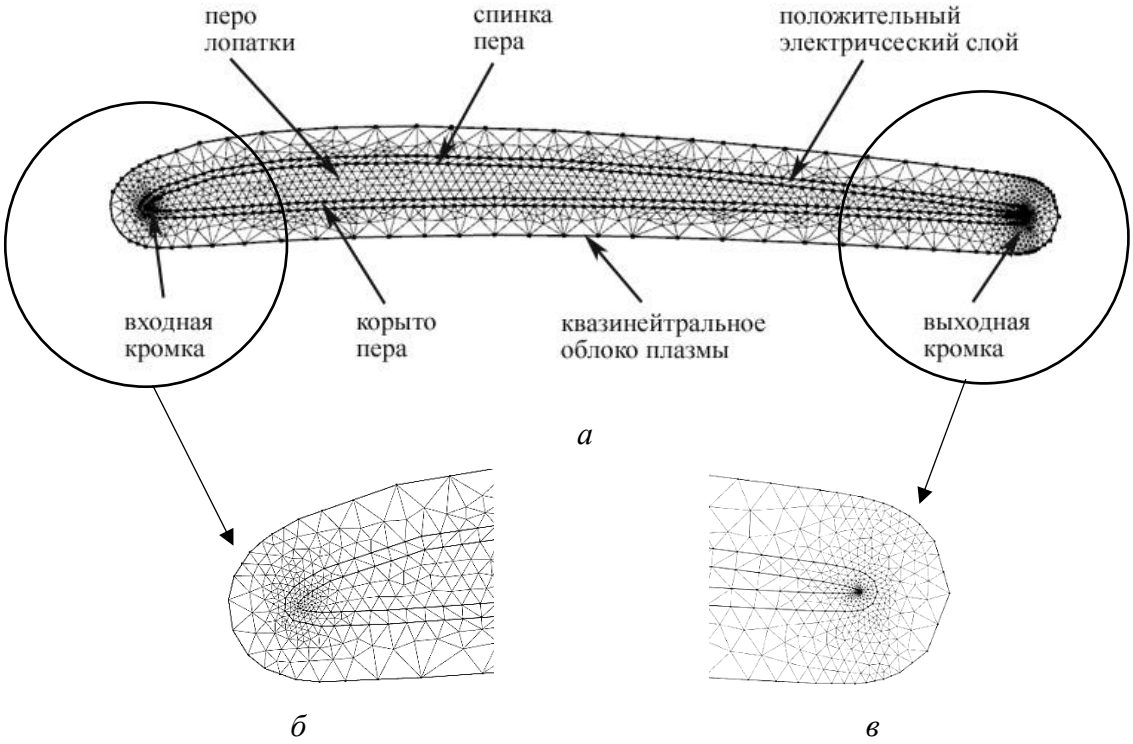


Рисунок Б.4 – Модель рабочей лопатки компрессора с антивибрационными полками

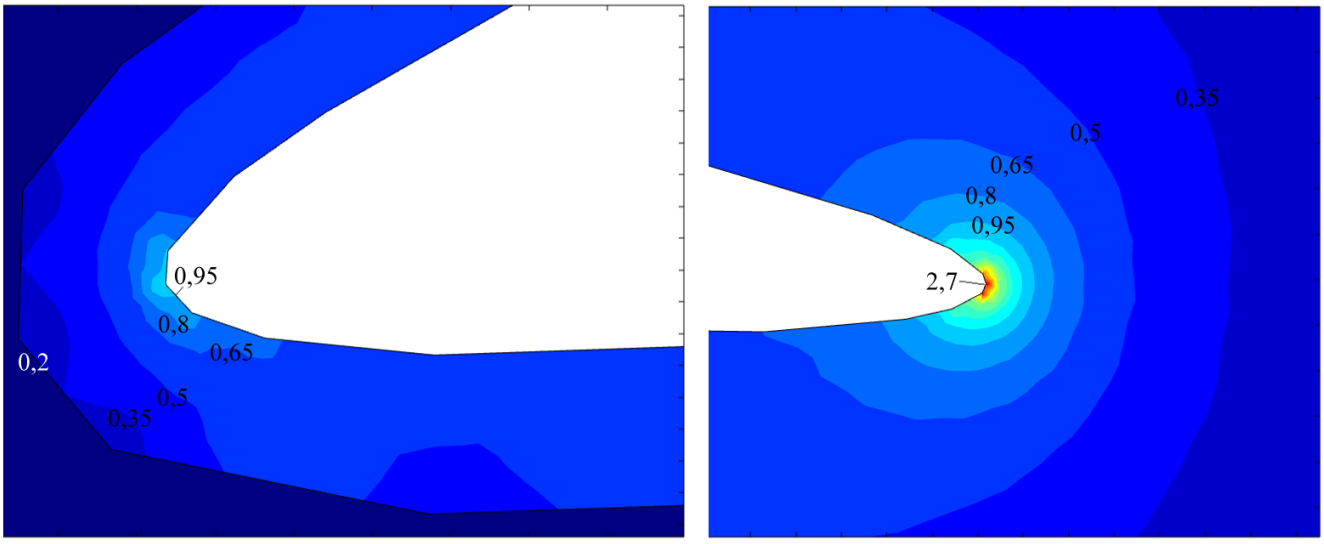


а – вид на модель целиком; *б* – область входной кромки с радиусом R0,2 мм;
в – область выходной кромки с радиусом R0,05 мм

Рисунок Б.5 – Модель электрического поля в поперечном сечении пера компрессорной лопатки ГТУ для расчета его напряженности методом конечных элементов

Расчет напряженности электрического поля в приповерхностном слое рабочей лопатки компрессора ГТД проводили методом конечных элементов (МКА) в системе Comsol Multiphysics. Модель лопатки, находящейся в низкотемпературной плазме вакуумной установки, включала в себя конструкцию самой детали, поверхностный электрический слой известного размера (d) и условно бесконечное пространство квазинейтральной плазмы. Для проведения численных расчетов напряженности электрического поля, модель была разбита на конечное количество элементов, так, чтобы их плотность была максимальна на выступах и кромках детали. Уменьшением размеров конечных элементов и увеличением их локальной плотности была обеспечена максимальная ошибка вычислений не более 2%. Пример расчетной модели пера компрессорной лопатки методом конечных элементов показан на Рисунке Б.5. Результат расчета напряженности электрического вблизи кромок представлены на Рисунке Б.6.

Результаты расчета показывают, что у лопатки с принятой геометрией и при заданном напряжении смещения ($U_{см}$ = -50 В) средняя напряженность в области пера составляет $E = 0{,}4 \cdot 10^5$ В/м. При этом на входной кромке напряженность превышает среднюю величину (E) в два раза, а на выходной кромке – в пять раз. Такое различие напряженности электрического поля по периметру лопатки влияет на концентрацию заряженных частиц и, следовательно, на интенсивность их потока в области выступов профиля, что учитывалось при моделировании условий ионно-плазменной обработки рабочих лопаток ГТУ и паровых турбин.



а *б*

а – входная кромка радиусом 0,2 мм; *б* – выходная кромка радиусом 0,05 мм

Рисунок Б.6 – Распределение напряженности электрического поля (E, В/м) близи кромок в титановой плазме при толщине электрического слоя d = 1,3 мм и напряжении смещении $U_{см}$ = -50 В

Взаимодействие ускоренных ионов с поверхностью детали

В процессе комплексной вакуумной ионно-плазменной обработки в одном объеме совмещают несколько энергетических процессов, которые позволяют реализовать целую серию физико-химических процессов: распыление, нагрев, ионную имплантацию, образование кристаллических дефектов (вплоть до нарушения дальнего порядка), конденсацию покрытий различных веществ и их плазмохимические реакции и др.

Современные представления дают следующую картину взаимодействия заряженной частицы и материала обрабатываемой поверхности. Бомбардирующий ион при сближении с поверхностью нейтрализуется свободными электронами и виде нейтрального атома внедряется в материал. На пути своего движения он вызывает каскад столкновений с атомами материала поверхности и, постепенно теряя свою кинетическую энергию, останавливается, образуя, как правило, атом внедрения. При этом уменьшение энергии бомбардирующей частицы при упругих столкновениях с атомами происходит дискретно из-за достаточно невысокой поверхностной плотности атомов, которая достигает порядка 10^{16} $см^{-2}$, что делает возможным рассматривать взаимодействие с атомами как независимые.

В результате взаимодействия ионного потока с материалом поверхности одновременно происходит несколько процессов различной интенсивности:

а) ионное распыление материала поверхности;

б) ионная имплантация, внедрение части бомбардирущих ионов в поверхность с образованием дефектов кристаллической решетки;

в) конденсация покрытия.

Ионное распыление (очистка) материала поверхности

Под ионным распылением понимают физический процесс распыления, удаления с поверхности, атомов материала в результате воздействия на него потока заряженных, реже нейтральных частиц. Согласно теории ионного распыления[22] в диапазоне энергий от 10 до 1000 эВ происходит упругое механическое взаимодействие падающих с высокой кинетической энергией частиц ионного потока с атомами твердого тела. В результате обмена энергиями и импульсами атомы поверхности смещаются относительного своего положения равновесия в кристаллической решетке, вступают во взаимодействие с другими атомами и, таким образом, порождают целый каскад

[22] Ивановский Г.В., Петров В.И. Ионно-плазменная обработка материалов. – М.: Радио и связь, 1986. – 232 с.

столкновений. Часть атомов, получивших импульс в направлении к границе поверхности и имеющие достаточную энергию для преодоления потенциального барьера (20-30 эВ), покидают материал, что и определяет процесс распыления материала.

Ионное распыление протекает в несколько этапов[22]. На первом происходит удаление адсорбированных атомов, оксидных пленок, повышается энергия поверхностных атомов, происходит их локальный разогрев. Второй этап характеризуется установившимся процессом распыления с некоторой характерной скоростью удаления материала и формируемой шероховатостью. Протеканием химических реакций в процессе ионного распыления в указанном выше диапазоне энергий можно пренебречь вследствие невысокой тепловой энергии, выделяющейся при взаимодействии частиц.

Критерием протекания процесса ионного распыления является пороговая величина энергии иона (E_p), которая должна превышать энергию связи поверхностных атомов ($E_{св}$):

$$E_{\text{р}} \geq (kK)^{-1} E_{\text{св}}, \text{ Дж}, \qquad \text{(Б.24)}$$

где $K = \frac{4\text{M}_1\text{M}_2}{(\text{M}_1+\text{M}_2)^2}$ – коэффициент аккомодации механической энергии при ударе;

M_1 – масса частиц потока;

M_2 – масса атомов распыляемого материала;

$E_{св}$ – энергия связи поверхностных атомов, равная энергии сублимации рассеиваемого материала, Дж;

$k \leq 1$ – коэффициент, учитывающий долю обратно рассеянных частиц потока после удара о поверхность.

Основной характеристикой процесса ионного распыления является его скорость (V_p, мм/мин), зависящая от энергии ионного потока и соответствующему ему коэффициента распыления (a_p, атом/ион). Коэффициент распыления является табличной характеристикой, устанавливаемой экспериментально для пары взаимодействующих с определенной энергией материалов: бомбардирующих и распыляемых частиц, и связан со скоростью распыления следующим выражением:

$$V_{p0} = a_p \frac{j_s M_2}{eN_a \rho}, \text{ м/с} \qquad \text{(Б.25)}$$

где a_p – коэффициент распыления, атом/ион;

j_s – плотность ионного тока на поверхность, А/м^2;

M_2 – молярная масса атомов распыляемого материала, кг/моль;

e – заряд электрона, Кл;

N_a – число Авогадро;

ρ – плотность распыляемого материала, кг/м^3.

Зная коэффициент распыления, плотность потока распыленных атомов можно представить в виде:

$$j_p = a_p j_s(\alpha)/(eZ) \text{ , ат/м}^2. \quad \text{(Б.26)}$$

Из формулы (Б.25) видно, что скорость распыления зависит в первую очередь от:

а) характеристик бомбардирующих ионов: массы, кинетической энергии, направленности движения по отношению к поверхности;

б) характеристик распыляемого материала: массы, плотности, поверхностной энергии связи атомов, совершенства кристаллического строения, отсутствия поверхностных дефектов и загрязнений, оксидных пленок и проч.;

в) концентрации бомбардирующих ионов, выражаемую через плотность ионного тока;

г) угла падения ионного потока на распыляемую поверхность.

Вид характерной зависимости коэффициента распыления от угла падения ионов показана на Рисунке Б.7. При увеличении угла падения скорость распыления вначале растет, достигая максимума при 80º, а затем круто падает практически до нуля. Небольшая скорость распыления при малых углах падения объясняется тем, что при столкновениях близких к лобовому, поверхностные атомы смещаются вглубь поверхности, в то время как для эффективного рассеивания они должны двигаться в противоположном направлении[23]. Это условие выполняется при отклонении ионного потока от нормали более 45º. При дальнейшем увеличении угла падения, коэффициент распыления растет вплоть до 80º, а затем, при движении потока вдоль поверхности, круто падает из-за рассеяния механической энергии при упругом взаимодействии потока с большим количеством поверхностных атомов.

Известно[24], что при углах падения ионного пучка до 70º скорость распыления поверхности изменяется по закону косинуса, с учетом уравнения (Б.25):

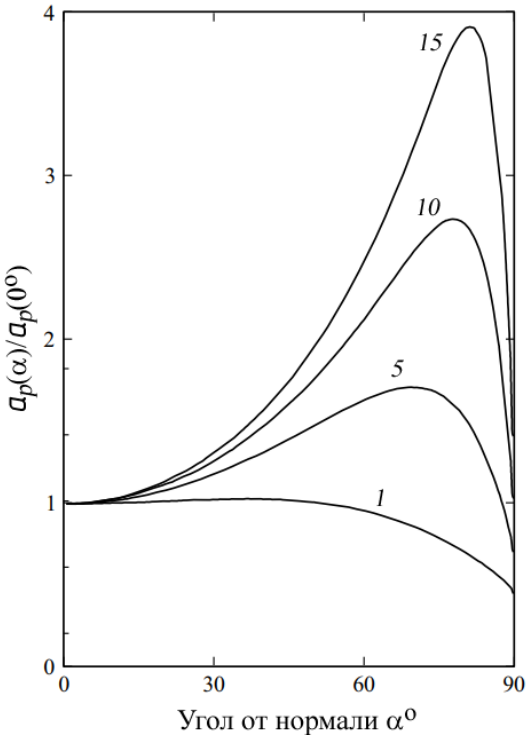
$$V_p(\alpha) = V_{po}\cos^{-k}\alpha = a_p \frac{j_s M_2}{eN_a\rho} cos^{-k}\alpha, \quad \text{(Б.27)}$$

где α – угол между нормалью к поверхности и траекторией иона;

[23] Данилин Б.С., Киреев В.Ю. Ионное травление микроструктур. – М.: Советское радио, 1979. – 210 с.

V_{po} – скорость распыления при нормальном падении иона массой m_1, м/с;

k – коэффициент: $k = 1{,}7$ при $(m_2/m_1) < 1$ и $k = 1$ при $(m_2/m_1) > 1$.



Цифрами над кривыми указано отношение массы ионов
и массы атомов мишени (M_1/M_2)

Рисунок Б.7 – Изменение коэффициента распыления от угла падения ионного потока[24]

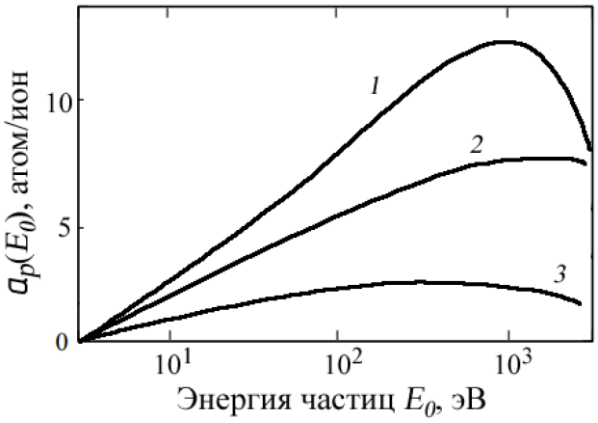
Зависимость коэффициента распыления от энергии бомбардирующих частиц (ионов) показана на Рисунке Б.8. Очевидно, что чем больше атомный номер падающего иона, тем больше его кинетическая энергия и, следовательно, коэффициент распыления (a_p). Вместе с этим, коэффициент распыления в зависимости от энергии бомбардирующих ионов имеет нелинейную зависимость. С увеличением энергии ионов от 0,1 до 1000 кэВ коэффициент a_p сначала растет, проходит через максимум, а затем монотонно уменьшается (Рисунок Б.8). Характер этой зависимости объясняется следующим образом.

С ростом кинетической энергии бомбардирующие ионы все глубже и глубже проникают в поверхность, вовлекая в каскады столкновений большое количество частиц, что приводит к увеличению коэффициента распыления до своего максимума. С дальнейшим ростом энергии глубина проникновения ионов в материал продолжает увеличиваться так, что в процессах энергетического обмена поверхностные атомы перестают участвовать. Интенсивность их распыления

[24] Зависимость коэффициента распыления от угла падения ионов на поверхность мишени / А.И. Толмачев, Л. Форлано // Журнал техн. физики, 2022, т.92, вып. 5. – С.660-664

уменьшается, заметно увеличивается нагрев поверхности и формирование кристаллических дефектов. При этих энергиях процесс ионного распыления материала сменяется процессом ионной имплантации, при котором внесенная ионами энергия расходуется в основном на возникновение дефектов кристаллической решетки, увеличении плотности дислокаций и химическим реакциям. Таким образом, зная зависимость изменения коэффициента распыления от энергии потока $a_p = f(dw_i)$, можно определить энергетический критерий начала ионной имплантации:

$$K_{ш} = da_p/dw_i < 1. \qquad \text{(Б.28)}$$



1 – серебро; *2* – медь; *3* – молибден

Рисунок Б.8 – Зависимость коэффициентов распыления от энергии ионов аргона[24]

Ионная имплантация (поверхностное легирование)

Сущность метода ионной имплантации заключается в бомбардировке заряженными частицами легирующего вещества поверхности металлических материалов. Ионизированные атомы или молекулы, внедряясь в кристаллическую решетку, формируют новое структурно-энергетическое состояние материала, характеризуемое глубиной внедрения и величиной концентрации примеси, плотностью дефектов (атомов внедрения, замещения и дислокаций), новыми химическими соединениями в виде интерметаллидов, образующихся вне зависимости от пределов их растворимости и диффузионных констант[25].

Таким образом, оказывается возможным создание композиционных систем с уникальными структурами и свойствами, существенно отличающимися от свойств основной массы материала.

[25] Рисел Х., Руге И. Ионная имплантация. М.: "Мир", 1983, 360 с.

Основными преимуществами ионной имплантации металлов по сравнению с химико-термической обработкой являются:

а) ионная имплантация сопровождается незначительным нагревом детали (от 100 до 300 °С) и не приводит к изменению формы, например, короблению под действием термических напряжений, что особенно важно для тонкостенных и маложестких конструкций;

б) количество и глубина вводимой легируемой примеси точно дозируется и контролируется в процессе обработки, что позволяет задавать профиль распределения примеси в поверхности и использовать дорогостоящие материалы-упрочнители;

в) в результате бомбардировки заряженными ионами в поверхности формируются благоприятные напряжения сжатия, повышающие ее усталостные свойства и микротвердость на глубине до сотен микрометров вследствие эффекта дальнодействия.

В результате серии упругих и неупругих торможений нейтрализованный ион теряет свою начальную энергию и останавливается на некотором расстоянии от поверхности. Путь, пройденный отдельным ионом после его внедрения в поверхность (длина пробега), является величиной случайной и для множества ионов характеризуется средним значением пробега ионов ($\lambda_{ср}$) и его стандартным отклонением ($\pm\sigma$). Параметры распределения пробега $\lambda_{ср}$ и σ зависят от энергии ионов (E), а также от эффективного диаметра атома легирующей примеси. Чем выше E и меньше z, тем больше $\lambda_{ср}$ и σ.

Если известны сорт, энергия ионов и физическо-химические свойства обрабатываемого материала, то, используя теорию И. Линхарда, М. Шарфа и Х. Шиотта для энергетических потерь быстрых ионов[25], средняя длина свободного пробега (глубина проникновения) легирующих ионов может быть рассчитана по формуле:

$$\lambda_{ср} \approx \frac{13E_1}{\rho} \cdot \frac{1 + M_2 / M_1}{Z_1^{2/3}}, \text{ м} \qquad \text{(Б.29)}$$

где ρ – плотность материала, кг/м^3;

M_2 – массовое число атомов мишени;

M_1 – массовое число и атомный номер иона;

Z_1 – атомный номер иона;

E_1 – начальная энергия иона, Дж.

Распределение пробегов и, следовательно, распределение концентрации внедренных в материал ионов (N) носит характер Гауссовского распределения[25]:

$$N(x) = \frac{Q}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{x-\lambda_{ср}}{\sigma\sqrt{2}}\right)}, \text{ ион/см}^2 \qquad (Б.30)$$

где Q – доза (суммарная концентрация) легированной примеси, ион/см^3;

x – координата по глубине поверхности, м;

$\lambda_{ср}$ – средний пробег ионов, м;

σ – стандартное отклонение среднего пробега, м.

Из выражения (Б.30) получим формулы для определения поверхностной концентрации N_0 (при глубине $x = 0$), максимальной концентрации N_{max} (при $x = \lambda_{ср}$):

$$N_0 = \frac{Q}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{\lambda_{ср}}{\sigma\sqrt{2}}\right)^2}, \text{ ион/см}^2 \qquad (Б.31)$$

$$N_{max} = \frac{Q}{\sigma\sqrt{2\pi}}, \text{ ион/см}^2 \qquad (Б.32)$$

Для определения глубины залегания легирующей примеси с искомой концентрацией N из выражений (Б.30)-(Б.32) можно получить выражение:

$$x_n = \lambda_{ср} \pm \sigma\sqrt{2\ln\left({N_{max}}/{N}\right)}, \text{ м.} \qquad (Б.33)$$

Знак "±" в формуле (Б.33) отражает тот случай, когда пик концентрации N_{max} лежит на некотором расстоянии от поверхности и профиль распределения $N(x)$ имеет две точки пересечения с прямой искомой концентрации N, как это показано на Рисунке Б.9.

Выражения (Б.29)-(Б.33) являются основными для моделировании процесса ионной имплантации с нескольких ионных источников, параметрами для которого являются:

а) средняя степень ионизации атомов выбранного сорта легирующего вещества Z;

б) ускоряющее напряжение $U_{уск}$, В, определяющее энергию ионов $w_i = ZeU_{см}$, Дж;

в) плотность ионного тока j, А/м^2, задаваемая из рабочего диапазона ионного источника;

г) время облучения t, с для получения заданной дозы Q;

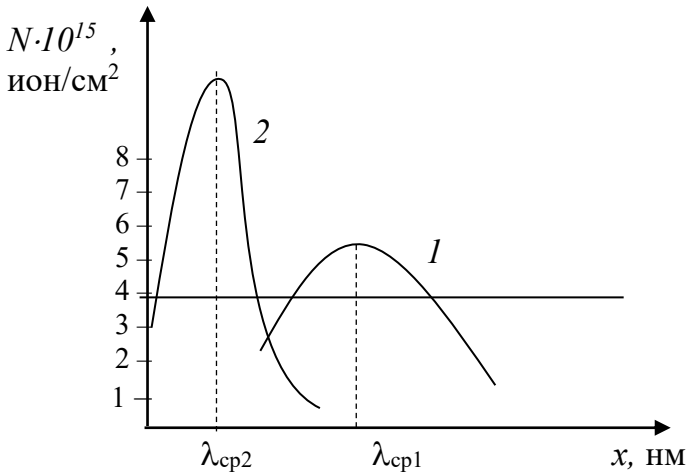
д) требуемая доза легирования, определяемая по формуле:

$$Q = jt / Ze, \text{ ион/см}^2 \qquad (Б.34)$$

где j – плотность ионного тока, А/см^2;

Z – атомный номер иона;

$e = 1{,}6\times10^{-19}$ Кл – величина единичного заряда.



1 – $U_{уск} = 9{,}0$ кВ; $j = 70$ мкА/см^2;
$t = 10{,}1$ мин; *2* – $U_{уск} = 0{,}5$ кВ; $j = 70$ мкА/см^2; $t = 4{,}5$ мин

Рисунок Б.9 – Зависимость концентрации имплантированных частиц алюминия от глубины поверхности при различных режимах

Задачей математического моделирования процесса ионной имплантации ставится получить профиль распределения легирующего вещества в материале с учетом заданных параметров, схемы расположения ионных источников и вращения деталей в вакуумной камере.

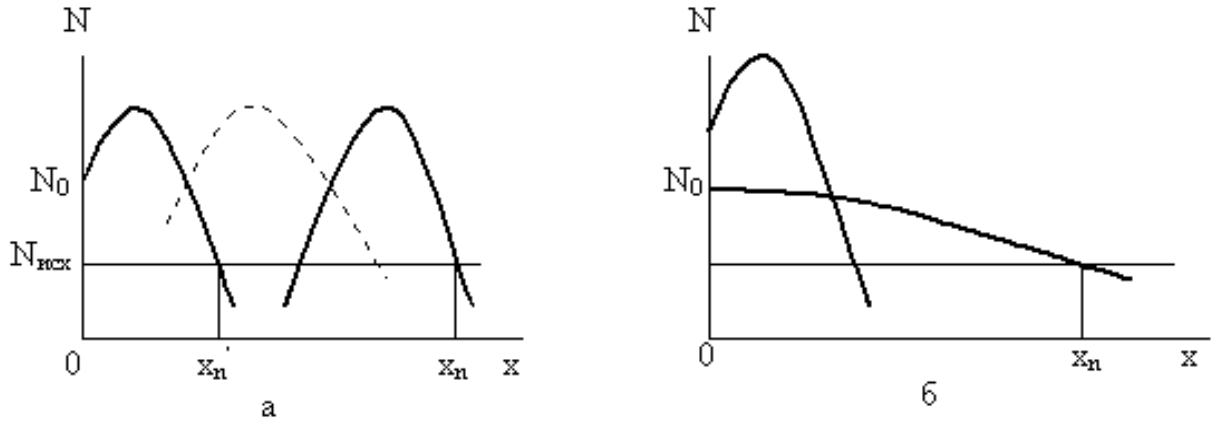
По данным некоторых исследователей[26] характерная глубина залегания легирующих примесей, имплантированных в поверхность, пропорциональная величине их энергии, выраженной в килоэлектрон вольтах, и не превышает порядка 50 нм. В связи с этим для увеличения глубины ионного легирования используют многоступенчатый процесс ионной имплантации, заключающийся в последовательном внедрении в поверхность определенного сорта ионов при различной величине энергии, что позволяет получать в поверхности широкий профиль концентрации легирующей примеси с несколькими максимумами, например, как это показано на Рисунке Б.9.

