

На правах рукописи

УДК 621.924.93

Проваторов Александр Сергеевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА УСТАНОВЛЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННО-
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ
ПОКРЫТИЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА НИХ
ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ГИДРОСТРУИ**

Специальность 2.5.6 – Технология машиностроения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Научный руководитель: доктор технических наук
Галиновский Андрей Леонидович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, доцент
Барсуков Геннадий Валерьевич
Профессор кафедры машиностроения ФГБОУ
ВО «Орловский государственный университет
имени И.С. Тургенева», г. Орел

кандидат технических наук
Федоров Сергей Вольдемарович
доцент кафедры высокоэффективных
технологий обработки ФГАОУ ВО "Московский
государственный технологический университет
"СТАНКИН"

Ведущая организация: АО «Научно-исследовательский институт
интроскопии МНПО «СПЕКТР»

Защита состоится «__» _____ 2025 г. _____ на заседании диссертационного совета 24.2.331.02 в ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр.1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью, просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета по вышеуказанному адресу.

Автореферат разослан «___» _____ 2025 г.

Телефон для справок 8(499) 263-66-33 доб. 36-28

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент



А.В. Богданов

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В современном машиностроении технический прогресс во многом определяется совершенствованием традиционных и созданием новых технологий и средств диагностики и контроля. Особое место занимают вопросы получения информации о параметрах технологических процессов и показателях качества материалов и изделий из них. Для этапа технологической подготовки производства важно получение достаточно оперативной информации о функционально-эксплуатационных параметрах изделия, что требует предъявления высоких требований к быстродействию систем контроля и диагностики, а также их точности. Производство изделий, использующих технологические покрытия требует создания диагностических средств, которые бы достаточно оперативно могли оценивать их эксплуатационные свойства, что необходимо для отработки режимов нанесения покрытий, характеризующихся значительным числом варьируемых технологических параметров. Характеристики поверхности покрытий во многом определяют их химические, механические, оптические и трибологические свойства, поскольку именно поверхность или тонкий приповерхностный слой воспринимают основные внешние воздействия, играя важную роль при создании новых покрытий.

Из вышеизложенного следует, что исследование механических (твердость, модуль упругости, адгезионная и когезионная прочность) и трибологических (коэффициент трения, износостойкость) свойств функциональных покрытий, является актуальной задачей, требующей создания соответствующих средств диагностики.

На кафедре технологий ракетно-космического машиностроения МГТУ им. Н.Э. Баумана в последние годы проведена серия исследований, показывающих возможность получения информации о эксплуатационно-технологических параметрах состояния поверхностного слоя различных материалов и изделий путем воздействия на них высокоскоростной гидроструи (ультраструи) – ультраструйная технологическая диагностика. Под термином «ультраструйная технологическая диагностика» (УСД) понимается процесс получения информации о техническом состоянии объекта исследования на основании анализа характеристик гидроэрозионного разрушения его поверхностного слоя ультраструей жидкости. Основой для реализации процедур УСД является технологическое оборудование, применяемое для гидроабразивных резки материалов с рабочим давлением от 300 до 400 МПа, скоростью ультраструи в пределах от 300 до 1000 м/с. Плотность потока мощности ультраструи составляет значение порядка 0,5 МВт/мм². Вместе с тем, исследований, направленных на оценку возможности применения метода УСД для определения показателей качества функциональных покрытий, проведено не было. Таким образом, сложившееся научное противоречие, между необходимостью показателей качества покрытий, требующих создания соответствующих средств диагностики, и имеющимся, но не реализованным потенциалом ультраструйной технологической диагностики для исследования этих характеристик требует разрешения.

В то же время, основываясь на результатах проведения исследований методом экспертного оценивания, было установлено, что УСД является перспективной в

решении поставленных задач, обладает научно-практическим потенциалом.

Цель работы: разработка научно-прикладных подходов технологии установления эксплуатационно-технологических характеристик функциональных покрытий на основе анализа результатов воздействия на них высокоскоростной гидроструи, с целью контроля качества и повышения надежности работы деталей с покрытиями.

Задачи исследования:

1. На основе анализа информационных источников провести анализ различных видов технологического воздействия, средств и методов установления эксплуатационно-технологических характеристик ФП, применяемых с целью получения информации об их показателях качества, решаемых задачах и имеющихся недостатках, обосновать актуальность и сформировать методическую базу проведения исследований.

2. Сформировать феноменологические представления об особенностях механизма гидроэрозионного разрушения ФП под действием высокоскоростной гидроструи, осуществить численное моделирование данного процесса с целью определения информативных признаков ультразвуковой диагностики.

3. Осуществить экспериментальную оценку эффективности применения метода УСД по установлению эксплуатационно-технологических характеристик и определению показателей качества ФП, обеспечивающих эффективность эксплуатации и надежность работы деталей с покрытиями.

4. На основе теоретических исследований, результатов численного моделирования и данных экспериментов выполнить сравнительно-сопоставительный анализ показателей качества различных ФП по критерию обеспечения качества и повышения надёжности их работы.