Для расширения области применения этого способа легирования в настоящей работе предлагается проводить комбинированный процесс ионной имплантации путем проведения в одном вакуумном объеме одновременной обработкой детали с нескольких ионных источников с различной энергией и различными сортами ионов (как вариант). При этом глубина и распределе-

[26] Ивановский Г.В., Петров В.И. Ионно-плазменная обработка материалов. – М.: Радио и связь, 1986. – 232 с

ние концентрации легирующей примеси в поверхности обеспечивается комбинированием нескольких профилей легирования ионов с различными энергиями. Первый профиль (с большей величиной пробегов x_n показано на Рисунке Б.10) обеспечивает заданную глубину залегания легирующих ионов, а следующие за ним – необходимую поверхностную концентрацию (N_0).

Имплантация с нескольких ионных источников может быть совмещена в одном технологическом цикле с нанесением ионно-плазменного покрытия. При этом покрытие может осаждаться на уже имплантированную поверхность или, в другом случае, можно проводить ионную имплантацию самого покрытия после или в процессе его нанесения. Предлагаемый способ значительно расширяет технологические возможности получения материалов с новыми свойствами, что подтверждается полученным патентом на изобретение[27].



а – ступенчатый процесс; *б* – комбинированный процесс

Рисунок Б.10 – Формирование глубоких профилей имплантируемых ионов

В дополнение необходимо отметить, что осаждение ионно-плазменного покрытия, как правило, сопровождается нагревом поверхности до 450...500 °С в течение нескольких часов. Такой нагрев материала, совмещенный с процессом ионной имплантации, известный как *постимплантационный отжиг*[28], повышает ее термодинамическую стабильность за счет перераспределения внедренной примеси и уменьшения концентрации радиационных дефектов кристаллической решетки. Ионный нагрев стимулирует термическую диффузию атомов, увеличивающую

[27] Патент РФ № 2425173. МПК C23C14/02 Установка для комбинированной ионно-плазменной обработки / А. М. Смыслов, Дыбленко Ю.М., К.С.Селиванов [и др.] // Бюл. № 21, 2011.

[28] Смыслов, Анатолий Михайлович. Комбинированные технологии на базе ионно-имплантационного модифицирования поверхности, обеспечивающие повышение ресурса и надежности лопаток компрессора и турбины ГТД : автореферат дис. ... доктора технических наук : 05.07.05 / Уфим. авиационный техн. ун-т. - Уфа, 1993. - 40 с.

глубину залегания внедренной примеси, способствует рекристаллизации аморфизованной части кристаллической решетки, а также, в некоторых случаях, может приводить к выделению и самопроизвольному росту по границам зерен прицепитатов в виде твердого раствора основного материала и легирующей примеси[27].

Зная изменение дозы имплантированных ионов dQ, и предполагая, что увеличение тепла происходит за счет рассеяния их механической энергии, количество выделившейся теплоты при обработке можно найти из выражения:

$$d\theta = wi \cdot dQ = eZU_{\text{см}} \cdot \frac{j}{eZ} Sdt = U_{\text{см}} jSdt \text{ , Дж,} \qquad \text{(Б.35)}$$

где w_i – энергия иона, Дж;

Z – средняя степень ионизации;

$U_{см}$ – напряжение смещения, В;

j – плотность ионного потока, А/м^2;

S – облучаемая площадь поверхности, м^2.

Изменение температуры детали определим из условия теплового баланса:

$$d\theta = cm\Delta T = U_{\text{см}} jSdt \text{ , Дж} \qquad \text{(Б.36)}$$

откуда получаем:

$$dT/dt = \frac{U_{\text{см}} jS}{cm} dt \text{ , К/с} \qquad \text{(Б.37)}$$

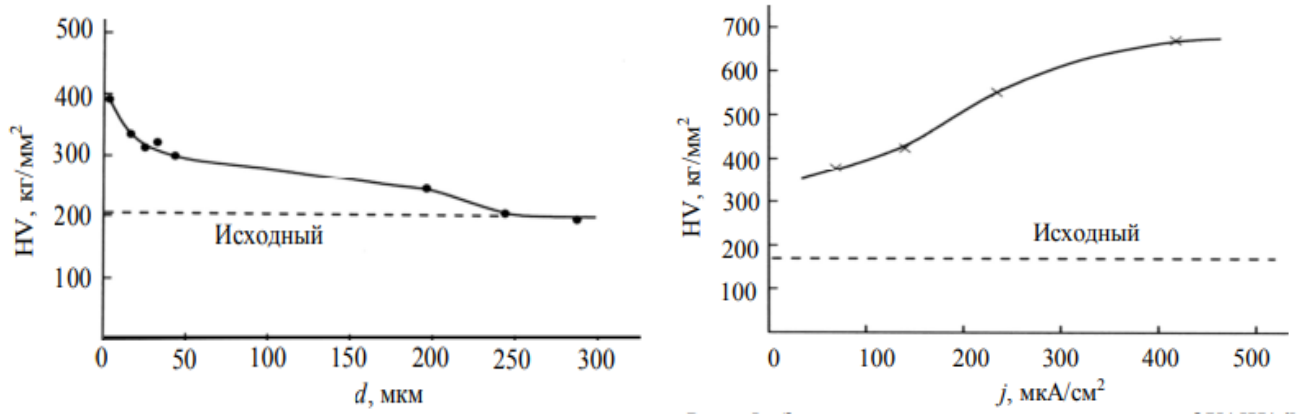
где c – удельная теплоемкость материала детали, Дж/(кг·К);

m – масса детали, кг.

В заключении необходимо отметить одну из основных особенностей ионной имплантации поверхности, отличающую ее от других видов химико-термической обработки. Выше было многократно отмечено, что при ионной имплантации ускоренные ионы внедряются в поверхность на глубину порядка десятка нанометров, при этом толщина модифицированной структуры материла поверхности с повышенной плотностью дислокаций и радиационно-стимулированных дефектов типа пар Френкеля, составляет десятки или даже сотни микрометров. Феномен упрочнения материала поверхности на глубину гораздо большую величины среднего пробега имплантируемых

ионов получил название «*эффект дальнодействия*»[29,30] и в настоящее время широко применяется при упрочнении поверхности деталей машин наравне с химико-термическими видами обработки: азотированием, борированием, цементацией.

На Рисунке Б.11 а показано распределение микротвердости в поверхности образца после ионной имплантации бора с энергией 40 кэВ при ионном токе 140 мкА/см^2. На графике видно, что при имплантации произошло увеличение микротвердости поверхностного слоя толщиной до 250 мкм, кроме этого утверждается, что на глубине ≈20 мкм выявлено наличие боридов. Микротвердость поверхности с увеличением плотности ионного потока увеличивается и может достигать величин в 2...3 раза, превышающих исходное состояние материала, до обработки (Рисунок Б.11 б).



а *б*

а – изменение микротвердости (HV) по глубине поверхности (*d*) после ионной имплантации;

б – повышение микротвердости (HV) при увеличении плотности ионного тока (*j*) B^+

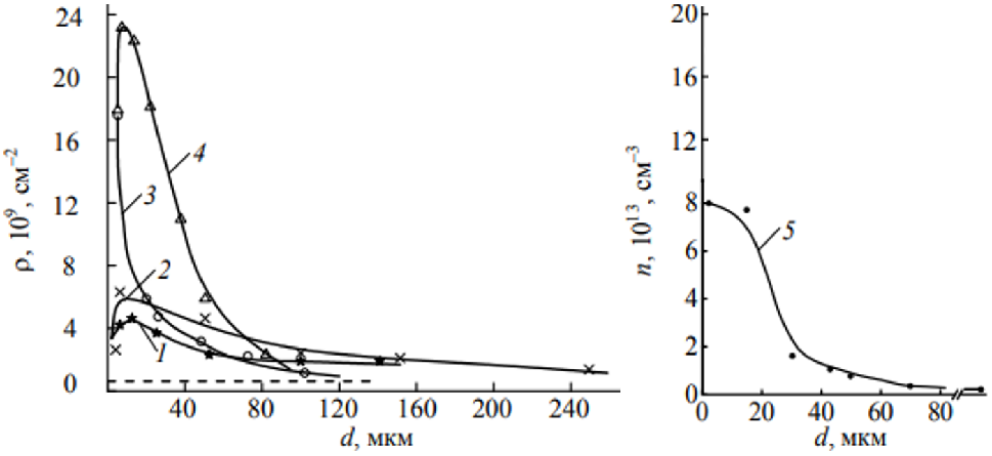
Рисунок Б.11 – Пример проявление эффекта дальнодействия при ионной имплантации бора[28]

Единой теории, объясняющей эффект дальнодействия, в настоящее время не существует. В работах проф. Шаркеева Ю.П.[29] одной из основных причин увеличения микротвердости на глубинах, превышающих на два-три порядка средний пробег имплантируемых ионов, указывается увеличение плотности структурных дефектов, сопровождающееся образованием дислокационных петель и пор за счет коагуляции точечных дефектов, возникающих при прохождении

[29] Гусева М.И. Исследование распыления и имплантации высокоэнергетичных ионов в электромагнитном сепараторе протонов. Диссертация. М., ИАЭ, 1962.

[30] Диденко А.Н., Шаркеев Ю.П. и др. Эффекты дальнодействия в ионно-имплантированных металлических материалах ... Томск: Издательство НТЛ, 2004. – 328 с.

ударных волн через объем материала поверхности. Характерные зависимости плотности дислокаций и концентрации дислокационных петель после ионной имплантации показаны на Рисунке Б.12.



а *б*

1, *2* – C^+; 3, 5 – Fe^+; *4* – W^+ дозами: *1* – 10^{16};

2, *3*, *5* – 10^{18} ион/см^2 при ускоряющем напряжении $U_{см}$ = 40 кВ

Рисунок Б.12 – Зависимость плотности дислокаций (*а*) и концентрации дислокационных петель (*б*) от расстояния до облучаемой поверхности после имплантации различных сортов ионов[29]

Постимплантационный отжиг

Термическая обработка после ионной имплантации, как это уже было сказано выше, стимулирует протекание диффузионных процессов имплантированых частиц и их перераспределение по глубине поверхности. Зная профиль распределения концентрации внедренной легированной примеси по глубине поверхности *N(x)*, рассмотрим динамику его изменения при действии постоянной температуры (*T*) от 400 до 500 ºС в течении нескольких часов, что соответствует нанесению ионно-плазменного покрытия после проведения ионной имплантации в одном вакуумном объеме.

В соответствии с первым законом Фика поток диффундирующих частиц в единицу времени через единицу площади поверхности (*J*) зависит от коэффициента диффузии и градиента концентрации частиц. В одномерном случае эта зависимость имеет вид:

$$J = -D\frac{dN}{dx}, \text{м}^{-2}\text{с}^{-1}, \qquad \text{(Б.38)}$$

где *dN/dx* – концентрация частиц, м$^{-3}$;

x – координата, м;

D – коэффициент диффузии порядка $10^{-16}…10^{-14}$ м^2/сек.

Связь между скоростью накопления частиц в единице объёма и градиентом потока диффундирующих частиц (dJ/dx) устанавливает второй закон Фика, который для одномерного случая записывают в виде:

$$\frac{dN}{dt} = D\frac{d^2N}{dx^2}, \text{м}^{-3}\text{с}^{-1}, \qquad \text{(Б.39)}$$

где N – концентрации внедренных в материал ионов, ион/м^2;

D – коэффициент диффузии, м^2/с;

t – время, с.

Решение уравнения диффузии (Б.39) позволяет получить аналитическое выражение для распределения частиц по глубине подложки $N(x)$ в любой момент времени t.

При ионной имплантации в поверхности детали формируется слой с известным профилем концентрации $N(x)$ внедренных ионов, который представляет из себя ограниченный источник примеси. При нагреве и выдержке с постоянной температурой атомы примеси из ограниченного источника перераспределяются по глубине поверхности, сохраняя свое начальное количество. В результате этого происходит постепенное уменьшение поверхностной концентрации примеси (N_0) с одновременным увеличением глубины ее залегания (x_n) (Рисунок Б.13).

Глубина залегания внедренной примеси при ионной имплантации во много раз меньше толщины подложки, что также справедливо и для максимальной глубины диффузии, отсюда для ограниченного источника диффузии имеем следующие начальные и граничные условия:

$$\begin{cases} N(x,0) = \begin{cases} N_0 \text{ при } 0 \le h \le \lambda_{\text{ср}} \\ 0 \text{ при } 2\lambda_{\text{ср}} \le h \le \infty. \end{cases} \\ N(\infty,\ t) = 0 \end{cases} \qquad \text{(Б.40)}$$

Зная функцию распределения внедренной примеси в поверхности (Б.30), найдем ее вторую производную и получим решение уравнения диффузии из ограниченного источника при указанных граничных условиях следующего вида:

$$N(x,t) \cong \frac{Q}{2\sqrt{\pi Dt}} e^{-\frac{x^2}{4Dt}}, \qquad \text{(Б.41)}$$

где Q – доза имплантированных ионов, ион/м^2;

D – коэффициент диффузии, м^2/с.

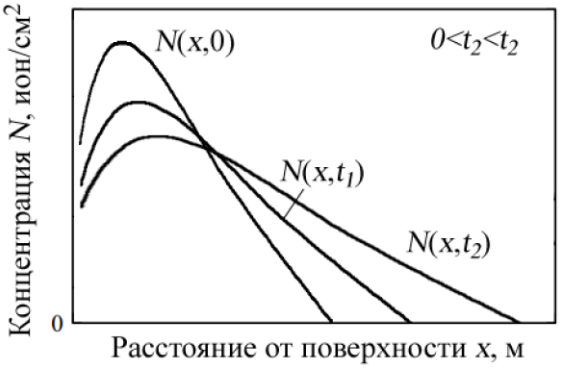


Рисунок Б.13 – Изменение концентрации имплантированной примеси в процессе постимплантационного отжига при постоянной температуре в течение времени t, ч

Согласно закону Аррениуса, коэффициент диффузии примеси зависит от температуры:

$$D = D_0 e^{\frac{W_a}{kT}}, \text{ м}^2/\text{с}, \qquad \text{(Б.42)}$$

где $W_a \approx 0{,}5..5$, эВ – энергия активации диффузии, рассчитываемая по тангенсу угла наклона линейного графика $ln(D) = f(T^{-1})$;

D_0 – значение коэффициента диффузии при W_a=0;

T – температура, К; k=8,62·10^{-5} – постоянная Больцмана, эВ/К.

Значения коэффициентов диффузии (D) основных примесей, как правило, являются справочными величинами, определяемыми эмпирически, например, для диффузии азота в титане установлено[31]: D(550 °С) = 3·10^{-15} см^2/с, D(650 °С) = 3·10^{-14} см^2/с; D(850 °С) = 9·10^{-14} см^2/с.

Полученные формулы распределения концентраций легирующих (имплантированных) примесей, в т.ч. с учетом последующей термообработки, были использованы при исследовании процессов ионно-имплантационной обработки и нанесения многослойных композиционных покрытий с нескольких протяженных ионных источников.

[31] Математическое моделирование диффузии азота в титане / Р.А. Манаков // Научный вестник НГТУ, № 1, 1995 г.

Приложение В

(Информационное)

Компьютерная программа, реализующая модель нанесения ионно-плазменных покрытий при работе нескольких протяженных ионных источников

```
////////////////////////////////////////////////////////
//////  Программа численного расчета скорости нанесения
//////  многослойного ионно-плазменного покрытия с
//////  нескольких ионных источников на установке Ватт-900
//////  (c) Селиванов Константин Сергеевич
////////////////////////////////////////////////////////

var

   omega_0:real;     // скорость вращения вокруг оси камеры
   omega_g:real;     // скорость вращения вокруг собственной оси
   mi, Z, e, p:real; // константы для расчета ионного потока

  delta:real;  // угол поворота 1
  gamma:real;  // угол поворота 2

  //вспомогательные переменные
  R, L0, u, h:real;
  dt,dy:real;
  fd, ft:text;
  i: integer;
  _r: real;

  Teta:array[1..3] of real;
  Ugol:array[1..3] of real; // угол разлета
    js:array[1..3] of real;
    hh:array[1..3] of real;


////////////////////////////////////////////////////////////////
// функция расчета скорости нанесения покрытия с источника "no"

 function GetVa(no:integer; d:real; g:real; dy:real; h:real):real;
 var  dd, gg:real;
       va, a:real;
    a_d,fi_d:real;
        L, S:real;
 begin
  dd := pi()-Teta[no]+d;
```

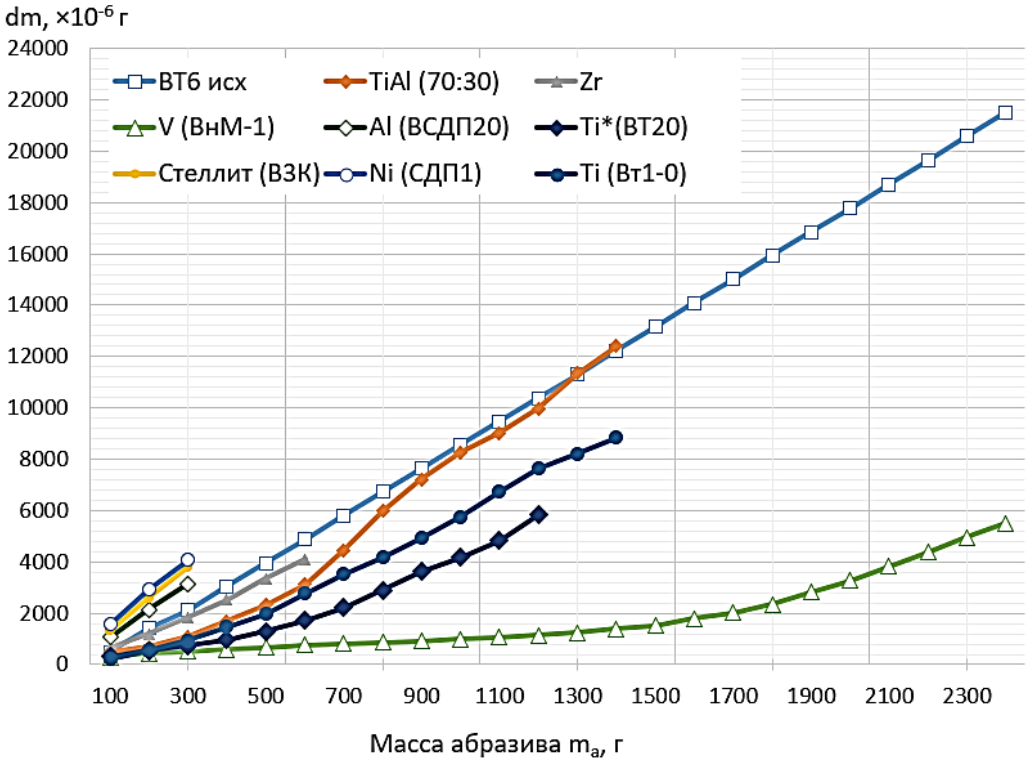
```
  gg := pi()-Teta[no]+g;

   a_d := sqrt(L0*L0 + R*R + 2*R*L0*cos(-dd));
  fi_d := arctan(R*sin(dd)/(L0+R*cos(dd)));

  //граничные условия
  if ((gg-fi_d)<0) or ((gg-fi_d)>pi() ) then
    begin
      GetVa :=0;
    end;

     L := sqrt(a_d*a_d+(h-dy)*(h-dy));
     S := 2*Ugol[no]*L*L; // площадь разлета

  va:=mi/(Z*e*p)*js[no]/S;
  a:=(h-dy)/a_d;
  a:=1/sqrt(1+a*a);

  va:=va*a*sin(gg-fi_d);

  if (va < 0) then GetVa:=0
              else GetVa:=va;

 end;

////////////////////////////////////////////////////////
 function pi():real;
 begin
   pi:=3.1416;
 end;

////////////////////////////////////////////////////////
/////  Основное тело программы
////////////////////////////////////////////////////////

 begin

// инициализация констант потока ионов титана
   mi:= 9.95e-26; //кг
   Z:= 1.78;      //Ti+
   e:= 1.6e-19;   //Дж
   p:= 4540;      //кг/м3

// параметры вакуумной камеры (констр.)
   R := 0.390;    //м
   L0:= 0.450;    //м
```

```
    u:= 3.33;     //передаточное число
   omega_0:=5;    //м-1
   omega_g:=3.33*omega_0; //м-1

// угол расположения источника по периметру камеры (констр.)
   Teta[1]:= pi();
   Teta[2]:= 3/2*pi();
   Teta[3]:= 2*pi();

// плотность ионного тока каждого источника (экспер.)
   js[1]:=58.27/6;  //А/м2
   js[2]:=58.27/6;  //А/м2
   js[3]:=58.27/6;  //А/м2

// угол разлета ионов каждого источника (констр.)
   Ugol[1]:= 120/180*pi();
   Ugol[2]:= 120/180*pi();
   Ugol[3]:= 120/180*pi();

// начальная толщина покрытия
   hh[1]:=0; hh[2]:=0; hh[3]:=0;

//открытие файла на запись
  fd:= OpenWrite('fd_t(1).csv');

// инициализация начальных переменных
  h := 0.825;    // (м)   длина ионных истоников
  omega_0:=5;    // (м-1) скорость вращения вокруг оси камеры
  u := 5.5;      // передаточное число планетарного редуктора
  dt:=0;         // начальное время

// численное интегрирование толщины покрытия, наносимого с каждого
// ионного источника за заданное количество оборотов
  while dt<=(60/omega_0) * 3 do // произвольно: 3 - кол-во оборотов
  begin
    delta := omega_0/60*dt*2*pi();//радиан
    gamma := delta * u;// - pi()/2 ;
    dy:=0;

    _r := GetVa(1, delta, gamma, dy, h);
    hh[1]:= hh[1]+ _r;
    fd.write('  '+delta/pi()*180+';'+_r+';');

    _r:= GetVa(2, delta, gamma, dy, h);
    hh[2]:= hh[2]+ _r;
    fd.write(_r+';');
```

```
    _r:= GetVa(3, delta, gamma, dy, h);
    hh[3]:= hh[3]+ _r;
    fd.write(_r+';');

    fd.write('  '+dt+';'+hh[1]+';');
    fd.write(hh[2]+';');
    fd.writeln(hh[3]+';');

    dt:=dt+0.1; //(сек) шаг интегрирования по времени
  end;

//закрытие файла на запись
  Close(fd);

//сообщение об окончании работы
   writeln('Завершено без ошибок');

 end.
```

Приложение Г
(Обязательное)

Экспериментальные результаты испытания многослойных ионно-плазменных покрытий из различных материалов на газоабразивный износ



Обозначения в соответствии с Таблицей Г.1

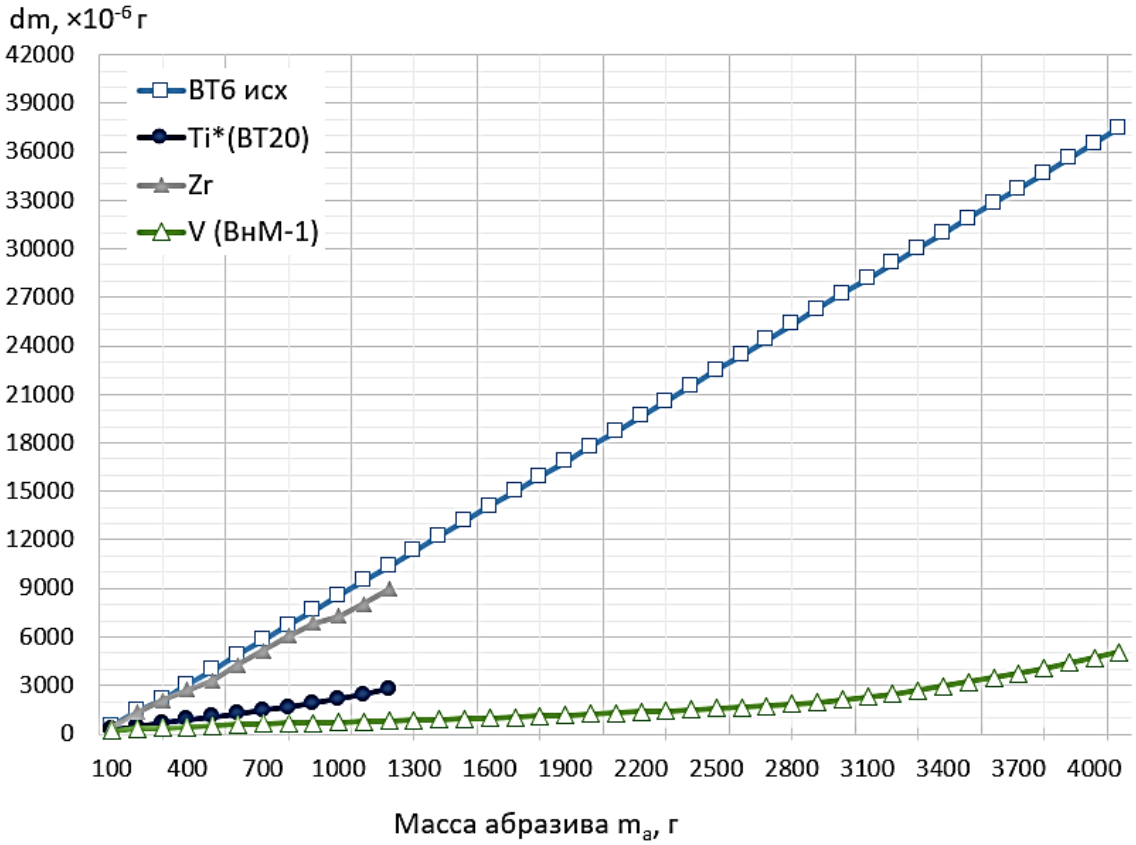
Рисунок Г.1 – Эрозионные кривые четырехслойных покрытий, h≈6 мкм

Таблица Г.1 – Варианты четырехслойных эрозионностойких покрытий

Вариант покрытия	Обозначение материала ЭДИ* №2	Толщина h, мкм	Относительная износостойкость** ξ
1	*2*	*3*	*4*
ВТ6 – эталон	ВТ6 исх.	–	1,0
(Ti + (TiAl,Ti)N) x2	TiAl:Ti (70:30 вес.%)	6,0±0,5	2,0
(Ti + (Zr,Ti)N) x2	Zr (Э-110)	5,8±0,5	1,7
((V,Ti) + (V,Ti)N) x2	V (ВнМ-1)	6,2±0,5	11,7
(Ti + (Al,Ti)N) x2	Al (ВСДП20)	6,6±0,5	0,8
(Ti +(ВЗК,Ti)N) x2	ВЗК (Стеллит)	6,5±0,5	0,6
(Ti + (Ni,Ti)N) x2	Ni (СДП1)	5,3±0,5	0,6
(Ti + TiN) x2	Ti (ВТ1-0)	5,6±0,5	2,7
(Ti + Ti*N) x2	Ti* (ВТ20)	6,6±0,5	3,8

* – покрытие формировалось при одновременной работе двух электродуговых испарителей (ЭДИ): первый – материал ВТ1-0 (Ti), второй – в соответствии с обозначением в столбце 2;

** – в соответствии с методикой расчета ГОСТ 23.201-78: угол атаки 60^{O}, частота центрифуги 9500 об/с, абразивный материал – электрокорунд F-280



Обозначения в соответствии с Таблицей Г.2

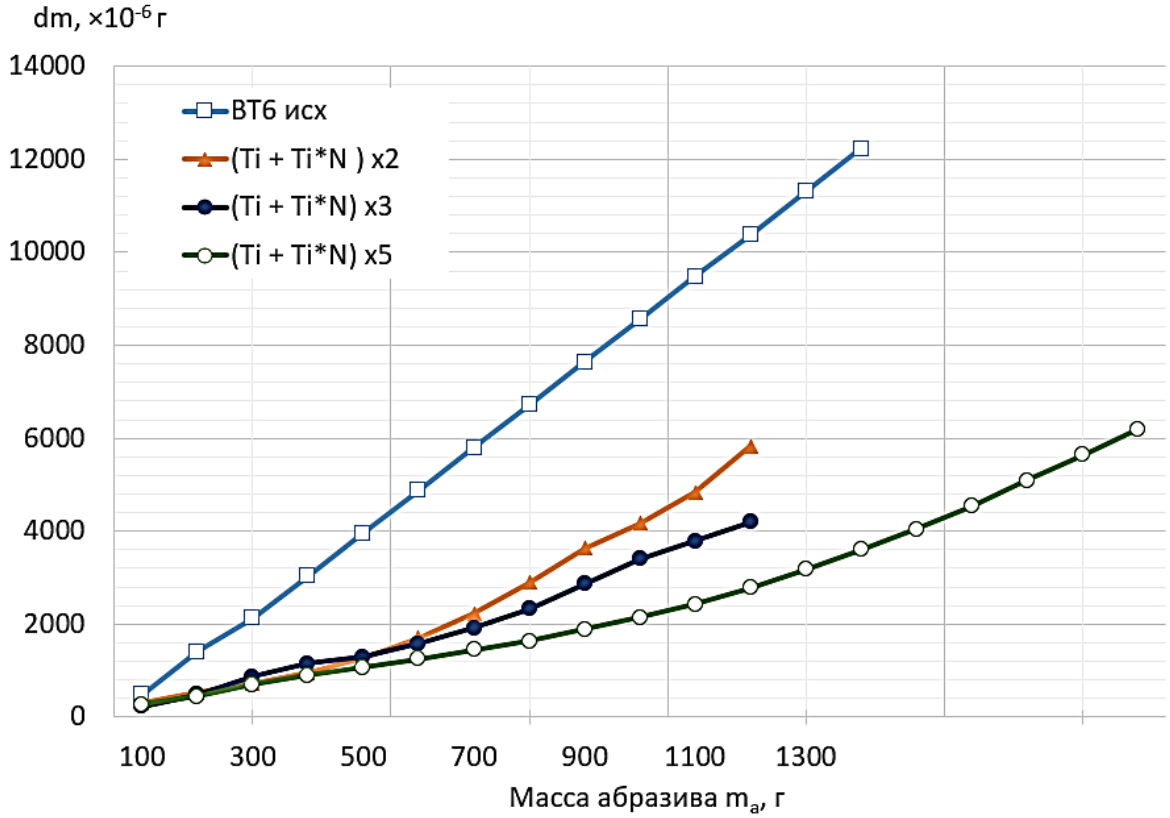
Рисунок Г.2 – Эрозионные кривые десятислойных покрытий, h≈10 мкм

Таблица Г.2 – Варианты десятислойных эрозионностойких покрытий

Вариант покрытия	Обозначение материала ЭДИ[1] №2	Толщина h, мкм	Относительная износостойкость[2] ξ
ВТ6 – эталон	ВТ6 исх.	–	1,0
(Ti + (Zr,Ti)N) x5	Zr (Э-110)	15,2±1,5	1,7
((V,Ti) + (V,Ti)N) x5	V (ВнМ-1)	15,9±1,5	12,3
(Ti + Ti*N) x5	Ti* (ВТ20)	15,8±1,5	4,9

Примечания – Обозначения покрытий по Таблице Г.1

Результаты испытания многослойных ионно-плазменных покрытий на газоабразивный износ при различной толщине и количестве слоев покрытий



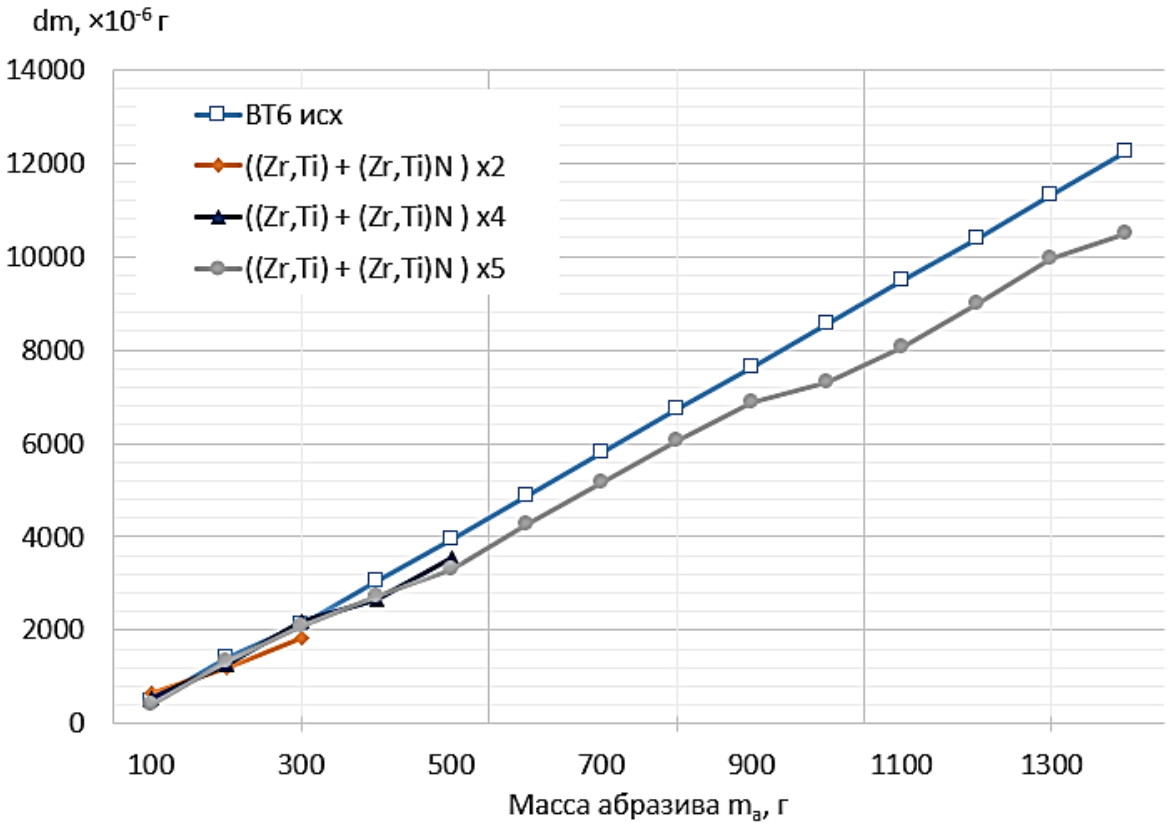
Ti* – титановый сплав ВТ20, обозначения в соответствии с Таблицей Г.3

Рисунок Г.3 – Эрозионные кривые покрытий типа Ti*N при различном количестве пар слоев

Таблица Г.3 – Варианты эрозионностойких покрытий с различным количеством слоев

Вариант покрытия	Обозначение материала ЭДИ[1] №2	Толщина *h*, мкм	Относительная износостойкость[2] ξ
ВТ6 – эталон	ВТ6 исх.	–	1,0
(Ti + Ti*N) x2	Ti* (ВТ20)	6,6±1,0	3,8
(Ti + Ti*N) x3	Ti* (ВТ20)	9,1±1,5	4,1
(Ti + Ti*N) x5	Ti* (ВТ20)	15,8±1,5	4,9

Примечание – толщина нитридных слоев у всех покрытий *hN*=2,5 мкм; обозначения покрытий по Таблице Г.1



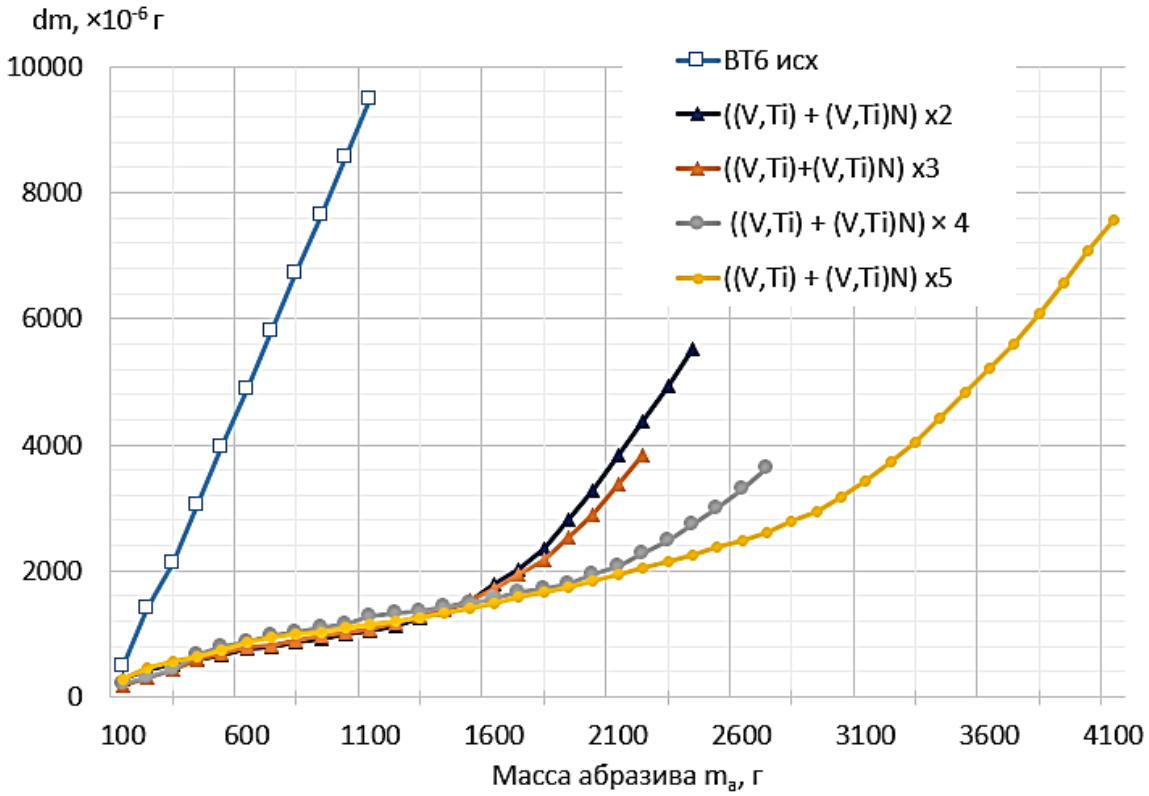
Обозначения даны в соответствии с Таблицей Г.4

Рисунок Г.4 – Эрозионные кривые покрытий типа (Zr,Ti)N при различном количестве пар слоев

Таблица Г.4 – Варианты эрозионностойких покрытий с различным количеством слоев

Вариант покрытия	Обозначение материала ЭДИ[1] №2	Толщина *h*, мкм	Относительная износостойкость[2] ξ
(Ti + (Zr,Ti)N) x2	Zr (Э-110)	5,8±1,5	1,7
(Ti + (Zr,Ti)N) x4	Zr (Э-110)	12,4±1,5	1,6
(Ti + (Zr,Ti)N) x5	Zr (Э-110)	15,2±1,5	1,9

Примечание – Толщина нитридных слоев у всех покрытий *hN*=2,5 мкм; обозначения покрытий по Таблице Г.1



Обозначения даны в соответствии с Таблицей Г.5

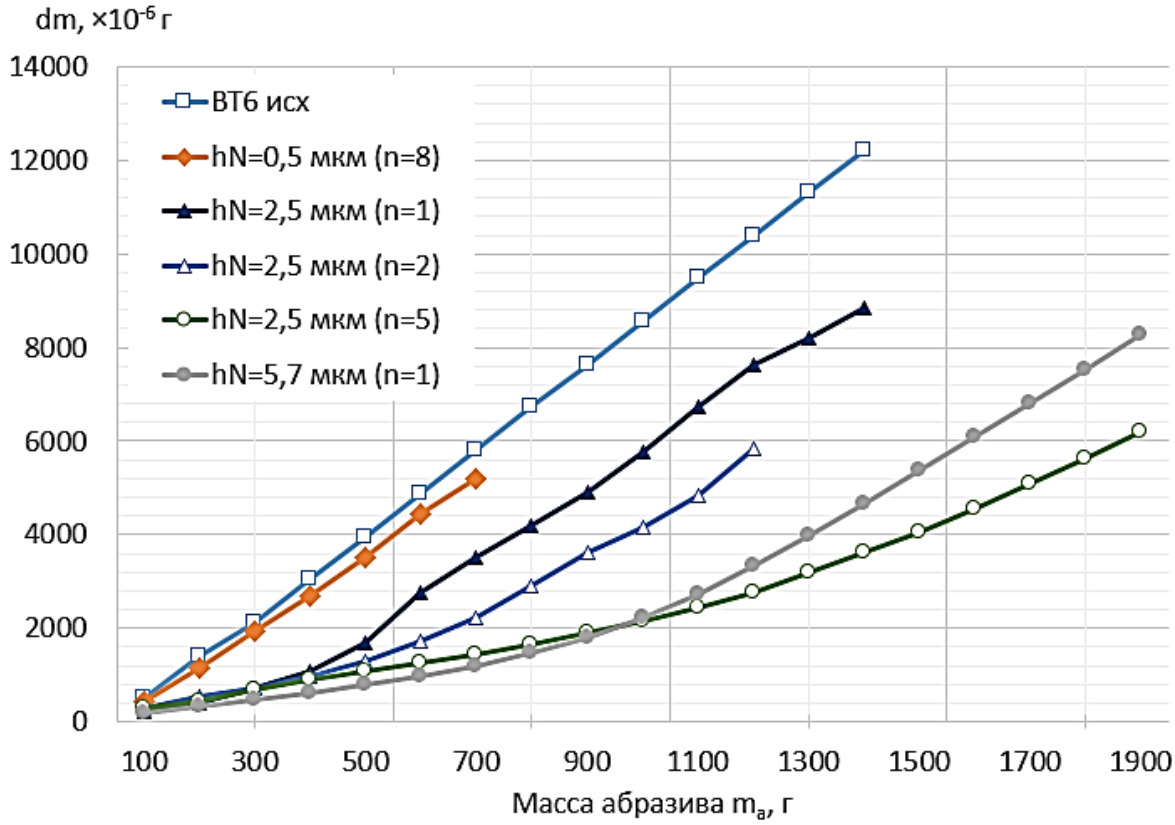
Рисунок Г.5 – Эрозионные кривые покрытий типа (V,Ti)N при различном количестве пар слоев

Таблица Г.5 – Варианты эрозионностойких покрытий с различным количеством слоев

Вариант покрытия	Обозначение материала ЭДИ[1] №2	Толщина *h*, мкм	Относительная износостойкость[2] ξ
((V,Ti) + (V,Ti)N) x2	V (ВнМ-1)	6,2±1,5	11,7
((V,Ti) + (V,Ti)N) x3	V (ВнМ-1)	9,1±1,5	11,3
((V,Ti) + (V,Ti)N) x4	V (ВнМ-1)	12,3±1,5	12,0
((V,Ti) + (V,Ti)N) x5	V (ВнМ-1)	15,9±1,5	12,3

Примечание – Толщина нитридных слоев у всех покрытий *hN*=2,5 мкм; обозначения покрытий по Таблице Г.1

Результаты испытания многослойных ионно-плазменных покрытий на газоабразивный износ при различной толщине нитридных слоев (h_N)



Обозначения даны соответствии с Таблицей Г.6

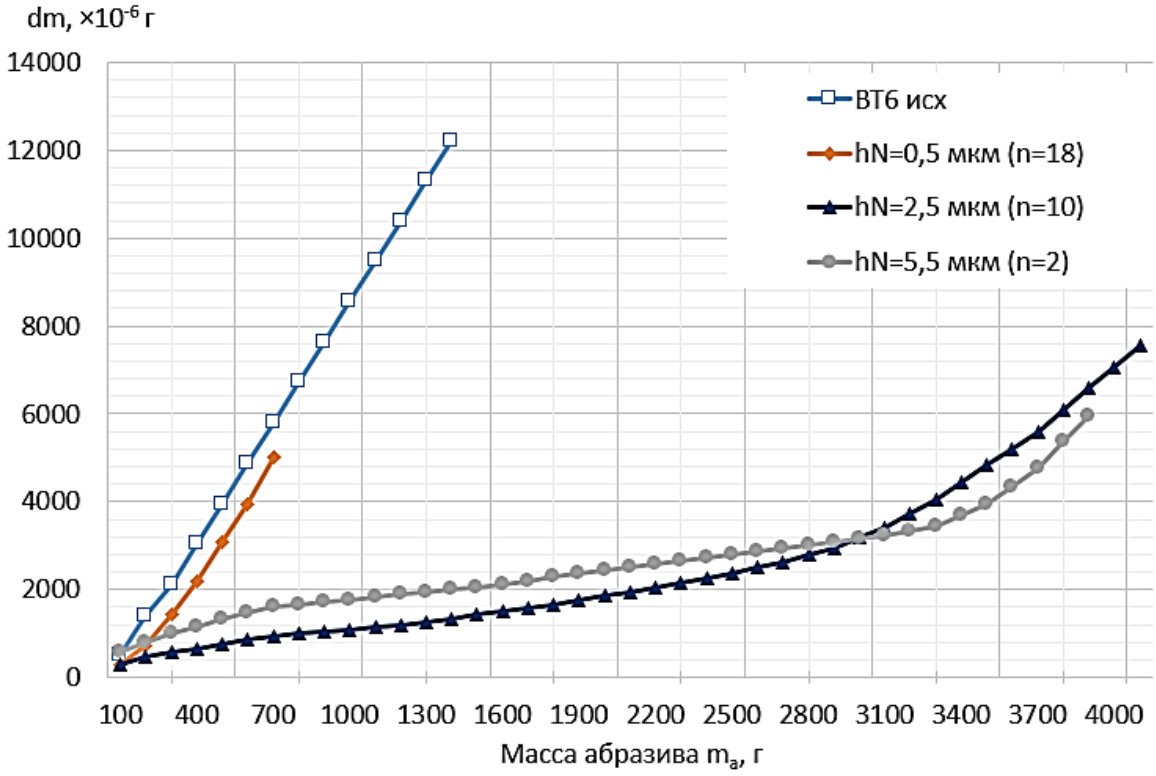
Рисунок Г.6 – Эрозионные кривые покрытий (Ti + Ti*N) x *n*,
с различной толщиной нитридных слоев *hN*

Таблица Г.6 – Варианты многослойных эрозионностойких покрытий с различной толщиной нитридных слоев

Вариант покрытия*	Обозначение	Толщина покрытия *h*, мкм	Относительная износостойкость** ξ
1	*2*	*3*	*4*
ВТ6 – эталон	ВТ6 исх.	–	1,0
(Ti + Ti*N) x8	*hN*=0,5 мкм (*n*=8)	5,5±0,5	1,5
Ti + Ti*N	*hN*=2,5 мкм (*n*=1)	3,6±0,5	3,7
(Ti + Ti*N) x2	*hN*=2,5 мкм (*n*=2)	6,6±1,0	3,8
(Ti + Ti*N) x5	*hN*=2,5 мкм (*n*=5)	15,8±2,5	4,9
Ti + Ti*N	*hN*=5,7 мкм (*n*=1)	6,2±0,5	5,1

* – обозначения материалов: Ti – ВТ1-0; Ti* – ВТ20; V – ВнМ-1; обозначение конструкции: *hN* – толщина нитридных слоев; *n* – количество пар слоев;

** – в соответствии с методикой расчета ГОСТ 23.201-78: угол атаки 60^{O}, частота центрифуги 9500 об/с, абразивный материал – электрокорунд F-280.



Обозначения даны соответствии с Таблицей Г.7

Рисунок Г.7 – Эрозионные кривые покрытий ((V,Ti) + (V,Ti)N) x *n*,

с толщиной нитридных слоев *hN*

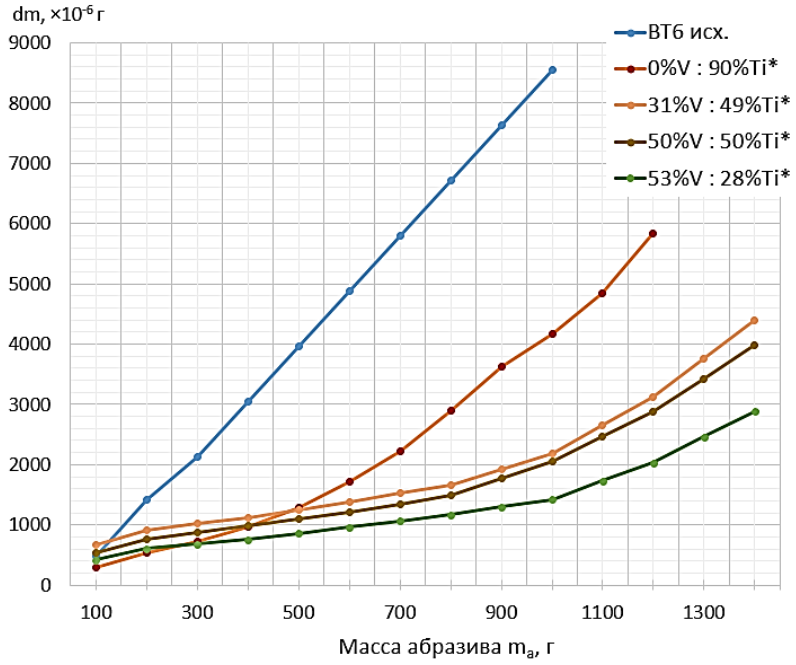
Таблица Г.7 – Варианты многослойных эрозионностойких покрытий с различной толщиной нитридных слоев

Вариант покрытия*	Обозначение	Толщина покрытия *h*, мкм	Относительная износостойкость** ξ
((V,Ti) + (V,Ti)N) x18	*hN*=0,5 мкм (*n*=18)	11,4±1,5	2,5
((V,Ti) + (V,Ti)N) x5	*hN*=2,5 мкм (*n*=5)	15,9±1,5	12,3
((V,Ti) + (V,Ti)N) x2	*hN*=2,5 мкм (*n*=2)	6,2±1,0	11,7

* – обозначения материалов: Ti – ВТ1-0; Ti* – ВТ20; V – ВнМ-1; обозначение конструкции: *hN* – толщина нитридных слоев; *n* – количество пар слоев;

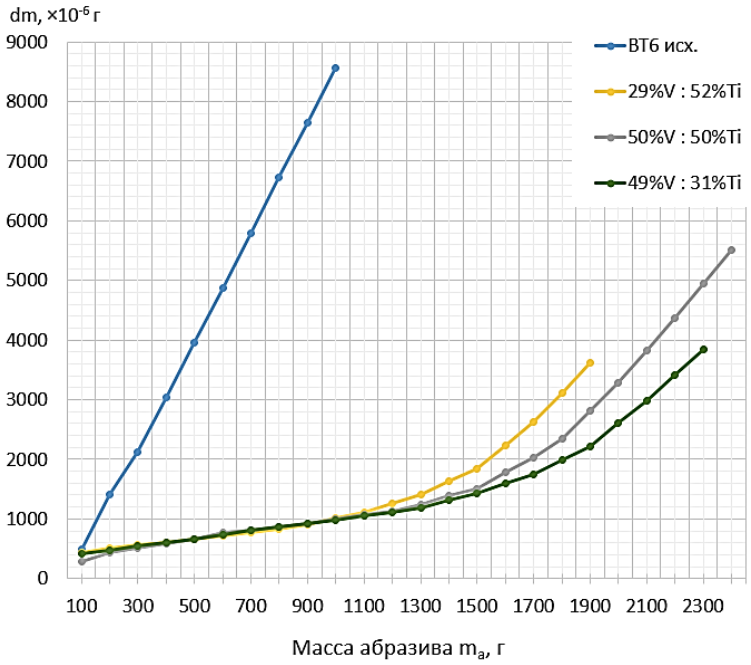
** – в соответствии с методикой расчета ГОСТ 23.201-78: угол атаки 60^{O}, частота центрифуги 9500 об/с, абразивный материал – электрокорунд F-280

Результаты испытания многослойных ионно-плазменных покрытий на газоабразивный износ при различном содержании ванадия (V)



Обозначения даны соответствии с Таблицей Г.8

Рисунок Г.8 – Изменение массы образца в процессе его изнашивания в зависимости от содержания ванадия, четырехслойное покрытие системы (Ti + Ti*N) x2



Обозначения даны соответствии с Таблицей Г.8

Рисунок Г.9 – Изменение массы образца в процессе его изнашивания в зависимости от содержания ванадия, четырехслойное покрытие системы ((V,Ti) + (V,Ti)N) x2

Таблица Г.8 – Варианты многослойных эрозионностойких покрытий с различным содержанием ванадия

Вариант покрытия*	Отношение (V : Ti), вес.%	Толщина покрытия *h*, мкм	Относительная износостойкость** ξ
2	*3*	*4*	*5*
ВТ6 – эталон	ВТ6 исх.	–	1,0
(Ti + Ti*N) x2	0 (0%V:90%Ti)	6,6±1,5	3,8
((V,Ti) + (V,Ti*)N) x2	0,6 (28%V:53%Ti)	7,1±1,5	5,1
((V,Ti) + (V,Ti*)N) x2	1 (50%V:50%Ti)	7,8±1,5	5,7
((V,Ti) + (V,Ti*)N) x2	1,6 (49%V:31%Ti)	5,3±1,0	7,8
((V,Ti) + (V,Ti)N) x2	0,6 (29%V:52%Ti)	6,8±1,5	10,7
((V,Ti) + (V,Ti)N) x2	1 (50%V:50%Ti)	6,2±1,0	11,7
((V,Ti) + (V,Ti)N) x2	1,6 (49%V:31%Ti)	6,4±1,0	12,4

* – обозначения материалов: Ti – ВТ1-0; Ti* – ВТ20; V – ВнМ-1; обозначение конструкции: *hN* – толщина нитридных слоев; *n* – количество пар слоев;

** – в соответствии с методикой расчета ГОСТ 23.201-78: угол атаки 60^{O}, частота центрифуги 9500 об/с, абразивный материал – электрокорунд F-280

Приложение Д
(Обязательное)

Экспериментальные результаты усталостных испытаний

Исходное состояние образцов из ВТ6
(термообработка + полирование войлочными кругами)