5. На основе анализа теоретических и экспериментальных исследований разработать рекомендации по практическому применению результатов работы и инженерную методику установления эксплуатационно-технологических характеристик ФП с использованием метода УСД.

Методы исследования: В работе использовались фундаментальные положения технологии машиностроения, теории гидроэрозионного и усталостного разрушения, физики твёрдого тела, метод конечных элементов и экспертного оценивания, аппарат теории вероятностей и математической статистики. Подготовка к проведению экспериментальных исследований осуществлялась с использованием теории планирования эксперимента. Экспериментальные исследования проводились на сертифицированном оборудовании по специально разработанным методикам с использованием широкого спектра технических средств, оборудования и деталей с покрытиями, таких как вакуумная ионно-плазменная установка для нанесения покрытий, установка для гидроабразивного резания, оптический, электронный и конфокальный микроскопы, экспериментальный стенд для проведения усталостных испытаний, экспериментальный стенд для проведения трибологических испытаний, адгезиметр, компьютеризированный профилограф-профилометр. Математическое моделирование и обработку полученных данных проводили с использованием программ Microsoft Excel, Ansys Mechanical и Ansys

Autodyn.

Научная новизна работы состоит в теоретическом обосновании и экспериментальном подтверждении положения о взаимосвязи эксплуатационно-технологических характеристик ФП с информативными параметрами результатов воздействия на них высокоскоростной гидроструи.

Признаками научной новизны обладают следующие положения:

1. Разработана конечно-элементная модель процесса взаимодействия высокоскоростной гидроструи с образцами, имеющими ФП различной степени поврежденности, в условиях варьируемых входных параметров технологического воздействия.
2. Доказано физико-технологическое подобие изменения поврежденности ФП механизму нестационарного воздействия высокоскоростной гидроструи и соответствия экспериментальных данных и теоретических расчётов, установивших начало развития магистральных трещин в ФП по достижении 60 тысяч циклов усталостных испытаний.
3. Выявлены высокие значения корреляции ($R_s = 0,85-0,98$) информативных параметров фрикционных и гидроструйных испытаний ФП, доказывающих возможность использования высокоскоростной гидроструи в качестве инструмента их ускоренных испытаний.
4. Доказана возможность применения метода УСД для изделий с ФП на этапе технологической подготовки производства на основе результатов оценки интенсивности гидроэрозии поверхности деталей с покрытиями различной степени поврежденности, сформированной в результате усталостных испытаний.

Практическая значимость работы:

1. Разработана и апробирована в лабораторных условиях инженерная методика установления эксплуатационно-технологических характеристик изделий с ФП по результатам воздействия на них высокоскоростной гидроструи.
2. Разработаны математические модели взаимодействия высокоскоростной гидроструи с образцом, имеющим ФП с различной степенью поврежденности, позволяющие провести детальный экспресс анализ факторов, влияющих на характер его гидроэрозионного разрушения.
3. Разработаны практические рекомендации по применению методики УСД для изделий с ФП, работающих в условиях гидроэрозионного и кавитационного изнашивания и действия знакопеременных нагрузок.

Достоверность и корректность результатов работы подтверждается использованием апробированных и научно-обоснованных методик обработки и анализа данных, результатами опытной валидации и верификации полученных теоретических результатов

На защиту выносятся:

1. Обоснование применения высокоскоростной гидроструи как средства оценки эксплуатационно-технологических характеристик ФП и получения информации об их параметрах качества методом экспертных оценок.
2. Конечно-элементная модель процесса взаимодействия высокоскоростной гидроструи с образцом, имеющим ФП, в условиях варьируемых входных

технологических параметров воздействия и степени поврежденности покрытия.

3. Инженерная методика и технологические рекомендации по реализации метода УСД изделий с ФП для установления их эксплуатационно-технологических характеристик.

4. Результаты сравнительно-сопоставительных экспериментов по установлению эксплуатационно-технологических характеристик образцов с ФП, методами УСД и фрикционных испытаний.

Апробация работы: основные результаты работы изложены на всероссийских и международных конференциях:

Будущее машиностроения (Москва, 2014, 2016, 2017, 2018 гг.), Академические чтения по космонавтике (2015, 2017, 2018 гг.), международной конференции «Научные принципы и подходы, методы и технологии, системный анализ и статистическая обработка данных о создании, диагностике, модернизации композиционных материалов и покрытий с нанодобавками, работающих в условиях динамического и высокоэнергетического нагружения» (2017 г), Студенческая весна (2015-2018 гг.), научно-технической выставке «Политехника» (2016 г.).

Личный вклад соискателя состоит в анализе и систематизации данных, известных из литературных источников и полученных в результате выполнении экспериментов и теоретических исследований, проведении численного моделирования, оценке показателей качества изделий с ФП методом УСД, создании и апробации инженерной экспресс-методики УСД изделий с ФП. Им лично подготовлены и сделаны доклады на конференциях и семинарах.

Публикации по теме диссертации: материалы диссертации отражены в 11 научных работах, 2 из которых находятся в списке изданий, рекомендуемых ВАК РФ, 1 в базе Scopus и 1 патенте.