Таблица Д.1 – Результаты испытаний

Напряжение σ_{-1}, МПа	Частота f, Гц	Число наработки N, циклов	Результат испытания
500	605	$0{,}07\cdot10^6$	сломался
480	600	$4{,}00\cdot10^5$	сломался
460	601	$1{,}20\cdot10^6$	сломался
440	604	$3{,}60\cdot10^6$	сломался
460	605	$2{,}00\cdot10^6$	сломался
440	602	$8{,}00\cdot10^7$	сломался
420	597	$1{,}60\cdot10^7$	сломался
420	600	$1{,}20\cdot10^7$	сломался
400	594	$2{,}00\cdot10^7$	**не сломался**
400	607	$2{,}00\cdot10^7$	**не сломался**
400	602	$2{,}00\cdot10^7$	**не сломался**
400	598	$2{,}00\cdot10^7$	**не сломался**
400	600	$2{,}00\cdot10^7$	**не сломался**

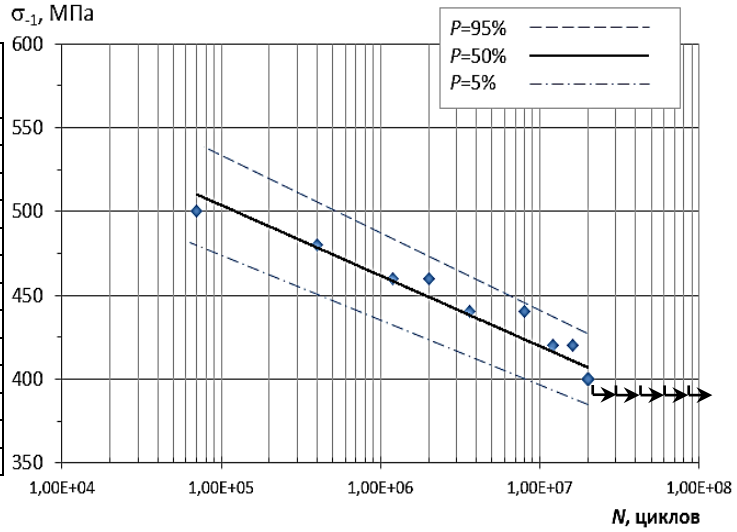


Рисунок Д.1 – График усталостного разрушения с вероятностью P = 5; 50; 95%

Образцы из ВТ6 с упрочнением
ионная имплантация азота, доза D=2·10^{17} ион/см^2

Таблица Д.2 – Результаты испытаний

Напряжение σ_{-1}, МПа	Частота f, Гц	Число наработки N, циклов	Результат испытания
620	632	$2{,}8\cdot10^6$	сломался
580	612	$7{,}6\cdot10^6$	сломался
620	622	$1{,}1\cdot10^6$	сломался
580	610	$6{,}6\cdot10^6$	сломался
540	593	$1{,}1\cdot10^7$	сломался
580	588	$4{,}2\cdot10^6$	сломался
540	601	$9{,}7\cdot10^7$	сломался
540	623	$1{,}3\cdot10^7$	сломался
500	587	$2{,}0\cdot10^7$	**не сломался**
500	607	$2{,}0\cdot10^7$	**не сломался**
500	601	$2{,}0\cdot10^7$	**не сломался**
500	592	$2{,}0\cdot10^7$	**не сломался**

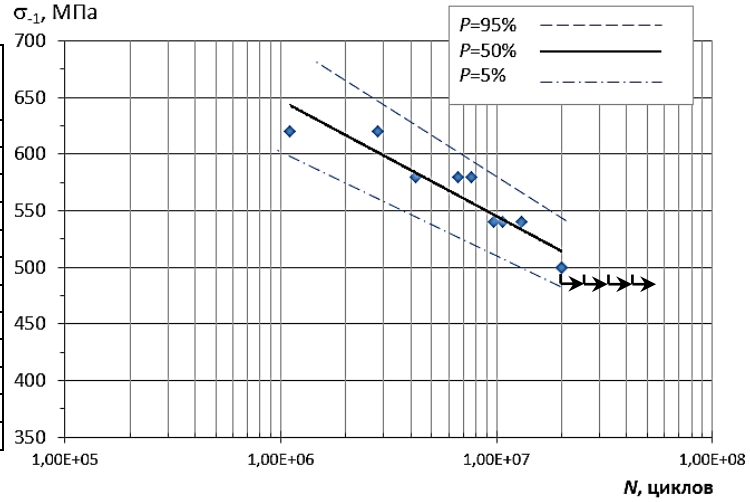


Рисунок Д.2 – График усталостного разрушения с вероятностью P = 5; 50; 95%

Образцы из ВТ6 с упрочнением
ионная имплантация азота + покрытие 0,5Ti+10TiN, *h*=10,5±1,5 мкм

Таблица Д.3 – Результаты испытаний

Напряжение σ_{-1}, МПа	Частота *f*, Гц	Число наработки *N*, циклов	Результат испытания
560	611	$2{,}3\cdot10^6$	сломался
520	642	$8{,}6\cdot10^6$	сломался
560	623	$1{,}1\cdot10^6$	сломался
520	591	$7{,}8\cdot10^6$	сломался
480	613	$1{,}1\cdot10^7$	сломался
520	621	$5{,}2\cdot10^6$	сломался
480	585	$2{,}0\cdot10^7$	**не сломался**
480	611	$1{,}5\cdot10^7$	сломался
440	598	$2{,}0\cdot10^7$	**не сломался**
440	607	$2{,}0\cdot10^7$	**не сломался**
440	611	$2{,}0\cdot10^7$	**не сломался**
440	588	$2{,}0\cdot10^7$	**не сломался**

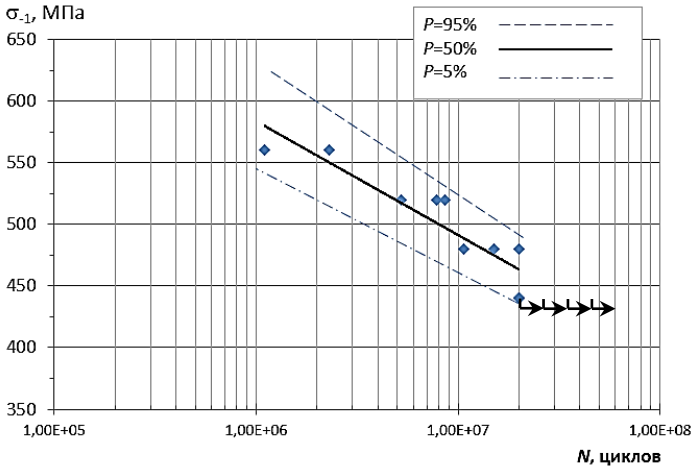


Рисунок Д.3 – График усталостного разрушения с вероятностью *P* = 5; 50; 95%

Образцы из ВТ6 с упрочнением
ионная имплантация азота + покрытие (0,3Ti + 2,5Ti*N)x5, *h*=14±1,6 мкм

Таблица Д.4 – Результаты испытаний

Напряжение σ_{-1}, МПа	Частота *f*, Гц	Число наработки *N*, циклов	Результат испытания
560	651	$2{,}0\cdot10^6$	сломался
560	649	$1{,}1\cdot10^6$	сломался
520	631	$7{,}6\cdot10^6$	сломался
520	612	$3{,}9\cdot10^6$	сломался
520	591	$3{,}2\cdot10^6$	сломался
480	599	$1{,}2\cdot10^7$	сломался
480	632	$7{,}1\cdot10^6$	сломался
480	607	$7{,}5\cdot10^6$	сломался
440	587	$2{,}0\cdot10^7$	**не сломался**
440	592	$2{,}0\cdot10^7$	**не сломался**
440	596	$2{,}0\cdot10^7$	**не сломался**
440	614	$2{,}0\cdot10^7$	**не сломался**

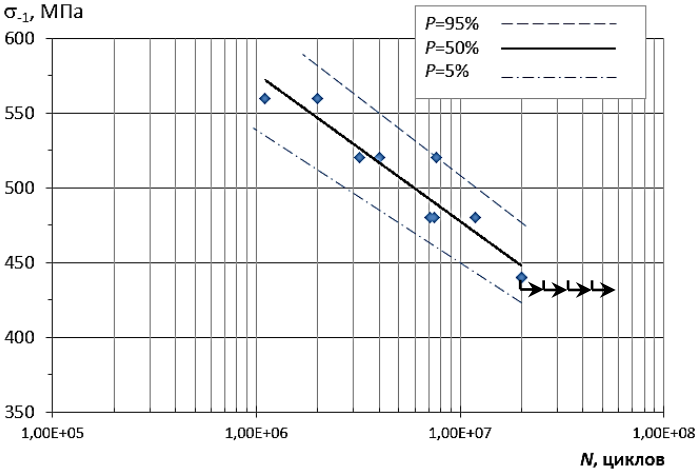


Рисунок Д.4 – График усталостного разрушения с вероятностью *P* = 5; 50; 95%

Образцы из ВТ6 с упрочнением
ионная имплантация азота + покрытие (0,5Ti+10TiN)x2, *h*=21±2,2 мкм

Таблица Д.5 – Результаты испытаний

Напряжение σ_{-1}, МПа	Частота *f*, Гц	Число наработки *N*, циклов	Результат испытания
500	621	$1{,}9\cdot10^6$	сломался
460	648	$1{,}2\cdot10^7$	сломался
500	637	$5{,}9\cdot10^6$	сломался
460	601	$9{,}4\cdot10^6$	сломался
460	609	$5{,}8\cdot10^6$	сломался
420	612	$2{,}0\cdot10^7$	**не сломался**
420	610	$2{,}0\cdot10^7$	**не сломался**
420	591	$2{,}0\cdot10^7$	**не сломался**
420	586	$2{,}0\cdot10^7$	**не сломался**
420	617	$2{,}0\cdot10^7$	**не сломался**

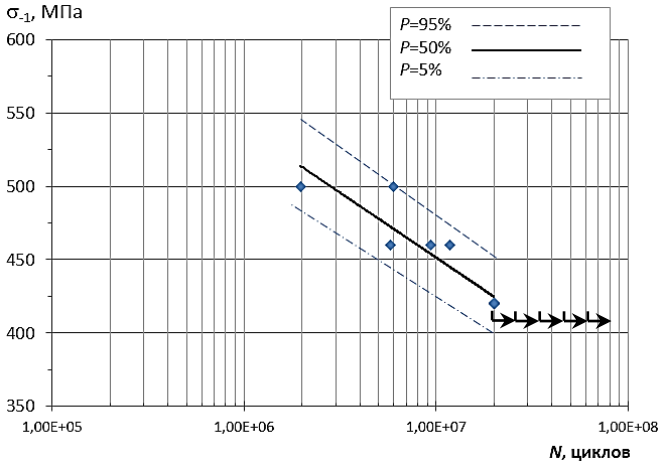


Рисунок Д.5 – График усталостного разрушения с вероятностью *P* = 5; 50; 95%

Образцы из ВТ6 с упрочнением
ионная имплантация азота + покрытие (0,5Ti+10Ti*N)x3, *h*=31,5±2,5 мкм

Таблица Д.6 – Результаты испытаний

Напряжение σ_{-1}, МПа	Частота *f*, Гц	Число наработки *N*, циклов	Результат испытания
460	591	$7{,}0\cdot10^5$	сломался
440	608	$3{,}0\cdot10^6$	сломался
440	630	$1{,}5\cdot10^6$	сломался
420	612	$1{,}2\cdot10^7$	сломался
420	609	$8{,}0\cdot10^6$	сломался
400	591	$1{,}8\cdot10^7$	сломался
400	612	$2{,}0\cdot10^7$	**не сломался**
400	596	$2{,}0\cdot10^7$	**не сломался**
400	601	$1{,}5\cdot10^7$	сломался
380	594	$2{,}0\cdot10^7$	**не сломался**
380	586	$2{,}0\cdot10^7$	**не сломался**
380	604	$2{,}0\cdot10^7$	**не сломался**
380	605	$2{,}0\cdot10^7$	**не сломался**
380	600	$2{,}0\cdot10^7$	**не сломался**

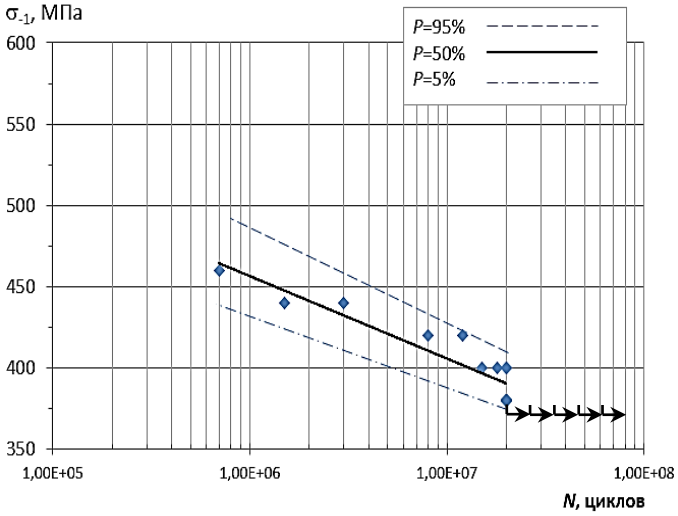


Рисунок Д.6 – График усталостного разрушения с вероятностью *P* = 5; 50; 95%

Лопатки РКНД 1 ст. в исходном состоянии, полирование войлочными кругами

Таблица Д.7 – Результаты испытаний

Напряжение σ_{-1}, МПа	Частота *f*, Гц	Число наработки *N*, циклов	Результат испытания
400	238	$4{,}2\cdot10^5$	сломался
400	242	$3{,}7\cdot10^5$	сломался
380	244	$8{,}6\cdot10^5$	сломался
360	239	$1{,}0\cdot10^6$	**не сломался**
380	244	$5{,}7\cdot10^5$	сломался
360	240	$8{,}7\cdot10^5$	сломался
360	222	$8{,}9\cdot10^5$	сломался
340	239	$1{,}0\cdot10^6$	**не сломался**
340	239	$1{,}0\cdot10^6$	**не сломался**
340	239	$1{,}0\cdot10^6$	**не сломался**
340	239	$1{,}0\cdot10^6$	**не сломался**
340	239	$1{,}0\cdot10^6$	**не сломался**
340	239	$1{,}0\cdot10^6$	**не сломался**

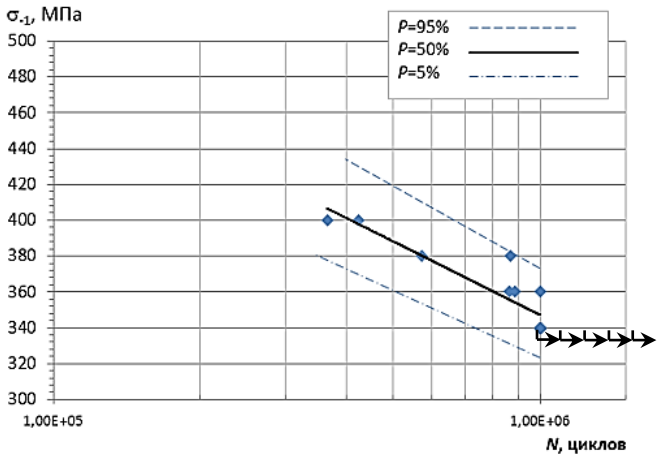


Рисунок Д.7 – График усталостного разрушения с вероятностью P = 5; 50; 95%

Лопатки РКНД 1 ст. после упрочнения,
ионная имплантация азота (доза $D = 2\cdot10^{17}$ ион/см^2)

Таблица Д.8 – Результаты испытаний

Напряжение σ_{-1}, МПа	Частота *f*, Гц	Число наработки *N*, циклов	Результат испытания
540	238	$3{,}6\cdot10^5$	сломался
460	243	$7{,}6\cdot10^5$	сломался
540	240	$3{,}2\cdot10^5$	сломался
500	247	$4{,}4\cdot10^5$	сломался
500	238	$3{,}7\cdot10^5$	сломался
500	242	$5{,}3\cdot10^5$	сломался
460	247	$8{,}1\cdot10^5$	сломался
420	240	$1{,}0\cdot10^6$	**не сломался**
420	242	$1{,}0\cdot10^6$	**не сломался**
420	244	$1{,}0\cdot10^6$	**не сломался**
420	244	$1{,}0\cdot10^6$	**не сломался**
420	244	$1{,}0\cdot10^6$	**не сломался**

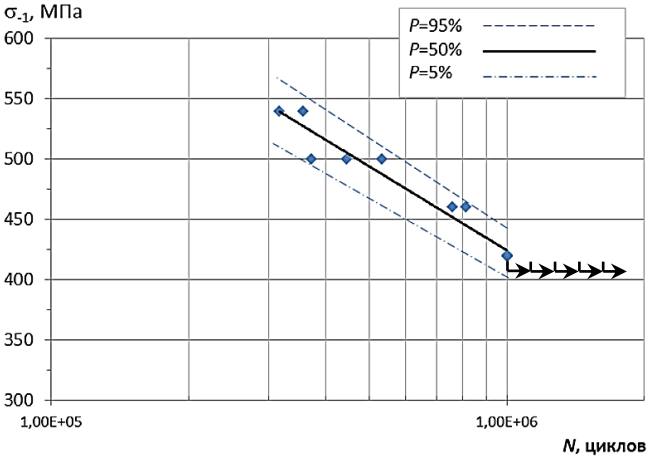


Рисунок Д.8 – График усталостного разрушения с вероятностью P = 5; 50; 95%

Лопатки РКНД 1 ст. с упрочнением
ионная имплантация азота + покрытие (0,3(V,Ti) + 2,5(V,Ti)N)x2, h = 7±1 мкм

Таблица Д.9 – Результаты испытаний

Напряжение σ_{-1}, МПа	Частота *f*, Гц	Число наработки *N*, циклов	Результат испытания
560	241	$1{,}8\cdot10^5$	сломался
560	236	$3{,}1\cdot10^5$	сломался
520	237	$2{,}4\cdot10^5$	сломался
480	245	$4{,}6\cdot10^5$	сломался
480	238	$5{,}6\cdot10^5$	сломался
440	235	$9{,}4\cdot10^5$	сломался
440	244	$7{,}6\cdot10^5$	сломался
400	236	$1{,}0\cdot10^6$	**не сломался**
400	234	$1{,}0\cdot10^6$	**не сломался**
400	237	$1{,}0\cdot10^6$	**не сломался**
400	246	$1{,}0\cdot10^6$	**не сломался**
400	241	$1{,}0\cdot10^6$	**не сломался**

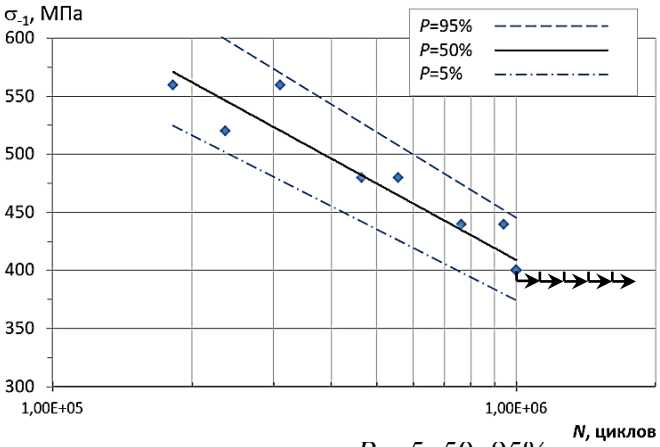


Рисунок Д.9 – График усталостного разрушения с вероятностью P = 5; 50; 95%

Лопатки РКНД 1 ст. с упрочнением
ионная имплантация азота + покрытие (0,3(V,Ti) + 2,5(V,Ti)N)x5, *h* = 12,5±1,5 мкм

Таблица Д.10 – Результаты усталостных испытаний

Напряжение σ_{-1}, МПа	Частота *f*, Гц	Число наработки *N*, циклов	Результат испытания
540	245	$1{,}2\cdot10^5$	сломался
540	243	$2{,}0\cdot10^5$	сломался
500	239	$2{,}1\cdot10^5$	сломался
500	240	$3{,}9\cdot10^5$	сломался
500	238	$3{,}0\cdot10^5$	сломался
460	242	$4{,}0\cdot10^5$	сломался
460	241	$4{,}1\cdot10^5$	сломался
460	236	$5{,}4\cdot10^5$	сломался
460	237	$5{,}6\cdot10^5$	сломался
420	245	$5{,}6\cdot10^5$	сломался
420	238	$6{,}9\cdot10^5$	сломался
420	235	$7{,}4\cdot10^5$	сломался
380	243	$1{,}0\cdot10^6$	**не сломался**
380	245	$1{,}0\cdot10^6$	**не сломался**
380	240	$1{,}0\cdot10^6$	**не сломался**
380	244	$1{,}0\cdot10^6$	**не сломался**
380	242	$1{,}0\cdot10^6$	**не сломался**

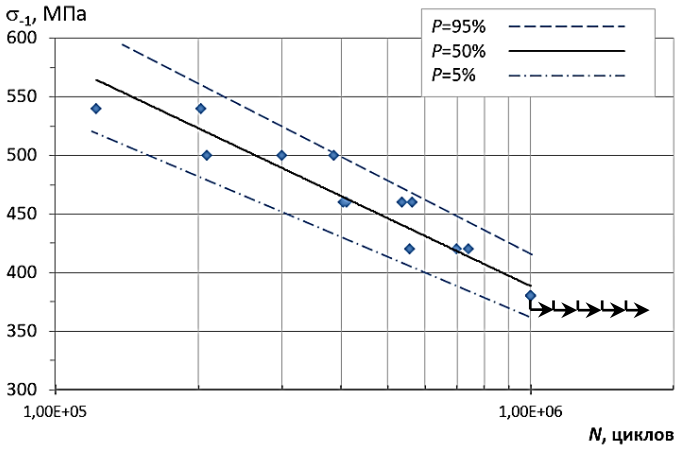


Рисунок Д.10 – График усталостного разрушения с вероятностью *P* = 5; 50; 95%

Лопатки РКНД 2 ст. из сплава ВТ6 в исходном состоянии,
термообработка + полирование войлочными кругами

Таблица Д.11 – Результаты испытаний

Напряжение σ_{-1}, МПа	Частота *f*, Гц	Число наработки *N*, циклов	Результат испытания
520	605	$3{,}5\cdot10^6$	сломался
520	593	$1{,}8\cdot10^6$	сломался
480	608	$2{,}5\cdot10^6$	сломался
480	611	$5{,}8\cdot10^6$	сломался
480	593	$7{,}5\cdot10^6$	сломался
440	605	$9{,}3\cdot10^6$	сломался
440	615	$7{,}6\cdot10^6$	сломался
440	591	$3{,}8\cdot10^6$	сломался
400	594	$2{,}0\cdot10^7$	**не сломался**
400	609	$1{,}8\cdot10^7$	сломался
400	616	$2{,}0\cdot10^7$	**не сломался**
400	619	$2{,}0\cdot10^7$	**не сломался**
400	607	$2{,}0\cdot10^7$	**не сломался**

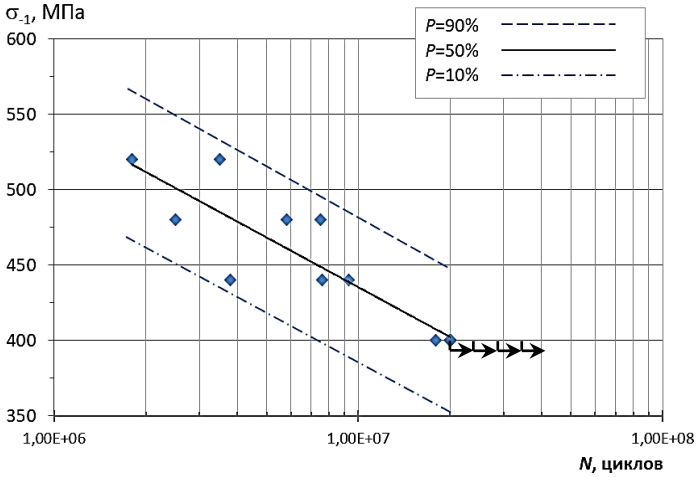


Рисунок Д.11 – График усталостного разрушения с вероятностью *P* = 10; 50; 90%

Лопатки РКНД 2 ст. из сплава ВТ6 с упрочнением, ионная имплантация азота, доза D=2·10^{17} ион/см^2

Таблица Д.12 – Результаты испытаний

Напряжение σ_{-1}, МПа	Частота f, Гц	Число наработки N, циклов	Результат испытания
600	597	2,1·10^6	сломался
600	603	4,2·10^6	сломался
560	593	4,2·10^6	сломался
560	601	5,2·10^6	сломался
560	612	6,7·10^6	сломался
520	612	7,1·10^6	сломался
520	597	1,4·10^7	сломался
520	580	9,1·10^6	сломался
520	602	1,2·10^7	сломался
480	598	2,0·10^7	**не сломался**
480	592	2,0·10^7	**не сломался**
480	599	2,0·10^7	**не сломался**
480	591	2,0·10^7	**не сломался**

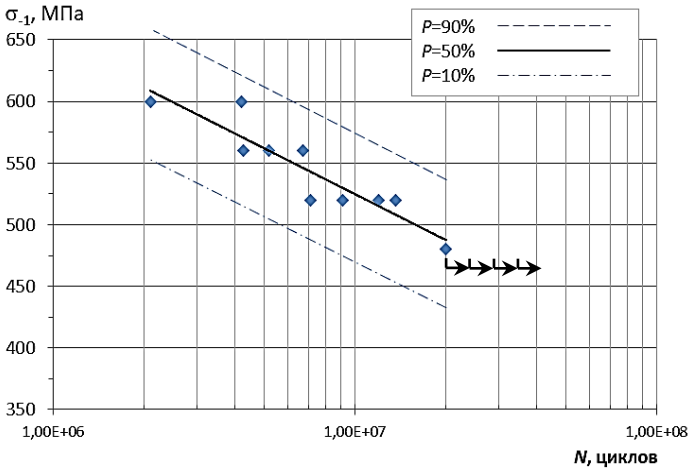


Рисунок Д.12 – График усталостного разрушения с вероятностью P = 10; 50; 90%

Лопатки РКНД 2 ст. из сплава ВТ6 с упрочнением, ионная имплантация азота + покрытие (0,3Ti+2,5TiN)x5

Таблица Д.13 – Результаты испытаний

Напряжение σ_{-1}, МПа	Частота f, Гц	Число наработки N, циклов	Результат испытания
560	596	1,2·10^6	сломался
560	592	2,8·10^6	сломался
560	602	2,4·10^6	сломался
520	592	6,2·10^6	сломался
520	591	6,7·10^6	сломался
520	590	8,0·10^6	сломался
480	580	7,5·10^6	сломался
480	589	9,1·10^6	сломался
480	592	1,2·10^7	сломался
440	613	2,0·10^7	**не сломался**
440	619	2,0·10^7	**не сломался**
440	580	2,0·10^7	**не сломался**
440	602	2,0·10^7	**не сломался**

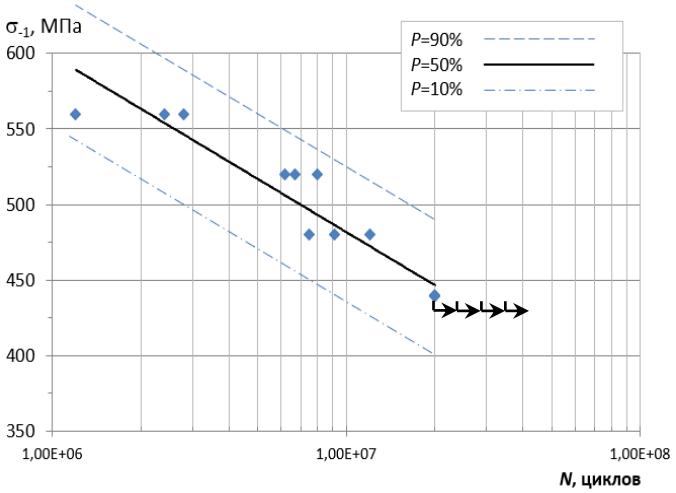


Рисунок Д.13 – График усталостного разрушения с вероятностью P = 10; 50; 90%

Приложение Е
(Обязательное)

Экспериментальные результаты инструментального индентирования

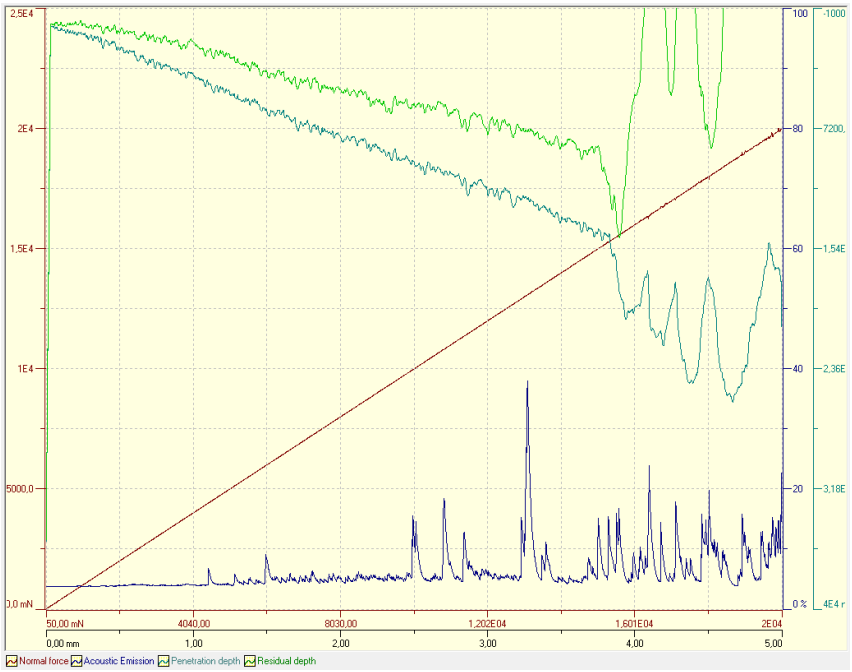


Рисунок Е.1 – Протокол измерений образца из ВТ6 с покрытием №1:
((V,Ti) + (V,Ti)N) x18, h = 11,4±1,5 мкм

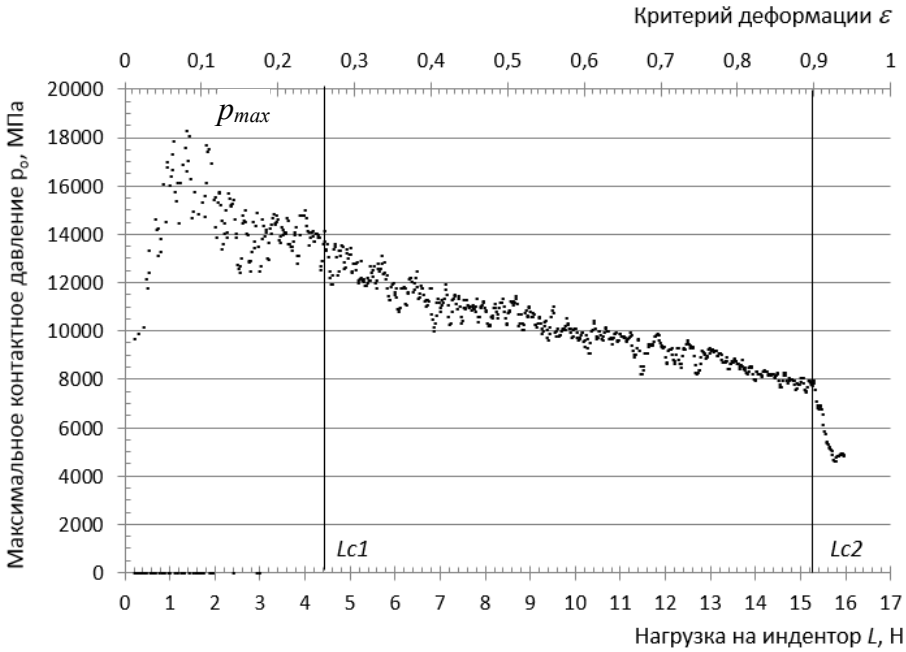


Рисунок Е.2 – Механическая кривая образца из ВТ6 с покрытием №1:
((V,Ti) + (V,Ti)N) x18, h = 11,4±1,5 мкм

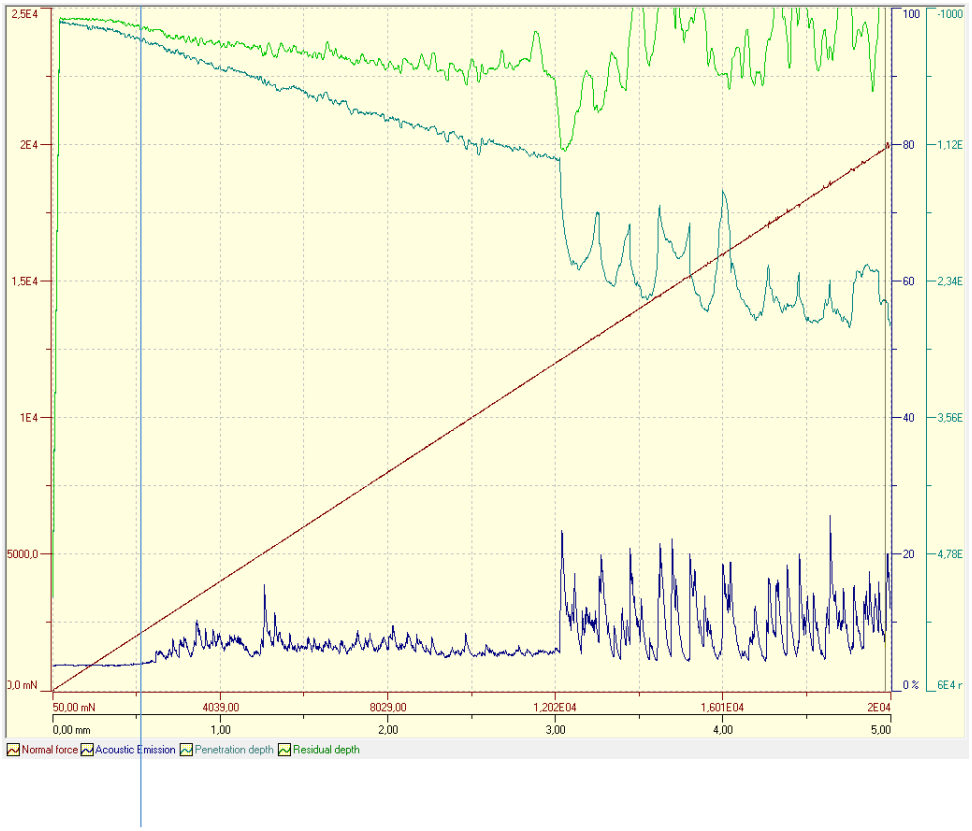


Рисунок Е.3 – Протокол измерений образца из ВТ6 с покрытием №2:
((V,Ti) + (V,Ti)N) x5, h = 16,1±1,0 мкм

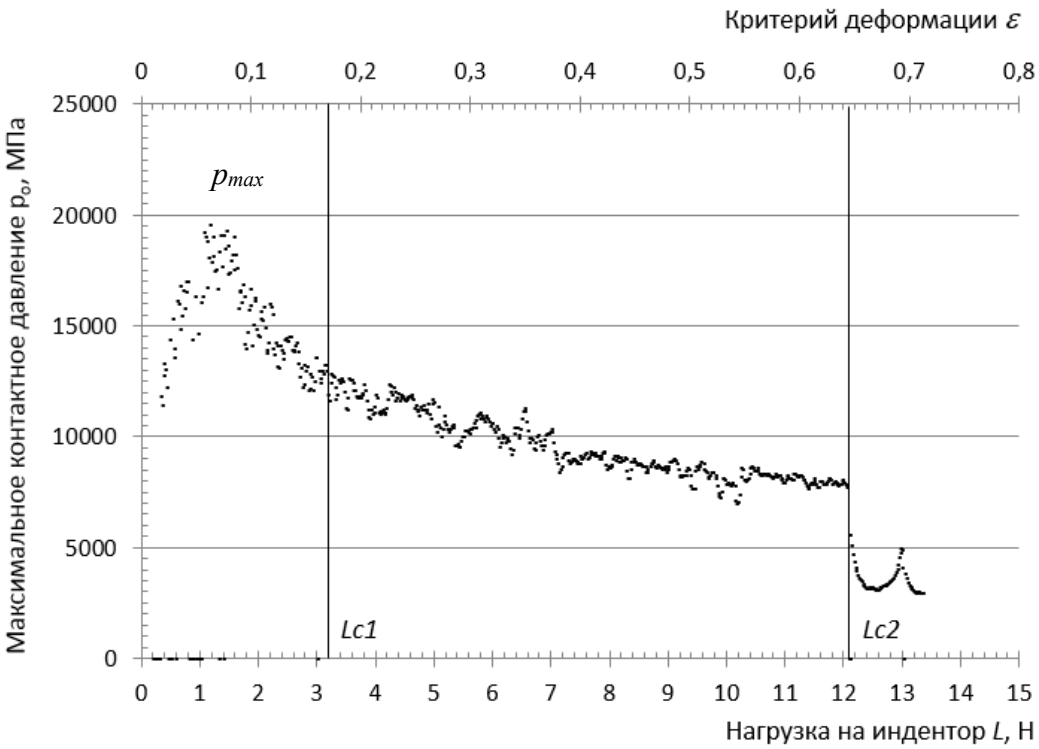


Рисунок Е.4 – Механическая кривая образца из ВТ6 с покрытием №2:
((V,Ti) + (V,Ti)N) x5, h = 16,1±1,0 мкм

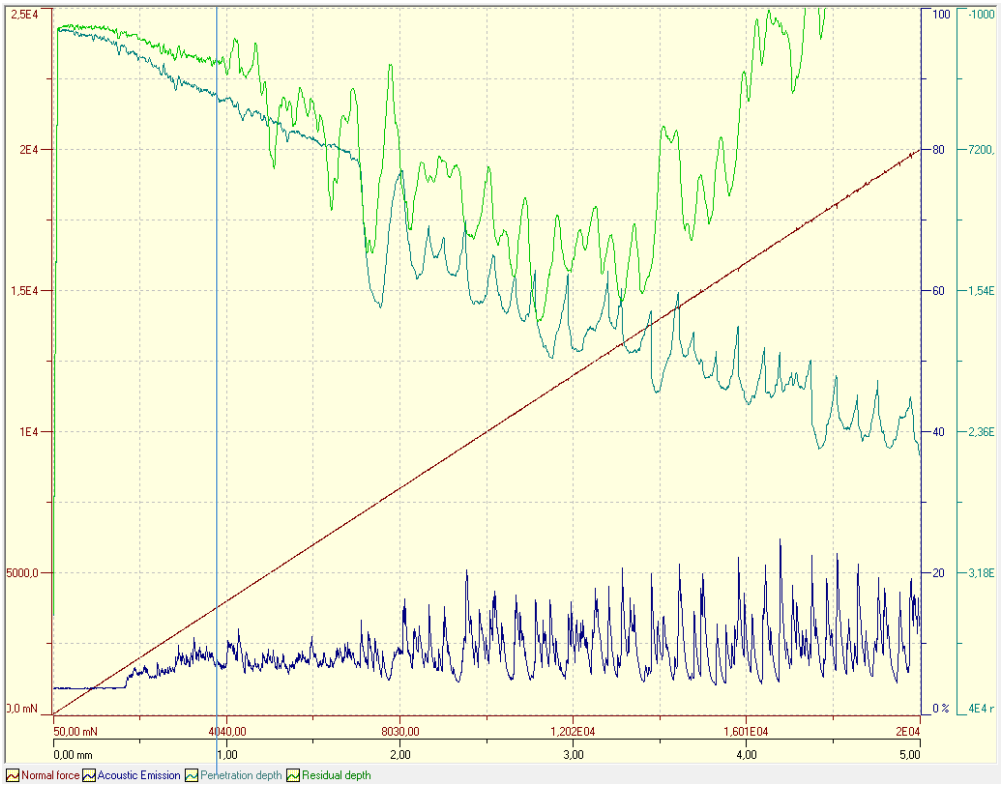


Рисунок Е.5 – Протокол измерений образца из ВТ6 с покрытием №4: ((V,Ti) +(V,Ti)N) x2, h = 10,7±1,5 мкм

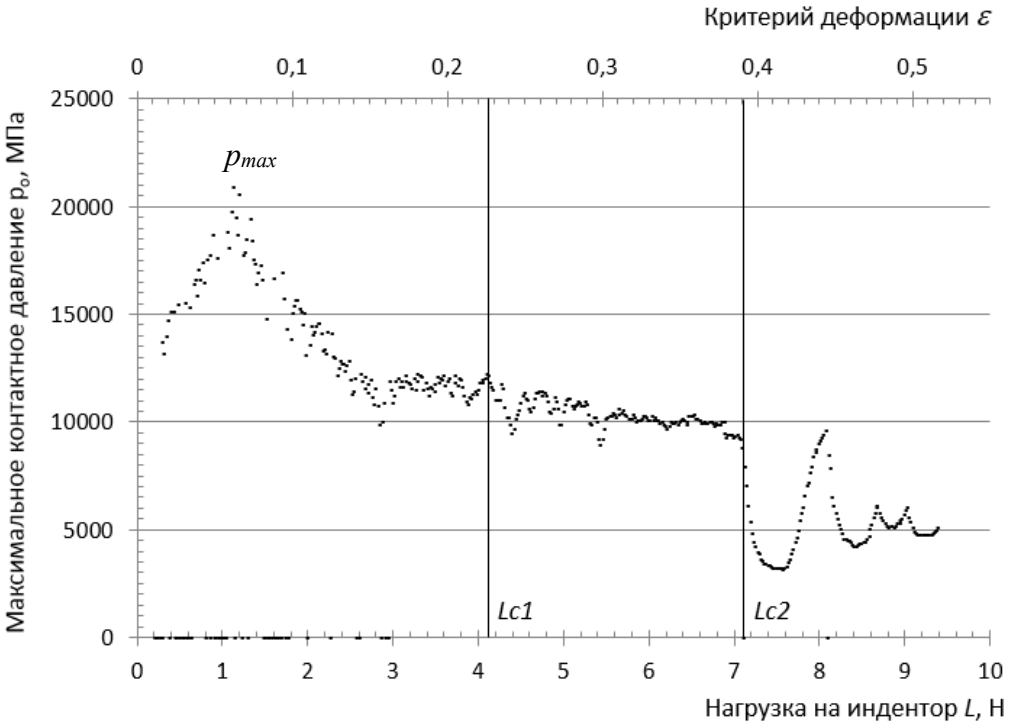


Рисунок Е.6 – Механическая кривая образца из ВТ6 с покрытием №4: ((V,Ti) +(V,Ti)N) x2, h = 10,7±1,5 мкм

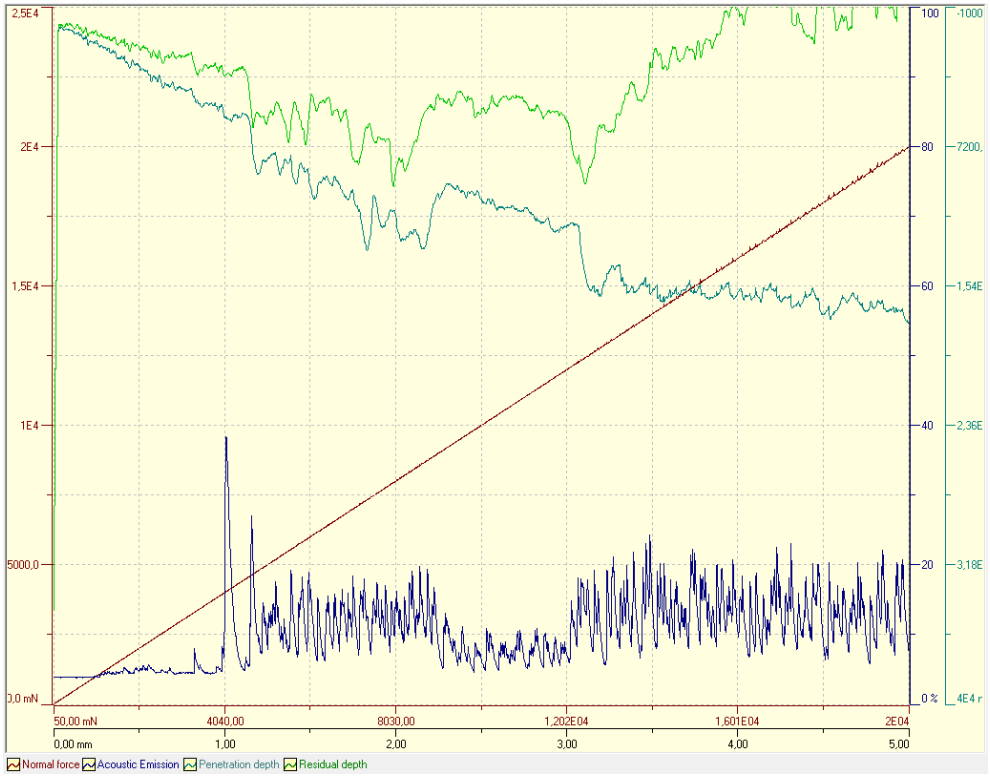


Рисунок Е.7 – Протокол измерений образца из ВТ6 с покрытием №5: ((V,Ti) + (V,Ti)N) x2, h = 6,8±1,5 мкм

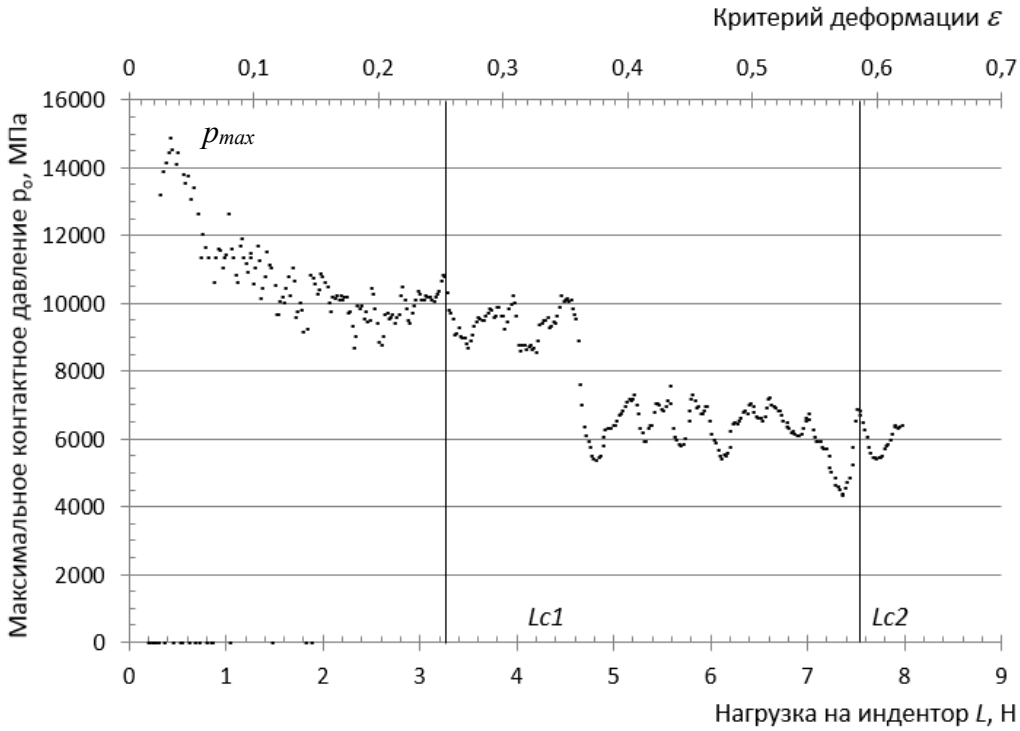


Рисунок Е.8 – Механическая кривая образца из ВТ6 с покрытием №5: ((V,Ti) + (V,Ti)N) x2, h = 6,8±1,5 мкм

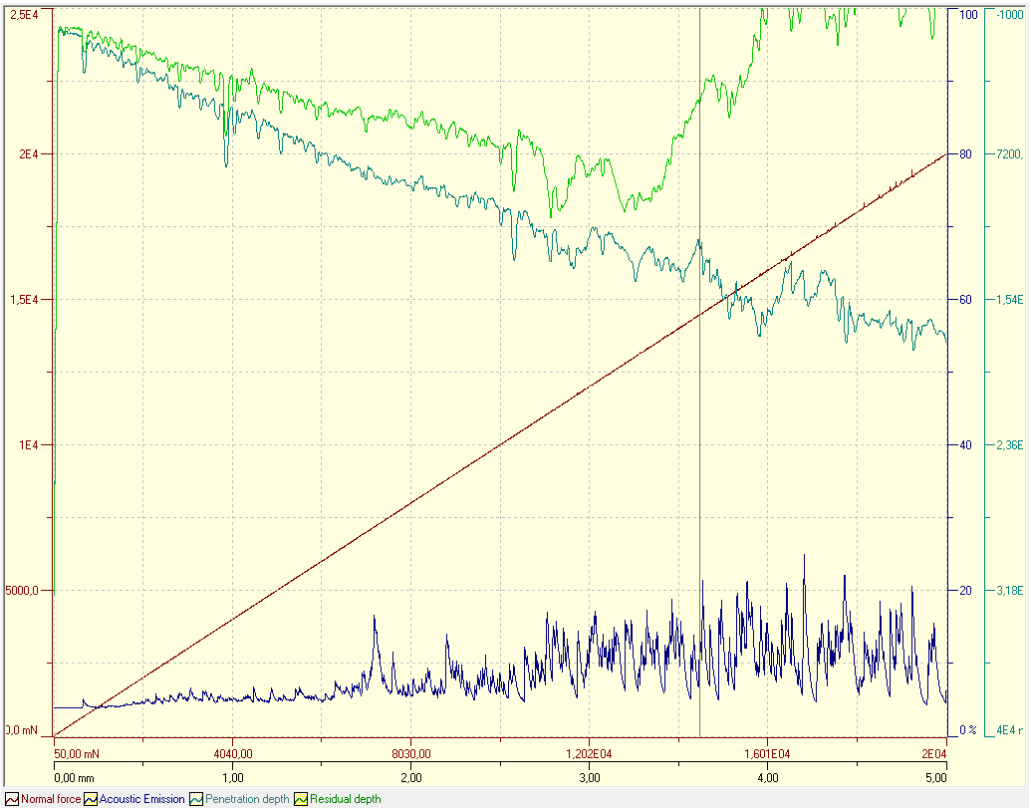


Рисунок Е.9 – Протокол измерений образца из ВТ6 с покрытием №6: ((V,Ti) + (V,Ti)N) x2, h = 6,2±1,0 мкм

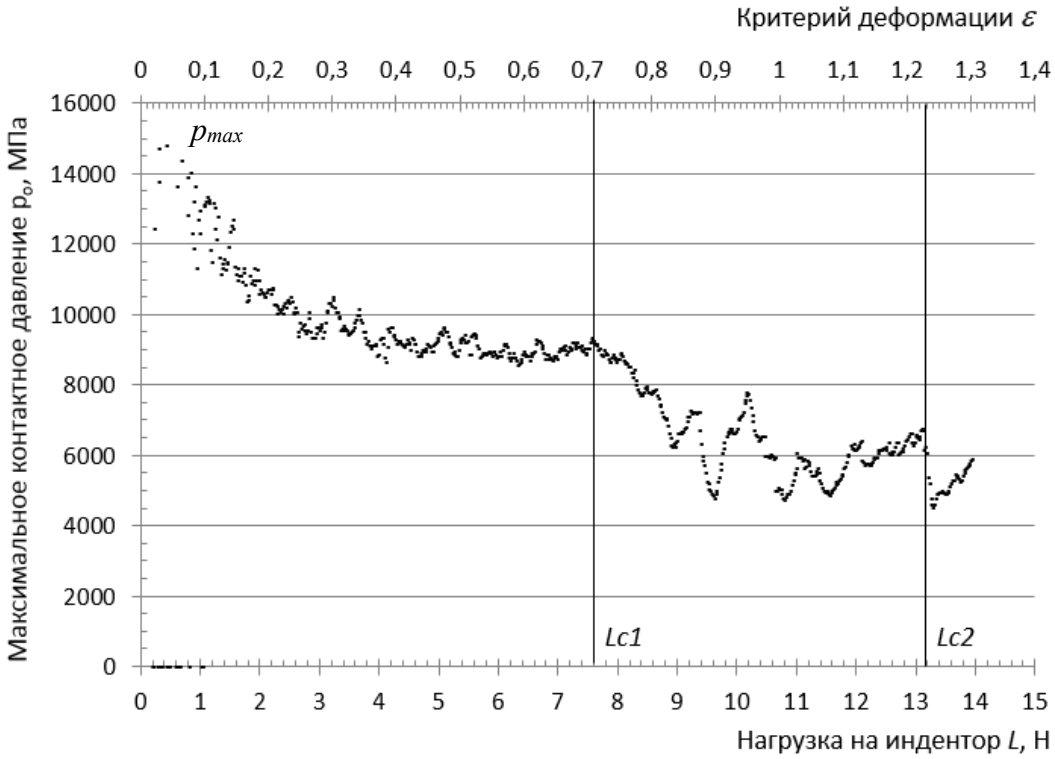


Рисунок Е.10 – Механическая кривая образца из ВТ6 с покрытием №6: ((V,Ti) + (V,Ti)N) x2, h = 6,2±1,0 мкм

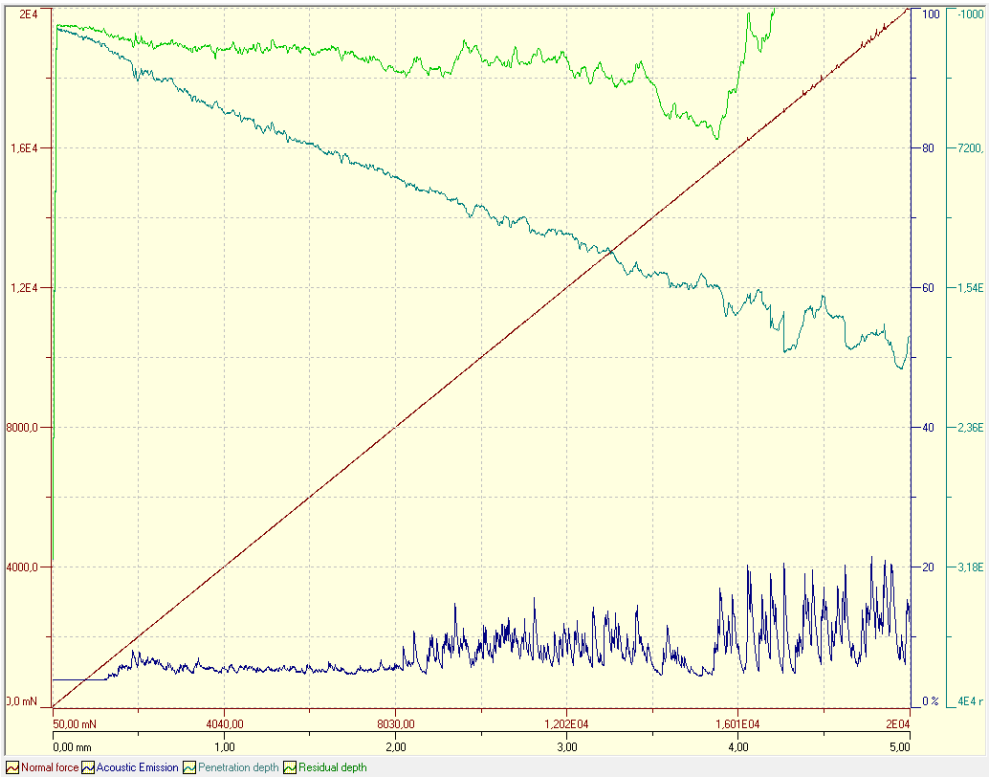


Рисунок Е.11 – Протокол измерений образца из ВТ6 с покрытием №7: ((V,Ti) + (V,Ti)N) x2, h = 6,4±1,0 мкм

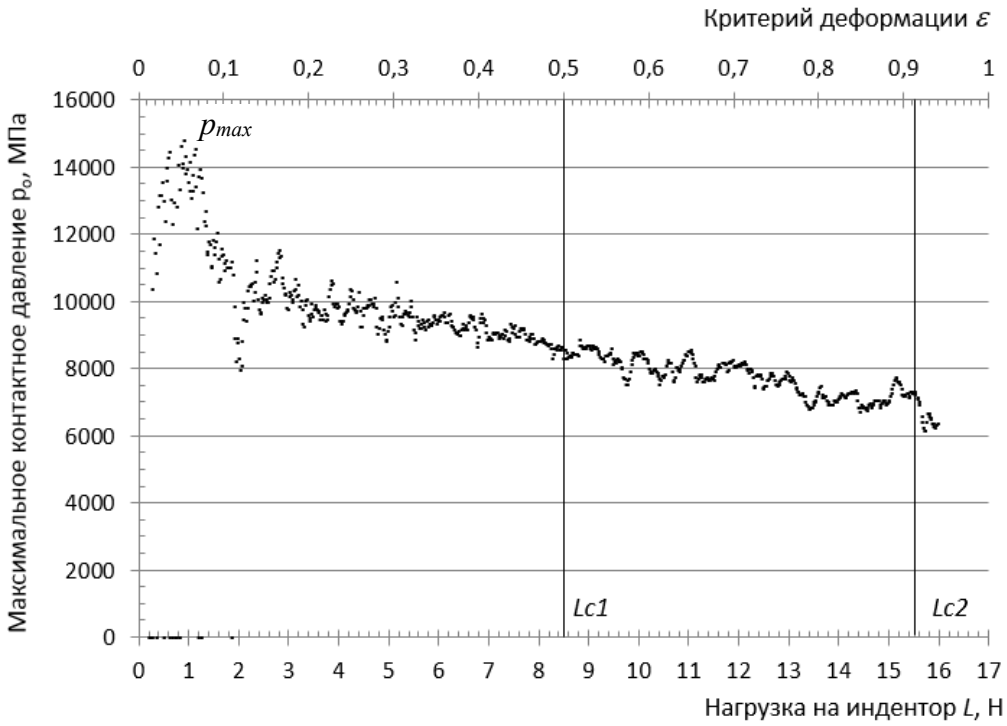


Рисунок Е.12 – Механическая кривая образца из ВТ6 с покрытием №7: ((V,Ti) + (V,Ti)N) x2, h = 6,4±1,0 мкм

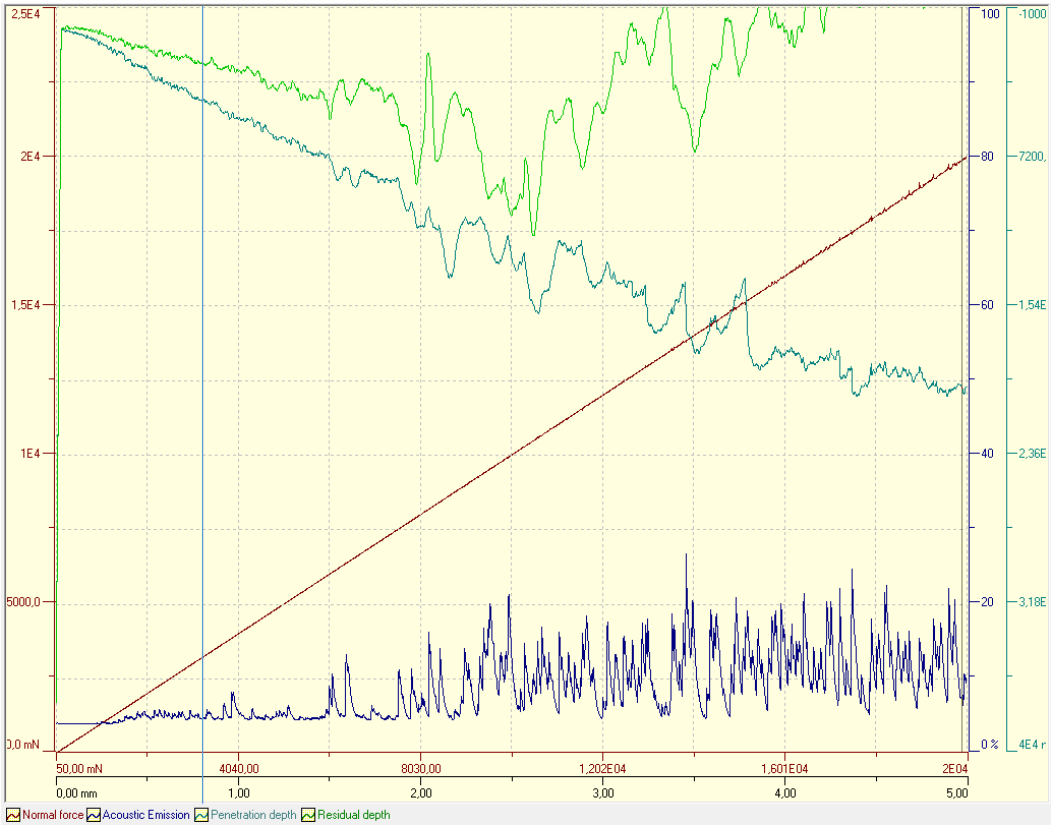


Рисунок Е.13 – Протокол измерений образца из ВТ6 с покрытием №8: ((V,Ti) + (V,Ti*)N) x2, h = 7,1±1,5 мкм

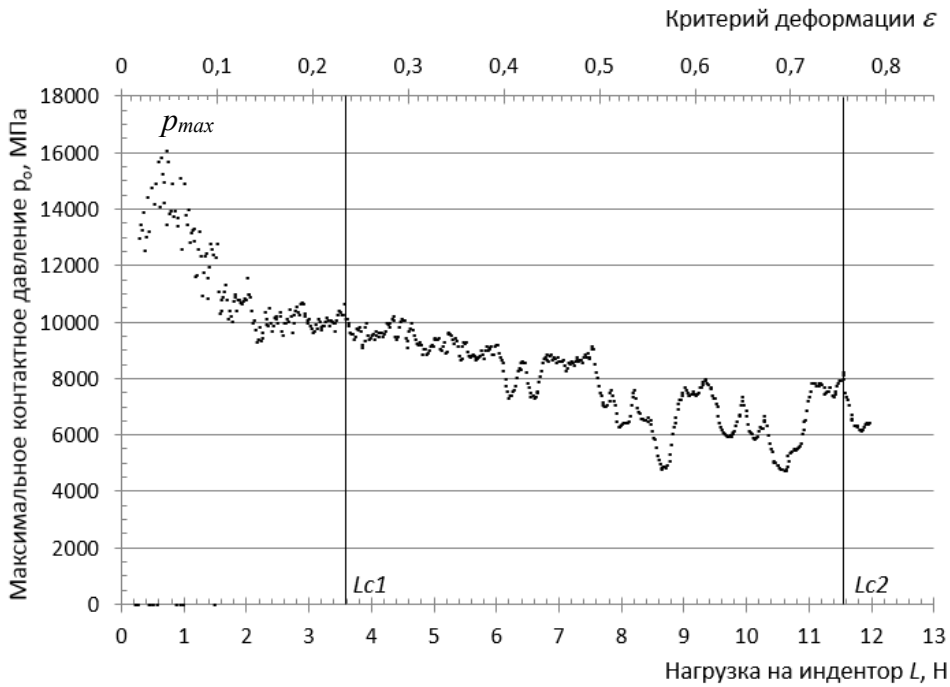


Рисунок Е.14 – Механическая кривая образца из ВТ6 с покрытием №8: ((V,Ti) + (V,Ti*)N) x2, h = 7,1±1,5 мкм

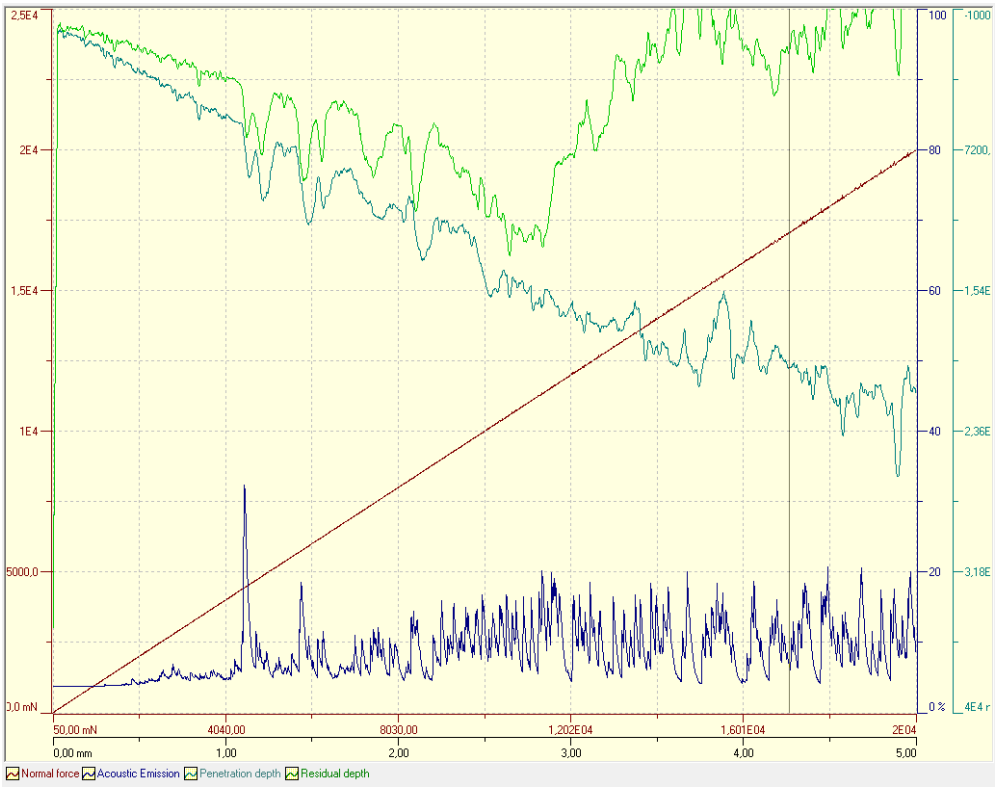


Рисунок Е.15 – Протокол измерений образца из ВТ6 с покрытием №9: ((V,Ti) + (V,Ti*)N) x2, h = 7,8±1,5 мкм

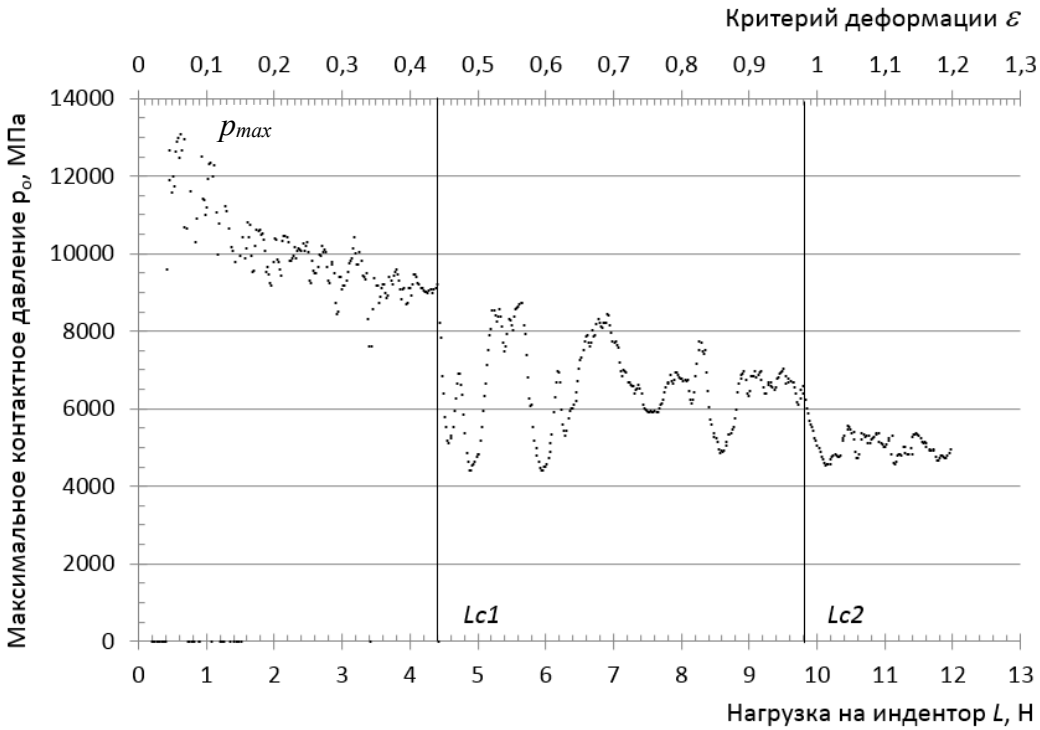


Рисунок Е.17 – Механическая кривая образца из ВТ6 с покрытием №9: ((V,Ti) + (V,Ti*)N) x2, h = 7,8±1,5 мкм

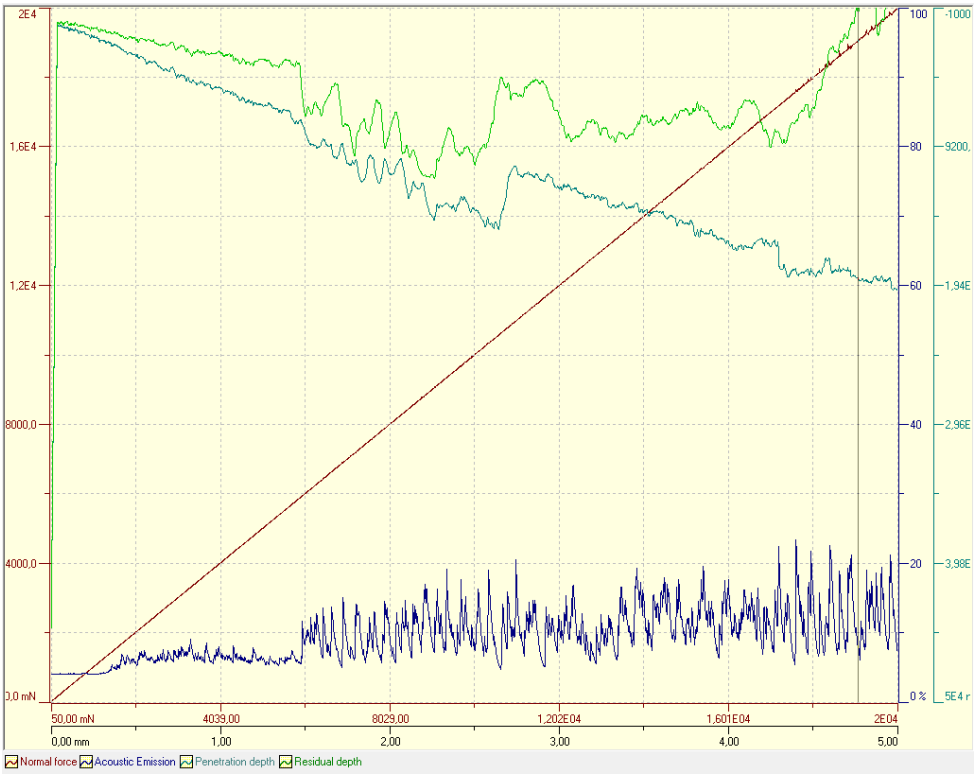


Рисунок Е.18 – Протокол измерений образца из ВТ6 с покрытием №10: ((V,Ti) + (V,Ti*)N) x2, *h* = 5,3±1,0 мкм

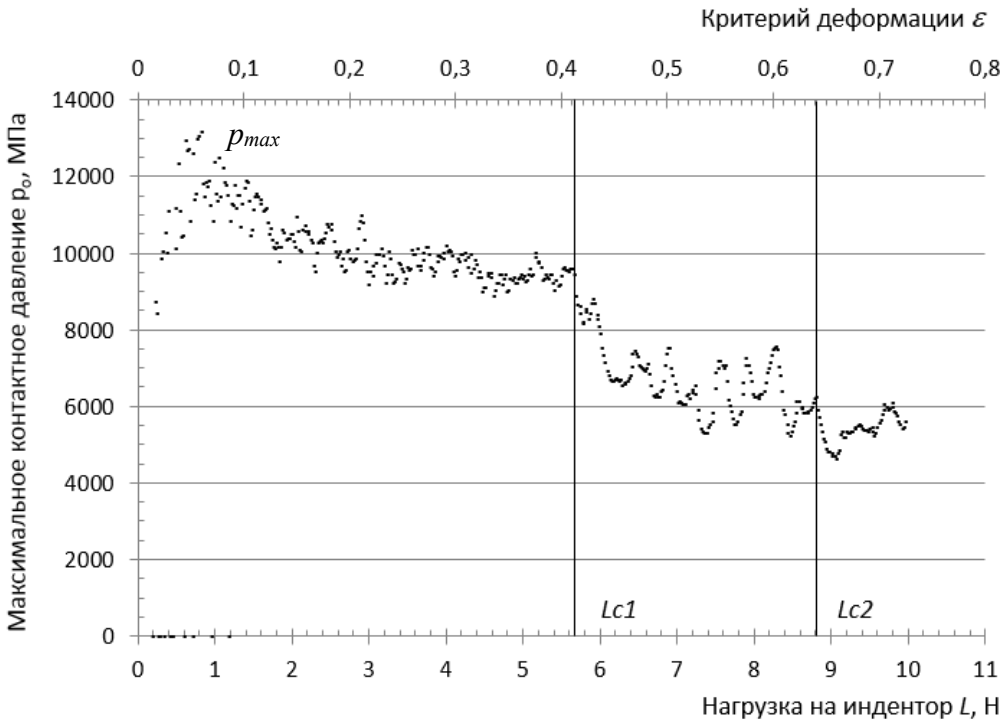


Рисунок Е.19 – Механическая кривая образца из ВТ6 с покрытием №10: ((V,Ti) + (V,Ti*)N) x2, *h* = 5,3±1,0 мкм

Рисунок Е.20 – Протокол измерений образца из ВТ6 с покрытием №1:

Ti + TiN, h = 3,1±0,5 мкм

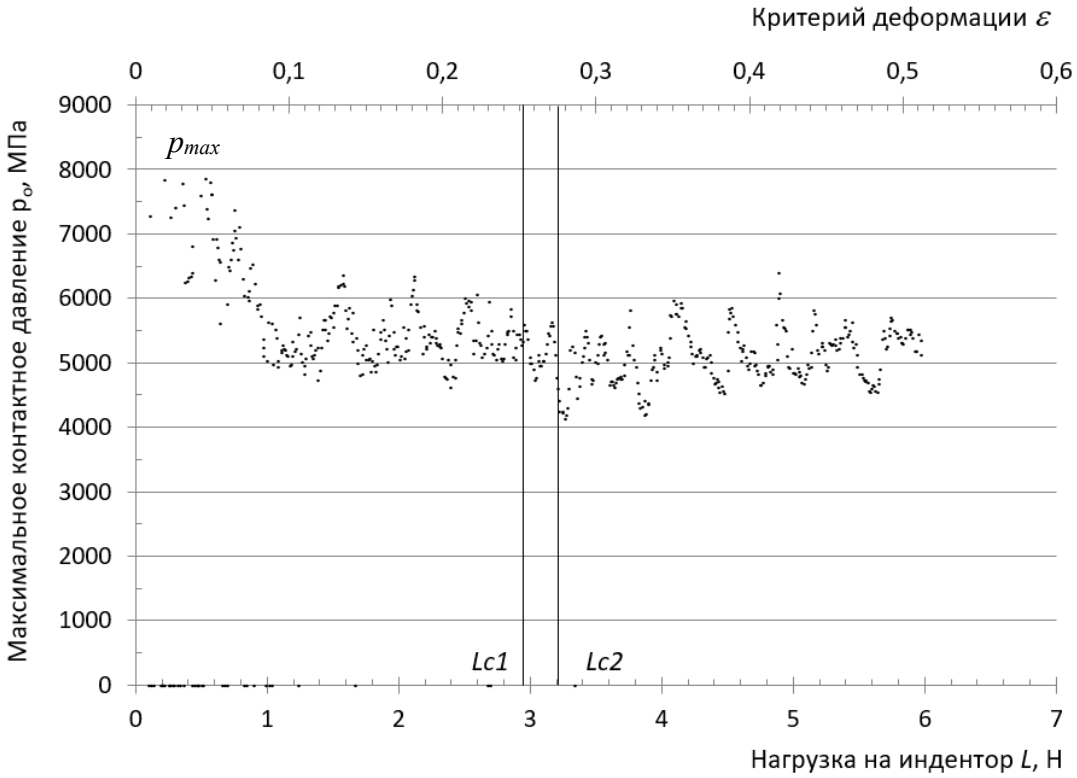


Рисунок Е.21 – Механическая кривая образца из ВТ6 с покрытием Ti + TiN, №1:

Ti + TiN, h = 3,1±0,5 мкм

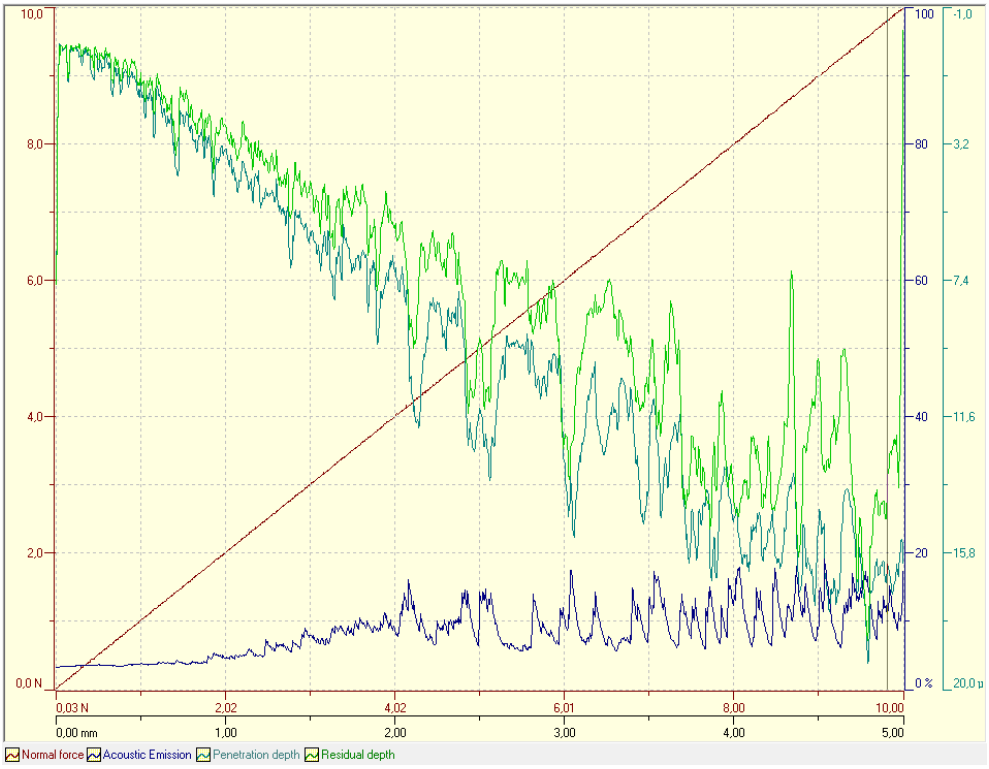


Рисунок Е.22 – Протокол измерений образца из ВТ6 с покрытием №2: Ti + TiN, h = 6,2±0,5 мкм

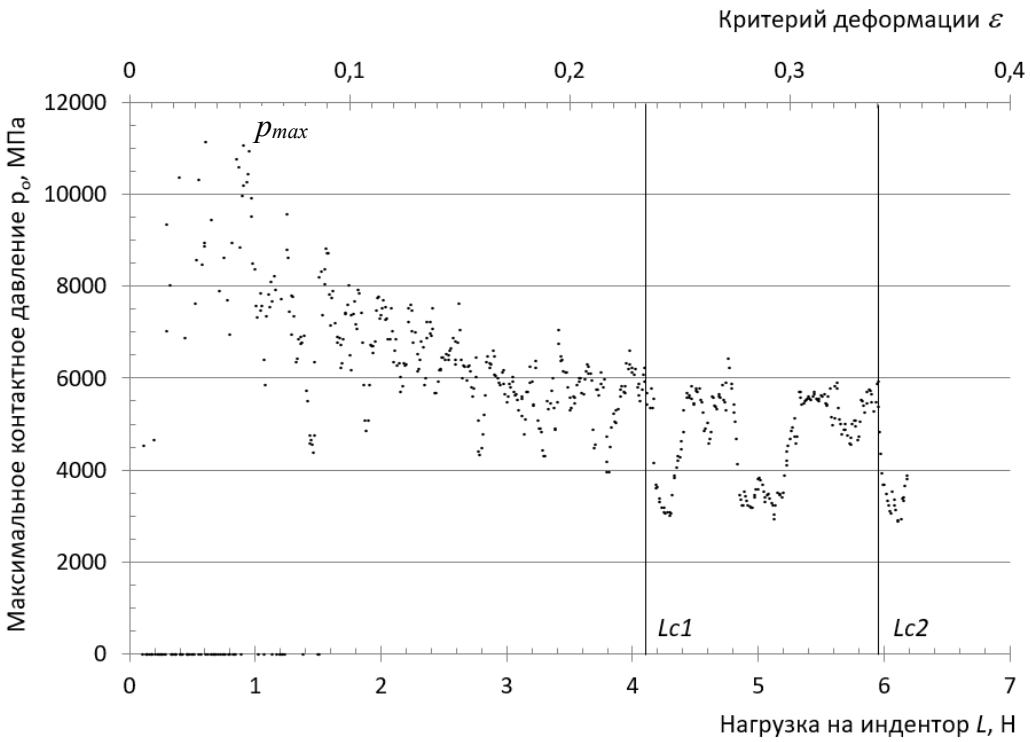


Рисунок Е.23 – Механическая кривая образца из ВТ6 с покрытием №2: Ti + TiN, h = 6,2±0,5 мкм

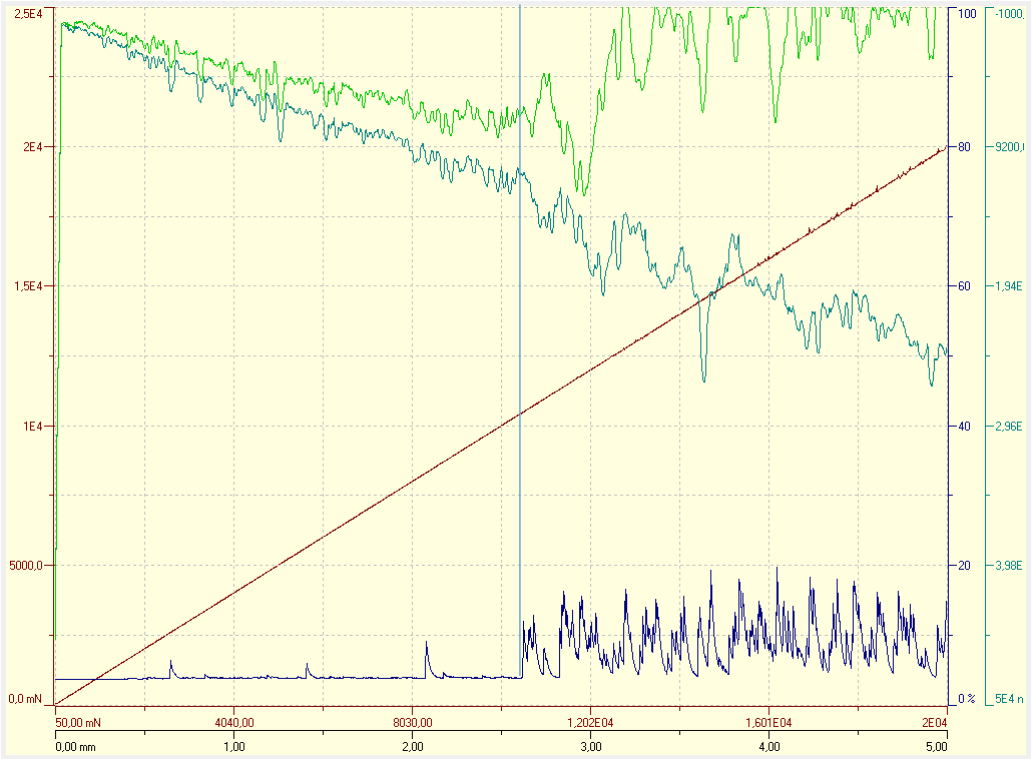


Рисунок Е.24 – Протокол измерений образца из ВТ6 с покрытием №3: (Ti + Ti*N) x2, h = 6,7±0,4 мкм

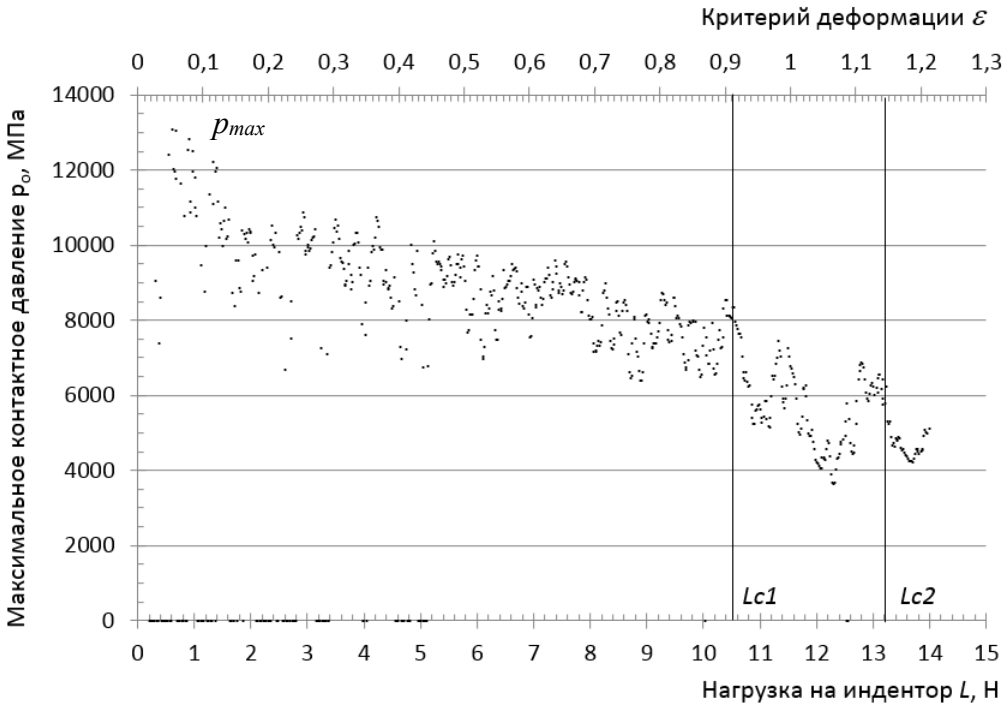


Рисунок Е.25 – Механическая кривая образца из ВТ6 с покрытием №3: (Ti + Ti*N) x2, h = 6,7±0,4 мкм

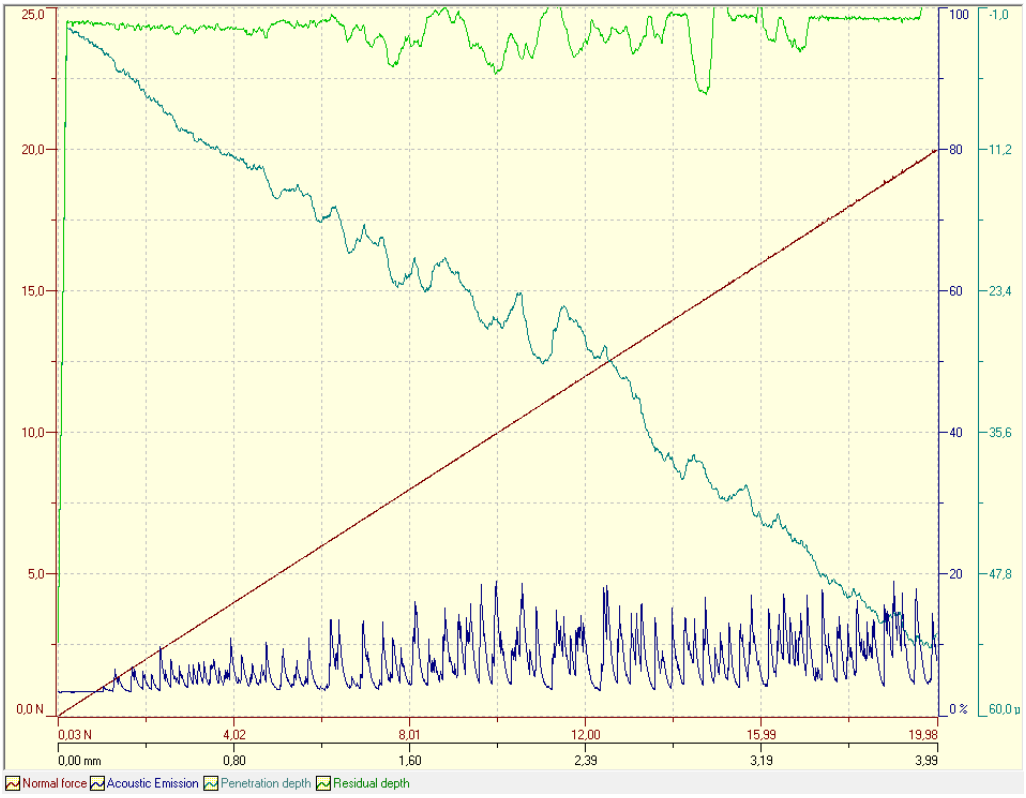


Рисунок Е.26– Протокол измерений образца из ВТ6 с покрытием №4: (Ti + TiN) x5, h = 16,0±1,7 мкм

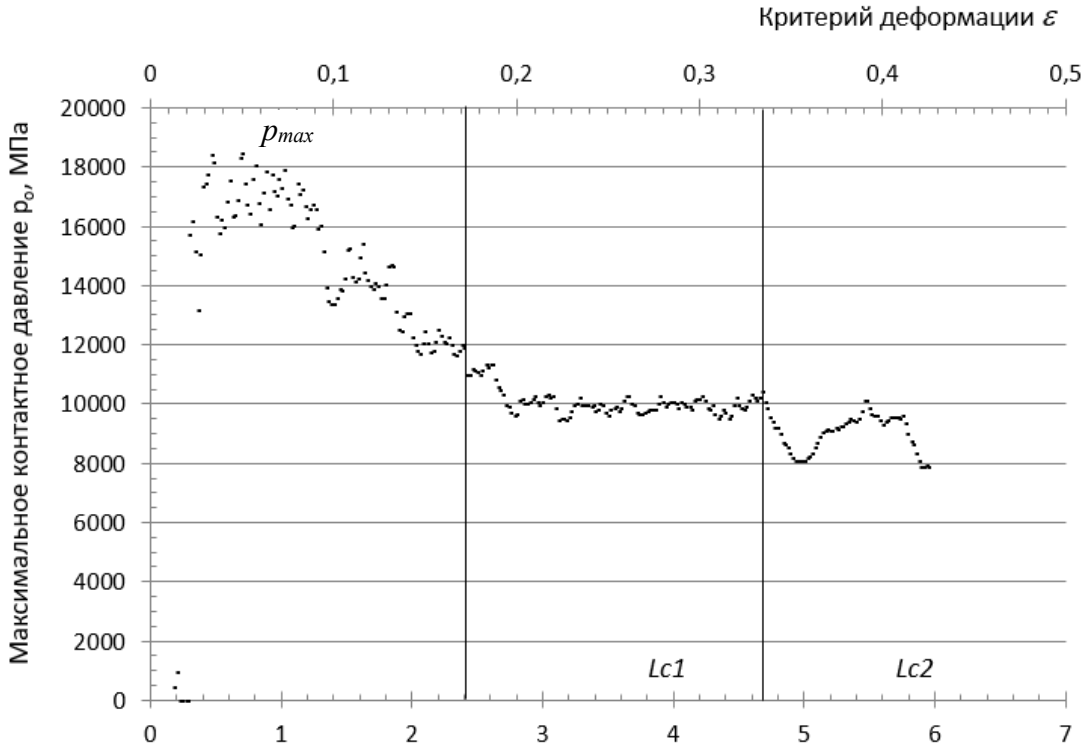


Рисунок Е.27 – Механическая кривая образца из ВТ6 с покрытием №4: (Ti + TiN) x5, h = 16,0±1,7 мкм

Приложение Ж

(Обязательное)

Нормативно-техническая документация, разработанная на основании проведенных исследований упрочнения лопаток из титановых сплавов

ООО «НПП УАСТ»

«СОГЛАСОВАНО»	«УТВЕРЖДАЮ»
Главный конструктор паровых турбин филиала ОАО «Силовые машины» «ЛМЗ» в Санкт-Петербурге _____ А.С. Лисянский «23» 10 2007 г.	Директор ООО «НПП УАСТ» _____ Г.В. Годовская 10 2007 г.

ИНСТРУКЦИЯ

1419654 И 01

УПРОЧНЕНИЕ ВХОДНЫХ, ВЫХОДНЫХ КРОМОК И КОНТАКТНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ БАНДАЖНЫХ ПОЛОК ТИТАНОВЫХ ЛОПАТОК ПЯТЫХ СТУПЕНЕЙ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ СПЛАВОВ ВТ6 И ТС5

Разработчики:	Разработчики:
Филиал ОАО «Силовые машины» «ЛМЗ» в Санкт-Петербурге	ООО «НПП УАСТ»
Начальник отдела расчетов _____ С.А. Иванов	Руководитель проекта, профессор, д.т.н. _____ А.М. Смыслов
Ведущий конструктор _____ О.Н. Симин 22.10.07г.	Технический директор, к.т.н. _____ М.К. Смыслова
Инженер-конструктор I категории _____ О.В. Ермакова	Главный специалист, к.т.н. _____ Ю.М. Дыбленко

2007

ООО «НПП УАСТ»

«СОГЛАСОВАНО»
Главный конструктор паровых турбин
филиала ОАО «Силовые машины» «ЛМЗ» в Санкт-Петербурге

_____ А.Г. Лисянский
«15» _____ 2010

«УТВЕРЖДАЮ»
Директор ООО «НПП УАСТ»

_____ Г.В. Годовская
«15» 11 2010

ИНСТРУКЦИЯ

2419654 И 01

УПРОЧНЕНИЕ ВХОДНЫХ, ВЫХОДНЫХ КРОМОК И КОНТАКТНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ БАНДАЖНЫХ ПОЛОК ТИТАНОВЫХ ЛОПАТОК ПЯТЫХ СТУПЕНЕЙ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ СПЛАВОВ ВТ6 И ТС5, НАПРАВЛЕННЫХ НА ПОВТОРНОЕ ПЕРЕПОКРЫТИЕ

Вводится впервые

Дата введения: 15.11.2010г.

Разработчики:

Филиал ОАО «Силовые машины» «ЛМЗ» в Санкт-Петербурге

Начальник отдела расчётов
_____ С.А. Иванов

Ведущий конструктор
_____ О.Н. Симин

Ведущий конструктор
_____ О.В. Ермакова

ООО «НПП УАСТ»

Руководитель проекта, профессор, д.т.н.
_____ А.М. Смыслов

Директор по качеству, к.т.н.
_____ М.К. Смыслова

Технический директор, к.т.н.
_____ К.С. Селиванов

Главный специалист, к.т.н.
_____ Ю.М. Дыбленко

2010 г.

ф.2120002

Индекс изделия

Техническое указание №29 2014-15(01)

на проведение работ в серийном производстве

Цель работ: Проверка работоспособности лопаток РКНД 1, 2 ст. изд.29, изготовленных с использованием процесса ионной имплантации и вакуумно-многослойного покрытия нитрида титана

Основание: Протокол совещания по рассмотрению случаев возникновения помпажей на КС ООО «Газпром трансгаз УФа», Программа модернизации и повышения экологичности двигателя АЛ-31СТ на период 2014-2016гг.

Содержание:

1. Цеху 44: Изготовить лопатки № 29.01.35.015, № 29.01.35.025 по согласованной технологии
2. ОГМет: Совместно с УГАТУ провести покрытие бандажных полок и пера лопаток методом ионной имплантации и вакуумно-плазменного многослойного покрытия нитрида титана, толщина покрытия $0{,}012^{+0{,}003}$ мм по отработанной ранее технологии

Гл. конструктор

3. Цеху 44: Подвергнуть лопатки контролю согласно технологии ЛЮМ 1-ОВ
4. Цеху 24: Собрать РКНД с лопатками, изготовленными по п. 2.3. Изделие направить в цех 6б.
5. Цеху 6б: Собрать изделие текущего производства с РКНД по п.4 и направить по технологическому циклу с *последующим

Вед. конструктор

6. УТЭ: Проводить контроль отсутствия зазора по бандажным полкам лопаток 1 и 2 ст. по ТУ 134-04-05 при эксплуатации изделия. Контроль проводить при остановках изделия плановых и внеплановых
7. При возвращении изделия в ремонт:
   а) ОГК, УТК, ОГМет провести оценку состояния лопаток, оформить акт
   б) ОГМет провести металлургические исследования лопаток, оформить отчет с рекомендациями по внедрению в серийное производство
8. ПЭО открыть заказ на выполнение работ

Начальник КБ

Количество 1 м/к + по 5 шт.1 и 2 ст. **Усл. Клеймо** отметка в паспорте ротора КНД и деле изделия

Срок начала: **и окончания работ**

Подпись автора

Поручено проследить Измайловой **Тел.**

Гл. технолог:	**Технический директор:**
Начальник ППО:	**Зам. гл. конструктора:**
Гл. металлург:	**Рук. программ** АЛ-31СТ:
Зам. ГДО по качеству:	**Начальник 11 ВП:**

Согласовано: УГАТУ

Общество с ограниченной ответственностью
«Научно-производственное предприятие Уралавиаспецтехнология»

УДК 620.179.119
Инв. № 203

УТВЕРЖДАЮ

Директор ООО «НПП УАСТ»

_____Гонтюрев В.А.

«___» _____ 2022 г.

«КОНТРОЛЬ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И АДГЕЗИОННОЙ ПРОЧНОСТИ ТВЕРДЫХ ПОКРЫТИЙ ПРИ ИХ ИНДЕНТИРОВАНИИ АЛМАЗНЫМИ НАКОНЕЧНИКАМИ»

Методика и порядок проведения

Р УАСТ-024-001-00

Вводится впервые

Технический директор

_____ / Селиванов К.С. /

«21» 03 2022 г.

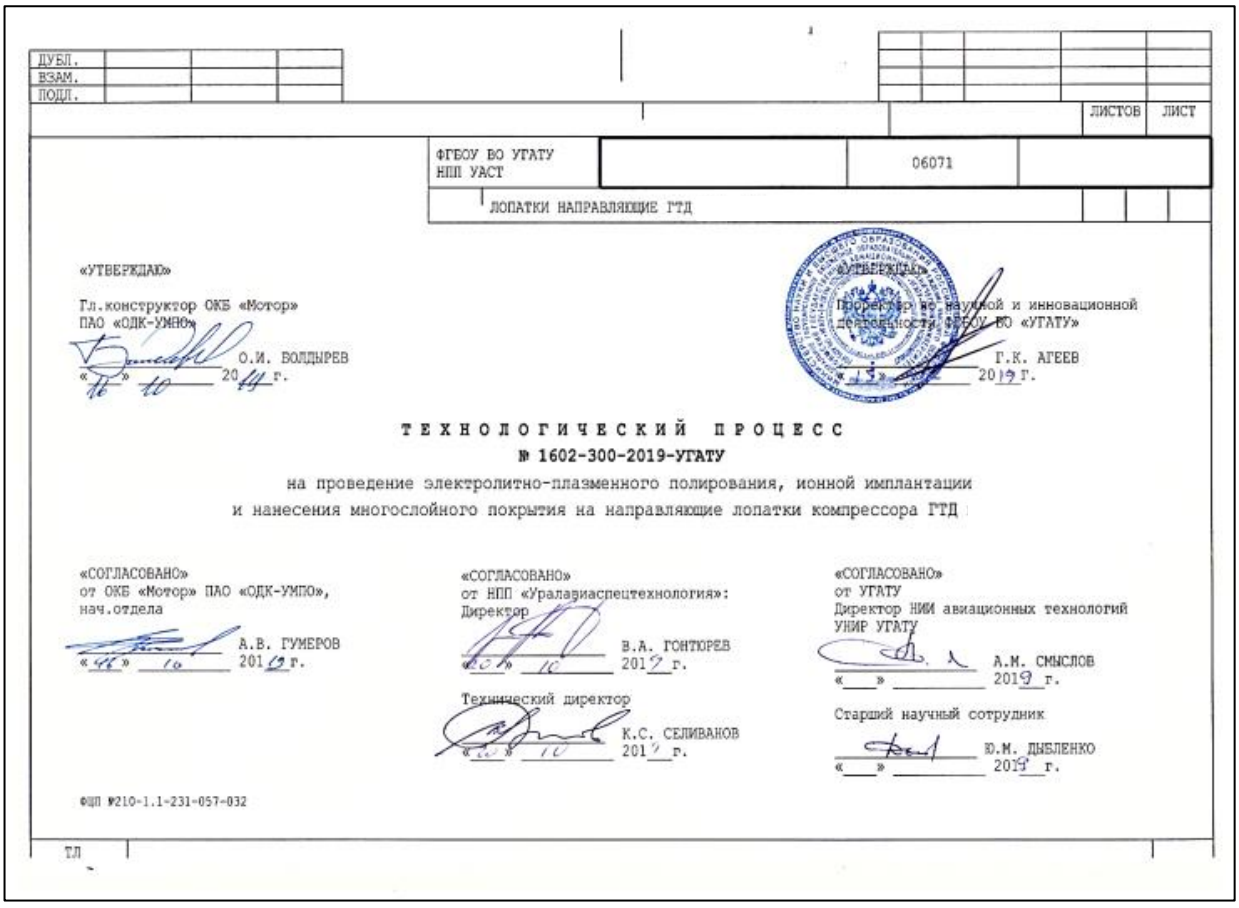
СОГЛАСОВАНО

Начальник ОТК

_____ / Колесников К.Ю. /

«21» 03 2022 г.

Уфа – 2022



ДУБЛ. | ВЗАМ. | ПОДЛ.

ЛИСТОВ | ЛИСТ

ФГБОУ ВО УГАТУ НПП УАСТ | 06071

ЛОПАТКИ НАПРАВЛЯЮЩИЕ ГТД

«УТВЕРЖДАЮ»
Гл.конструктор ОКБ «Мотор»
ПАО «ОДК-УМПО»
О.И. БОЛДЫРЕВ
«16» 10 2019 г.

«УТВЕРЖДАЮ»
Проректор по научной и инновационной деятельности ФГБОУ ВО «УГАТУ»
Г.К. АГЕЕВ
«15» 2019 г.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС
№ 1602-300-2019-УГАТУ
на проведение электролитно-плазменного полирования, ионной имплантации и нанесения многослойного покрытия на направляющие лопатки компрессора ГТД

«СОГЛАСОВАНО»
от ОКБ «Мотор» ПАО «ОДК-УМПО»,
нач.отдела
А.В. ГУМЕРОВ
«16» 10 2019 г.

«СОГЛАСОВАНО»
от НПП «Уралавиаспецтехнология»:
Директор
В.А. ГОНТЮРЕВ
«16» 10 2019 г.

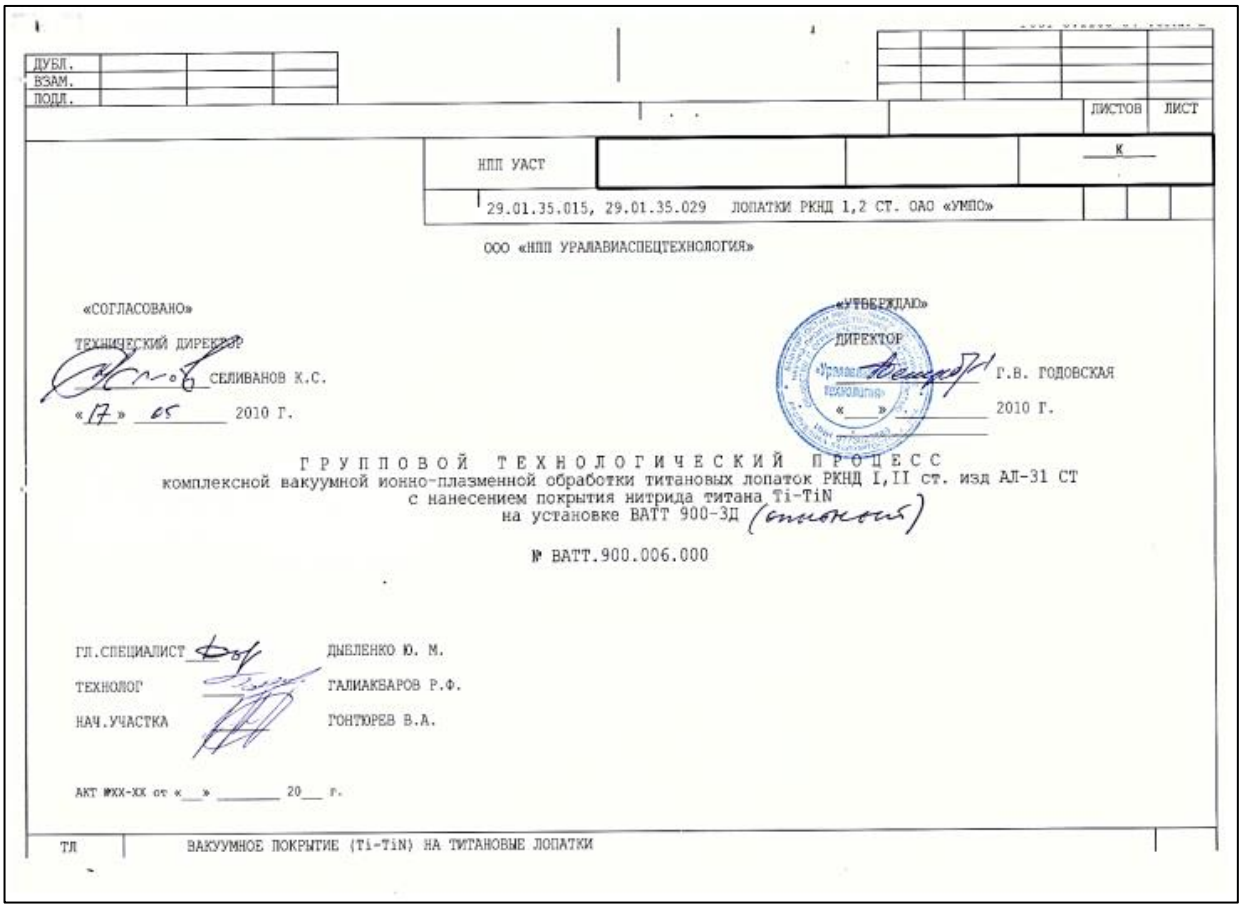
Технический директор
К.С. СЕЛИВАНОВ
«16» 10 2019 г.

«СОГЛАСОВАНО»
от УГАТУ
Директор НИИ авиационных технологий УНИР УГАТУ
А.М. СМЫСЛОВ
«___» _____ 2019 г.

Старший научный сотрудник
Ю.М. ДЫБЛЕНКО
«___» _____ 2019 г.

ФЦП №210-1.1-231-057-032

ТЛ



ДУБЛ. | ВЗАМ. | ПОДЛ.

ЛИСТОВ | ЛИСТ

НПП УАСТ | К

29.01.35.015, 29.01.35.029 ЛОПАТКИ РКНД 1,2 СТ. ОАО «УМПО»

ООО «НПП УРАЛАВИАСПЕЦТЕХНОЛОГИЯ»

«СОГЛАСОВАНО»
ТЕХНИЧЕСКИЙ ДИРЕКТОР
СЕЛИВАНОВ К.С.
«17» 05 2010 Г.

«УТВЕРЖДАЮ»
ДИРЕКТОР
Г.В. ГОДОВСКАЯ
«___» _____ 2010 Г.

ГРУППОВОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС
комплексной вакуумной ионно-плазменной обработки титановых лопаток РКНД I,II ст. изд АЛ-31 СТ
с нанесением покрытия нитрида титана Ti-TiN
на установке ВАТТ 900-3Д (отменен)

№ ВАТТ.900.006.000

ГЛ.СПЕЦИАЛИСТ ДЫБЛЕНКО Ю. М.
ТЕХНОЛОГ ГАЛИАКБАРОВ Р.Ф.
НАЧ.УЧАСТКА ГОНТЮРЕВ В.А.

АКТ №ХХ-ХХ от «___» _____ 20___ г.

ТЛ | ВАКУУМНОЕ ПОКРЫТИЕ (Ti-TiN) НА ТИТАНОВЫЕ ЛОПАТКИ

Утверждаю:
Директор
ООО «НПП
«Уралавиаспецтехнология»
_____ Смыслов А.А.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС
КОМПЛЕКСНОЙ ВАКУУМНОЙ ИОННО – ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ
ШЛИЦЕВ ЦАПФЫ БАРАБАНА
С НАНЕСЕНИЕМ ПОКРЫТИЯ НИТРИДА ТИТАНА Ti – TiN
НА УСТАНОВКЕ ВАТТ 900 – 3Д

№ ВАТТ 900.007.000-2016

Зам. директора _____ Гонтюрев В.А.

Технический директор _____ Селиванов К.С.

Нач.участка _____ Бегликчеев П. В.

ЛУБЛ.
ВЗАМ.
ПОДЛ.

ЛИСТОВ | ЛИСТ

НПП УАСТ | К

ЛОПАТКИ ТИТАНОВЫЕ К-1000 ОАО «СМ-ЛМЗ»

ООО «НПП УРАЛАВИАСПЕЦТЕХНОЛОГИЯ»

«СОГЛАСОВАНО»
ТЕХНИЧЕСКИЙ ДИРЕКТОР
_____ СЕЛИВАНОВ К.С.
«15» 11 2010 Г.

«УТВЕРЖДАЮ»
ДИРЕКТОР
_____ Г.В. ГОДОВСКАЯ
«___» _____ 2011 Г.

Т Е Х Н О Л О Г И Ч Е С К И Й П Р О Ц Е С С
«ОБРАБОТКА И НАНЕСЕНИЕ ЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ
НА ЛОПАТКИ ПАРОВЫХ ТУРБИН (К-1000) ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ»
(ПОВТОРНОЕ НАНЕСЕНИЕ ПОКРЫТИЯ)
№ 203-01-04 ТП

НАЧАЛЬНИК ПРОИЗВОДСТВА _____ ТАМИНДАРОВ Д. Р.
ТЕХНОЛОГ _____ РАШИКБАРОВ Р.Ф.

АКТ РХХ-ХХ от «__» _____ 20__ г. | доп. № от «__» _____ 20__ г.

ТП | ВАКУУМНОЕ ПОКРЫТИЕ (Ti-TiN) НА ТИТАНОВЫЕ ЛОПАТКИ по ТИ 2419654 К 01

Дубл. | Взам. | Подп. | Изм. | Лис. | № докум. | Подпись | Дата

ООО «НПП УАСТ» | ТП № УАСТ 1-002/1-19

Лопатки титановые ЦНД

ООО «НПП УРАЛАВИАСПЕЦТЕХНОЛОГИЯ»

«УТВЕРЖДАЮ»
Технический директор
_____ СЕЛИВАНОВ К.С.
«__» _____ 20__ г.

«УТВЕРЖДАЮ»
Директор
_____ ГОНТЮРЕВ В.А.
«__» _____ 20__ г.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС
№ УАСТ 1-002/1-19

на упрочнение (модификация ионами азота) контактных поверхностей бандажных полок титановых лопаток последних ступеней ЦНД

«СОГЛАСОВАНО»

Главный специалист по ВПТВЭ
_____ ДЫБЛЕНКО Ю.М.
«__» _____ 20__ г.

Заместитель директора – начальник производства
_____ БЕГЛИКЧЕЕВ П.В.
«__» _____ 20__ г.

Инструкция 14.19654 (редакция 2)

ДУБЛ. | ВЗАМ. | ПОДЛ. | ЛИСТОВ | ЛИСТ

ООО «НПП «УАСТ» | К

ЛОПАТКИ ТИТАНОВЫЕ ПОСЛЕДНИХ СТУПЕНЕЙ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

ООО «НПП УРАЛАВИАСПЕЦТЕХНОЛОГИЯ»

«СОГЛАСОВАНО»

ТЕХНИЧЕСКИЙ ДИРЕКТОР
_____ СЕЛИВАНОВ К.С.
«___» _____ 2016 Г.

«УТВЕРЖДАЮ»
ДИРЕКТОР
_____ С. А. СМЫСЛОВ
«___» _____ 2016 Г.

ГРУППОВОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС
УПРОЧНЕНИЕ КОНТАКТНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ БАНДАЖНЫХ ПОЛОК ТИТАНОВЫХ ЛОПАТОК ИЗ СПЛАВОВ ВТ6, ТС5 ПОСЛЕДНИХ СТУПЕНЕЙ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ (НД) НА УСТАНОВКЕ «ВИКТОРИЯ»

№ УАСТ 1-001/1-16

ЗАМ. ДИРЕКТОРА _____ ГОНТЮРЕВ В. А.

ТЕХНОЛОГ _____ КОЛЕСНИКОВ К. Ю.

дог. №_ от «___» _____ 20__ г

ТЛ

Приложение И
(Информационное)

Экспериментальные данные для верификации математических моделей

Таблица 3.1 – Результаты испытаний на газоабразивный износ

Обозначение покрытия	h, мкм	N	h_N, мкм	КТР	ρ1	ρ2	$\sigma_в$ (ВТ1-0)	$\sigma_в$ (ВТ20)	$\sigma_в$ (ВнМ-1)	E1	E2	кП	ЭДИ №1 I, А	ЭДИ №1 I, А	ЭДИ №1 I, А	ρ0e	K	tn, c	HV
(0,5Ti-2,2TiN)x2	5,5	4	2,5	9,3	5,44	4,54	300	960	0	250	113	0,3	120	120	0	9,1	3,2	288	2157
(0,1Ti-0,5TiN)x8	5,5	16	0,6	9,3	5,44	4,54	300	960	0	250	113	0,3	120	120	0	8,5	1,4	92	2600
(1,5Ti-2,5TiN)x4	11,2	8	2,5	9,3	5,44	4,54	300	960	0	250	113	0,3	120	120	0	13,5	2,8	516	2864
(0,1Ti-0,5TiN)x18	10,5	36	0,5	9,3	5,44	4,54	300	960	0	250	113	0,3	120	120	0	18	1,3	82	2860
(0,5Ti-2TiN)x6	16,0	12	2,4	9,3	5,44	4,54	300	960	0	250	113	0,3	120	120	0	15,8	2,3	593	2900
(0,1Ti-0,6TiN)x28	19,0	56	0,6	9,3	5,44	4,54	300	960	0	250	113	0,3	120	120	0	14,7	1,2	82	3340
Ti+2,7Ti2N+3TiN	6,0	2	5,5	9,3	5,44	4,54	300	960	0	250	113	0,3	120	120	0	8,9	6,5	745	1900
(Ti + Ti*N)	3,1	2	2,8	9,3	5,44	4,54	300	960	0	250	113	0,3	120	120	0	10,6	5,4	205	1800
(Ti + Ti*N) x2	6,7	4	2,8	9,3	5,44	4,54	300	960	0	250	113	0,3	120	120	0	10	3,8	640	1672
(0,5Ti-2,8Ti*V)x2	10,9	6	2,8	9,2	5,79	3,36	0	960	120	300	135	0,3	0	120	120	7,8	10,2	512	1905
(0,5V+2(V,Ti*)N)x2	9,8	6	2,5	9,2	5,79	3,36	0	960	120	300	135	0,3	0	120	120	12,5	8,9	397	1865
((V,Ti) + (V,Ti*)N) x2	8,0	4	3,3	9,2	5,79	3,36	0	960	120	300	135	0,3	0	120	120	13	5,7	576	1637
((V,Ti) + (V,Ti*)N) x2	7,1	4	2,8	9,2	5,79	3,36	0	960	120	300	135	0,3	0	140	100	16,1	5,1	512	1445
((V,Ti) + (V,Ti*)N) x2	7,0	4	2,9	9,2	5,79	3,36	0	960	120	300	135	0,3	0	100	140	13,2	7,8	640	1534
((V,Ti) + (V,Ti)N) x18	11,4	36	0,3	9,1	5,79	3,36	300	0	120	300	135	0,3	120	0	120	18,3	2,5	128	2269
((V,Ti) + (V,Ti)N) x5	10,9	10	1,8	9,1	5,79	3,36	300	0	120	300	135	0,3	120	0	120	19,6	12,1	1728	2064
((V,Ti) +(V,Ti)N) x2	9,7	4	4,3	9,1	5,79	3,36	300	0	120	300	135	0,3	120	0	120	20,9	11,7	1984	2227
((V,Ti) + (V,Ti)N) x2	6,7	4	2,5	9,1	5,79	3,36	300	0	120	300	135	0,3	120	0	120	14,8	11,7	832	1626
((V,Ti) + (V,Ti)N) x2	6,8	4	2,7	9,1	5,79	3,36	300	0	120	300	135	0,3	140	0	100	14,9	10,7	704	1548
((V,Ti) + (V,Ti)N) x2	6,4	4	2,6	9,1	5,79	3,36	300	0	120	300	135	0,3	100	0	140	14,8	11,5	768	1610
(V,Ti)N x8	5,1	16	0,3	9,1	5,79	3,36	300	0	120	300	135	0,3	120	0	120	18	1,9	64	1157
(V,Ti)N x3	7,1	6	1,9	9,1	5,79	3,36	300	0	120	300	135	0,3	120	0	120	12,5	11,3	704	1685

Примечания:
1) Индексы 1 – нитридный слой; 2 – титановая или титан-ванадиевый слой
2) Параметры внешней среды {Y} принимались соответствующими условиям испытаний:
   – максимальный размер абразивных частиц: ∅0,04 мм;
   – твердость абразивных частиц: 800..950 HV;
   – прочность на сжатие абразивных частиц σв = 2500..3000 МПа;
   – номинальная скорость газоабразивного потока: 100±10 м/с;
   – угол атаки газоабразивного потока (для лопаток компрессора ГТД) α=60°
   – условия испытания – нормальные;
   – среда – атмосферный воздух;

Таблица 3.2 – Результаты испытаний на каплеударную эрозию

Обозначение покрытия	h, мкм	N	h_N,мкм	КТР	ρ1	ρ2	$\sigma_в$ (ВТ1-0)	E1	E2	кП	ЭДИ №1 I, A	ЭДИ №2 I, A	ЭДИ №3 I, A	Ке	m0e	dE/dMe	D, dB
0,5Ti-10TiN	10,5	2	10,00	9,3	5,44	4,54	300,0	250	113	0,3	120	120	120	1,47	1,5	0,35	2,09
(0,5Ti-10TiN) x2	21	4	10,00	9,3	5,44	4,54	300,0	250	113	0,3	120	120	120	2,31	2,3	0,22	4,18
(0,3Ti-5TiN) x5	26,5	10	5,00	9,3	5,44	4,54	300,0	250	113	0,3	120	120	120	2,63	2,5	0,2	9,06
(0,3Ti-2,8TiN) x10	31	20	2,80	9,3	5,44	4,54	300,0	250	113	0,3	120	120	120	2,89	2,7	0,18	18,12

Примечания:

1) Индексы 1 – нитридный слой; 2 – титановая или титан-ванадиевый слой

2) Параметры внешней среды {Y} принимались соответствующими условиям испытаний:

– размер капель: ∅0,82 мм;

– скорость удара капель о поверхность Суд=250 м/с;

– угол атаки капельного потока $\alpha=2\pm1°$

– условия испытания – нормальные;

– среда – разряженный воздух с давлением остаточных газов $p=10^{-3}$ Па;

Приложение К
(Обязательное)

Акты о внедрении результатов диссертационной работы

Общество с ограниченной ответственностью
«Газпром инвест»
(ООО «Газпром инвест»)

ул. Стартовая, д. 6, лит. Д,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, 196210
тел.: +7(812)455-17-00, факс: +7(812)455-17-41,
e-mail: office@invest.gazprom.ru, www.invest.gazprom.ru
КПП 997450001, ОКПО 82129203, ИНН 7810483334, ОГРН 1077847507759

18.11.2024 № 01/091-29151

на № _____ от _____

Председателю диссертационного совета 24.2.428.05 при ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»
д.т.н., профессору **Кузееву И.Р.**

450064, Приволжский ФО,
Республика Башкортостан,
г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1
e-mail: dissovet5@rusoil.net
Тел.: +7(347)2431754

СПРАВКА

Полученные Селивановым Константином Сергеевичем результаты диссертационной работы «Многослойные ионно-плазменные покрытия для повышения износостойкости и долговечности лопаток турбомашин из титановых сплавов» в виде технологических рекомендаций по нанесению износостойких ионно-плазменных покрытий, многократно повышающих служебные свойства и долговечность лопаток стационарных ГТУ импортного производства, были использованы в работе ООО «Газпром инвест» «Наукоемкие технологии ремонта и изготовления комплектующих для стационарных ГПА», получившей Первую премию Международного конкурса научных, научно-технологических разработок, направленных на развитие топливно-энергетической и добывающей отрасли, курируемого Министерством энергетики Российской Федерации.

Проведенное внедрение технологических процессов на отечественных предприятиях позволило изготовить и отремонтировать импортные комплектующие для ГТУ SGT-600 (всего более 250 наименований). Установленные запасные части работают в составе агрегатов эксплуатируемых в ПАО «Газпром» с 2018 года.

Начальник управления
научно-технического сопровождения,
д.т.н., профессор **В.Н. Федоров**

Directum RX – 6801861

ОДК | КЛИМОВ

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «ОДК-КЛИМОВ»

УЛ. КАНТЕМИРОВСКАЯ, Д. 11, СТР. 1
САНКТ-ПЕТЕРБУРГ,
РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ,
194100

Т.: +7 812 454-71-00
Ф.: +7 812 647-00-29

КПП 785050001
ОГРН 1069847546383
ИНН 7802375335
ОКПО 07543614

UECRUS.COM
KLIMOV@KLIMOV.RU

18.11.2024 № К-713/764/800-24

на № _____ от _____

Справка по результатам
диссертационной работы

ПРЕДСЕДАТЕЛЮ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.428.05 ПРИ ФГБОУ ВО «УФИМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НЕФТЯНОЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ», ПРОФЕССОРУ, Д.Т.Н

И.Р.КУЗЕЕВУ

ул. Космонавтов, д.1, г.Уфа,
Республика Башкортостан,450064

dissovet5@rusoil.net

СПРАВКА

Настоящая справка дана в том, что результаты, полученные Селивановым Константином Сергеевичем при выполнении диссертационной работы «Многослойные ионно-плазменные покрытия для повышения износостойкости и долговечности лопаток турбомашин из титановых сплавов», в части теоретических исследований и моделирования процесса нанесения многослойных защитных покрытий из нескольких источников, использованы также при разработке и внедрении Технических условий (ТУ) №0274-001-2015 «Двухстадийное коррозионностойкое покрытие, наносимое на рабочие лопатки и направляющие аппараты компрессора ГТД РД-33МК», введенных в КД на изделия АО «ОДК-Климов».

При обработке деталей было обеспечено снижение класса шероховатости поверхности относительно базового серийного покрытия и повышение сплошности многослойного покрытия (отсутствие расслоения и фрагментации), равномерности и прочности его сцепления с основой; при дефектации отмечено сохранение коррозионной стойкости покрытий при наличии положительных эксплуатационных эффектов по критериям «солевосприимчивости» и удельного изменения массы после промывок.

Разработанные ТУ в настоящее время используются в серийном производстве при нанесении покрытий на лопатки РК и НА компрессора изделий РД-33МК и РД-93МА.

Врио Главный инженер С.М.Кузнецов
А. Захаров

Живушкин Алексей Алексеевич
Ведущий специалист-руководитель группы.
Тел.: +7 (812) 640-69-73, доб. 7322

Общество с ограниченной ответственностью
Научно-производственное предприятие
«Уралавиаспецтехнология»
(ООО НПП «УАСТ»)
ИНН/КПП 0273023889/027301001
ОГРН1020202392308
450027, Республика Башкортостан, г. Уфа,
ул. Трамвайная, д. 5, корп. 1
Тел.:(347)292-78-49
E-mail: info@nppuast.ru
http: www.nppuast.com

УТВЕРЖДАЮ

Директор
ООО «НПП УАСТ»
В.А. Гонтюрев

«__» _____ 2024 г.

М.П.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы

Селиванова Константина Сергеевича

на тему «Многослойные ионно-плазменные покрытия для повышения износостойкости и долговечности лопаток турбомашин из титановых сплавов»

В диссертационной работе Селиванова К.С. разработаны научно-обоснованные способы формирования многослойных ионно-плазменных покрытий, обеспечивающих комплекс эксплуатационных свойств рабочих лопаток газовых и паровых турбин из титановых сплавов за счет повышения износостойкости при газоабразивном изнашивании – от 2,5 до 12,3 раз; каплеударной эрозии – от 2,0 до 2,8 раз; фреттинг-коррозии – от 2,7 до 8,1 раза.

Разработанные способы обработки внедрены в технологические процессы упрочнения рабочих и направляющих лопаток ГТД производства ПАО «ОДК-УМПО», ПАО «ОДК-Климов» и паровых турбин АО «Силовые машины»:

– ТП №ВАТТ.900.006.000 Техпроцесс комплексной вакуумной ионно-плазменной обработки титановых лопаток РКНД I, II ст. изд. АЛ-31СТ с нанесением покрытия нитрида титана Ti-TiN на установке ВАТТ 900-3Д;

– ТП №1602-300-219-УГАТУ Техпроцесс на проведение электролитно-плазменного полирования, ионной имплантации и нанесения многослойного покрытия на направляющие лопатки изд. 30;

– ТП №УАСТ 1-001/1-16 Упрочнение контактных поверхностей бандажных полок титановых лопаток из сплавов ВТ6, ТС5 последних ступеней низкого давления (НД) на установке «Виктория»;

– ТП №УАСТ 1-002/1-19 Техпроцесс на упрочнение (модификация азота) контактных поверхностей бандажных полок титановых лопаток последних ступеней ЦНД;

– ТП №ВАТТ 900.007.000-2016 Техпроцесс комплексной вакуумной ионно-плазменной обработки шлицев цапфы барабана с нанесением покрытия нитрида титана Ti-TiN на установке ВАТТ 900-3Д;

В настоящее время по разработанным технологиям обработано более 10 тыс. рабочих лопаток из титановых сплавов последних ступеней ЦНД паровых турбин производства АО «Силовые машины», а также рабочих лопаток реактивного ЦВД и лопаток, работающих в зоне фазового перехода.

Зам. технического директора Таминдаров Д.Р.

Начальник производства Бегликчеев П.В.

Общество с ограниченной ответственностью
Научно-производственное предприятие
«Уралавиаспецтехнология»
(ООО НПП «УАСТ»)
ИНН/КПП 0273023889/027301001
ОГРН1020202392308
450027, Республика Башкортостан, г. Уфа,
ул. Трамвайная, д. 5, корп. 1
Тел.:(347)292-78-49
E-mail: info@nppuast.ru
http: www.nppuast.com

УТВЕРЖДАЮ

Директор
ООО «НПП УАСТ»
В.А. Гонтюрев

«__» _____ 2024 г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы

Селиванова Константина Сергеевича

на тему «Многослойные ионно-плазменные покрытия для повышения износостойкости и долговечности лопаток турбомашин из титановых сплавов»

В диссертационной работе Селиванова К.С. разработана новая методика определения прочности ионно-плазменных покрытий путем инструментального индентирования алмазными наконечниками, отличающаяся от известных тем, что за критерий разрушения материала поверхности принимают не критическую нагрузку, а величину максимальных контактных напряжений, определяемых в зависимости от степени деформации материала в области контакта. Предлагаемая методика расширяет исследовательские возможности известного способа инструментального индентирования ASTM C1624-2022 (Scratch testing), повышает его универсальность и достоверность получаемых результатов.

Разработанная в диссертационной работе методика инструментального индентирования широко используется в производстве НПП УАСТ при отработке технологий нанесения защитных покрытий, а также при проведении научно-исследовательских и опытно-технологических работ совместно с предприятиями: АО «Силовые машины-ЛМЗ», АО «Уральский турбинный

завод», ПАО «Газпром», ПАО «ОДК-Кузнецов», ПАО «ОДК-Климов», ПАО «ОДК-УМПО», АО «НЦВ Миль и Камов», АО «КумАПП», ООО «Русские Газовые Турбины», ООО «НПО Реновационные технологии».

Зам. технического директора Таминдаров Д.Р.

Начальник ОТК Колесников К.Ю.

Акционерное общество «Силовые машины - ЗТЛ, ЛМЗ, Электросила, Энергомашэкспорт»
(АО «Силовые машины»)

ул. Ватутина, д. 3, лит. А, Санкт-Петербург, Россия, 195009, тел. +7 (812) 346-70-37, факс +7 (812) 346-70-35
mail@power-m.ru; www.power-m.ru

В диссертационный совет 24.2.428.05
при ФГБОУ ВО «Уфимский
государственный нефтяной технический
университет»

№

450064, РФ, Республика Башкортостан,
г. Уфа, ул. Космонавтов, д.1
E-mail: dissovet5@rusoil.net

СПРАВКА О ВНЕДРЕНИИ

Результаты, полученные Селивановым Константином Сергеевичем в диссертационной работе «Многослойные ионно-плазменные покрытия для повышения износостойкости и долговечности лопаток турбомашин из титановых сплавов», а также результаты совместных работ в рамках НИР «Разработка технологии и модернизация установки ЭЛУ-9Б для упрочнения бандажных полок титановых рабочих лопаток последних ступеней ЦНД ТЭС «Альхольма», методом ионной имплантации с применением упрочняющего покрытия» позволили обеспечить повышение износостойкости рабочих лопаток ЦНД последних ступеней из титановых сплавов ВТ6 и ТС5, сопротивление капельной эрозии от 1,53 до 2,0 раз, повышение предела выносливости на базе 2×10^7 циклов на 17,6%, увеличение эксплуатационной долговечности на 7,2 тыс. часов.

Несколько плановых осмотров турбины К-255-162 ТЭС «Альхольма» с упрочненными лопатками в течение 35 901 часов эксплуатации при 98 пусках показали, что на рабочих поверхностях лопаток, хвостовика и контактных поверхностях зубьев бандажных полок следы износа, отслоения, сколы, трещины и следы других повреждений отсутствовали, состояние упрочненных лопаток отвечает требованиям завода-изготовителя и находится в удовлетворительном состоянии.

Полученные результаты были использованы при разработке технических инструкций (ТИ 1419654 И 01, 2419654 И 01) и комплектов технологической документации (ТП №203-01-04, №УАСТ-1-002/1-19, №УАСТ-1-001/1-16) на упрочнение рабочих и направляющих лопаток паровых турбин путем ионной модификации (имплантации) и нанесения многослойных ионно-плазменных покрытий на основе титана и его нитридов.

В настоящее время по разработанным технологиям упрочнено более 10 тысяч рабочих лопаток из титановых сплавов последних ступеней ЦНД паровых турбин типа К-255, К-800, К-1000, К-1200; направляющих и рабочих лопаток реактивного ЦВД паровых турбин типа: К-225, К-300, К-660, Т-180/210; рабочих лопатки, работающих в зоне фазового перехода: паровых турбин К-80 и К-130.

Главный конструктор
паровых турбин –начальник
СКБ «Турбина» С.Ю. Евдокимов

М.П.

190325

ПУБЛИЧНОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «ОДК-УФИМСКОЕ МОТОРОСТРОИТЕЛЬНОЕ ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ»

УЛ. ФЕРИНА, 2, Г. УФА,
РЕСПУБЛИКА БАШКОРТОСТАН,
РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ, 450039

КПП 027301001
ОГРН 1020202388359
ИНН 0273008320

Т.: +7 347 267-77-77
Ф.: +7 347 238-37-44

UMPO.RU
UMPO@UMPO.RU

28.05.2025г № 160-07-20/25
на № _____ от _____

В диссертационный совет 24.2.428.05
при ФГБОУ ВО «Уфимский
государственный нефтяной
технический университет»

450064, Республика Башкортостан,
г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1

СПРАВКА

об использовании результатов диссертационной работы
Селиванова Константина Сергеевича
на тему «Многослойные ионно-плазменные покрытия для повышения износостойкости и долговечности лопаток турбомашин из титановых сплавов»

Полученные Селивановым К.С. результаты исследований, а именно установленная взаимосвязь конструкции и свойств многослойных ионно-плазменных нитридных покрытий типа Ti+TiN и (V,Ti)+(V,Ti)N с величиной их износостойкости и усталостной прочности, использованы ПАО «ОДК-УМПО» при упрочнении лопаток компрессора ГТД АЛ-31СТ и перспективных двигателей. Данные результаты были подтверждены в ходе НИР «Комплексное вакуумное и ионно-плазменное упрочнение титановых лопаток компрессора перспективного ГТД», где было установлено, что на лопатках из сплава ВТ6 после упрочняющей обработки достигается:

– увеличение на 15,2% предела выносливости направляющих лопаток 1-й ступени вентилятора из сплава ВТ6 на базе $2 \cdot 10^7$ циклов в сравнении с серийным процессом упрочняющей обработки;

– повышение от 7 до 10 раз стойкости к газоабразивноу изнашиванию сплава ВТ6 (схема испытания по ГОСТ 23.201-78, абразив – электрокорунд F250 ∅40 мкм, угол атаки 60°, скорость 76 м/с).

На основании полученных Селивановым К.С. результатов исследований был разработан опытный технологический процесс упрочнения рабочих лопаток 1-й и 2-й ступеней компрессора низкого давления ГТД АЛ-31СТ, изготавливаемых из титанового сплава ВТ6. Упрочненные лопатки с многослойным ионно-плазменным покрытием нитрида титана проходили эксплуатацию в составе газоперекачивающего агрегата ГПА-16Р «Уфа» на КС-18А «Москово», газопровод «Уренгой-Новопсков» (ООО «Газпром трансгаз Уфа»). Общая наработка лопаток до первого останова составила 3 600 часов. При внешнем осмотре следов износа и эксплуатационных дефектов покрытия на пере лопаток не выявлено. Дополнительно установлено, что нанесенное покрытие снижает интенсивность солеотложения, что позволяет уменьшить время обслуживания двигателя в межремонтный период.

Директор по энергетическим
и промышленным программам
ПАО «ОДК-УМПО» Лобов Д.А.

Главный конструктор ОКБ «Мотор»
ПАО «ОДК-УМПО» Буцкий Н.А.

М.П.

«ОДК Уфимское моторостроительное производственное объединение»
Цех № 564
ОКБ «Мотор»
Публичное акционерное общество