Структура и объём диссертации: диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, общих выводов и результатов работы, списка использованной литературы. Она изложена на 185 листах машинного текста, содержит 57 рисунков и 17 таблиц. Список литературы содержит 130 наименований.

2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы исследования, формулируются цели и задачи работы, практическая значимость и новизна предлагаемых решений.

В первой главе изложены результаты аналитического обзора литературных источников по теме диссертации. В частности, рассматриваются вопросы применения технологических функциональных покрытий в современном машиностроении. Отмечается, что в настоящее время высока роль и значимость таких покрытий для эффективного использования широкой номенклатуры изделий. На сегодняшний день одним из эффективных путей совершенствования изделий машиностроительной отрасли является миниатюризация входящих в их конструкцию деталей и узлов, а также повышение их надёжности и долговечности за счёт совершенствования технологий их производства, контроля и диагностики. Данная тенденция накладывает специфические ограничения на массогабаритные

характеристики механических частей устройств, что в свою очередь определяет перечень используемых конструкционных и функциональных материалов, обеспечивающих требуемые эксплуатационные характеристики. Данная тенденция находит своё применение при производстве изделий точной механики, гироскопов, приводных узлов и передач, насосных систем различного назначения, режущего инструмента и т.д.

Механические узлы таких систем должны обладать повышенной стойкостью к износу различного вида для обеспечения их максимально возможного коэффициента полезного действия (КПД) и повышения надёжности и долговечности изделия.

Улучшение трибологических характеристик таких систем является самостоятельной задачей для проведения подробных теоретических и экспериментальных исследований т.к. зачастую миниатюрные размеры узлов трения не позволяют использовать такие конструкторско-технологические методы по обеспечению износостойкости пар трения и уменьшению контактных фрикционных нагрузок, как жидкие и вязкие смазки, самосмазывающиеся покрытия и т.д., что обуславливает использование в их конструкции тонких функциональных покрытий различных классов (TiN, TiCN, AlTiN, CrN, ZrN, DLC и т.д.).

В первой главе приводится обзор и анализ различных методов нанесения тонких функциональных покрытий, базовых физических принципов и конструкторско-технологических схем, оборудования и оснастки для реализации технологий нанесения покрытий. Эти методы подробно исследованы при участии таких специалистов как: В.П. Сергеев, Р.О. Черепанов, Celis J. P., R.Buhl, H.K.Pulker, S.J. Bull, T.W.Scharf и др. Установлено, что значительный объем производства изделий машиностроения использует покрытия, полученные методом физического осаждения. В главе показано, что в нашей стране сложилось несколько научных школ, занимающихся вопросами производства изделий с функциональными покрытиями, их контроля качества и диагностики, моделирования процессов нанесения и других вопросов. Важное место в этих школах занимают специалисты: М.И. Шкарупа, А.О. Волхонский, В.В. Душик, исследования которых сформировали заметный научный задел по вопросам обеспечения защиты металлических элементов и конструкций и машиностроения. А также работы: В.П. Табакова, А.В. Чихранова, Д.И. Сагитова внесших заметный вклад в развитие теоретической базы исследований, построения моделей нанесения и разрушения покрытий под действием эксплуатационных факторов.

Анализ статистических данных по количеству защит диссертаций и статей в периодической печати по вопросам исследований функциональных покрытий и их внедрения в различные области науки и техники неуклонно растет в последнее десятилетие. Но вместе с тем, работ, которые бы были связаны с вопросами оценки качества покрытий, прогнозирования их ресурса, разработки новых методов и схем контроля и диагностики крайне недостаточно. Среди таких работ следует выделить труды: Н.М. Мишустина, А.А. Дианова, С.Г. Уварова, H.J. Kim, Daugela A., R.Bandorf, A.V. Korlyakov, и др. В рассмотренных исследованиях авторами применяется более десятка различных методов оценки качества покрытий и

эффективности их использования при функционировании деталей с покрытиями, инструмента и оборудования. Причем, чаще всего, для получения удовлетворительного результата, авторами используется совокупность методов диагностики, что связано с необходимостью обеспечения и повышения информативности и достоверности результатов исследований. Учитывая данное обстоятельство в главе рассмотрены методы контроля качества, используемые в настоящее время как в России, так и за рубежом, выявлены особенности и недостатки этих методов. Сделаны выводы, что разработка новых средств и подходов к оценке качества покрытий имеет важное значение для современного машиностроения в особенности учитывая рост объемов их применения в отрасли.

Учитывая, что ультразвуковая технология диагностики материалов имеет широкий спектр практического применения и доказанную, на основе многочисленных исследований, эффективность (по данной тематике защищены диссертации следующих авторов: М.И. Абашин, В.С. Елфимов, С.Г. Муляр, М.В. Хафизов, Ли Сюеянь) можно предположить, что ее адаптация для решения задач оценки качества функциональных покрытий позволит расширить арсенал уже имеющихся средств и методов. Таким образом, открывается возможно решить наметившееся научное противоречие между, с одной стороны, высокими темпами применения и совершенствования технологий нанесения покрытий, а с другой стороны отсутствием достаточного количества средств контроля и диагностики функциональных покрытий в особенности для этапов технологической подготовки производства.

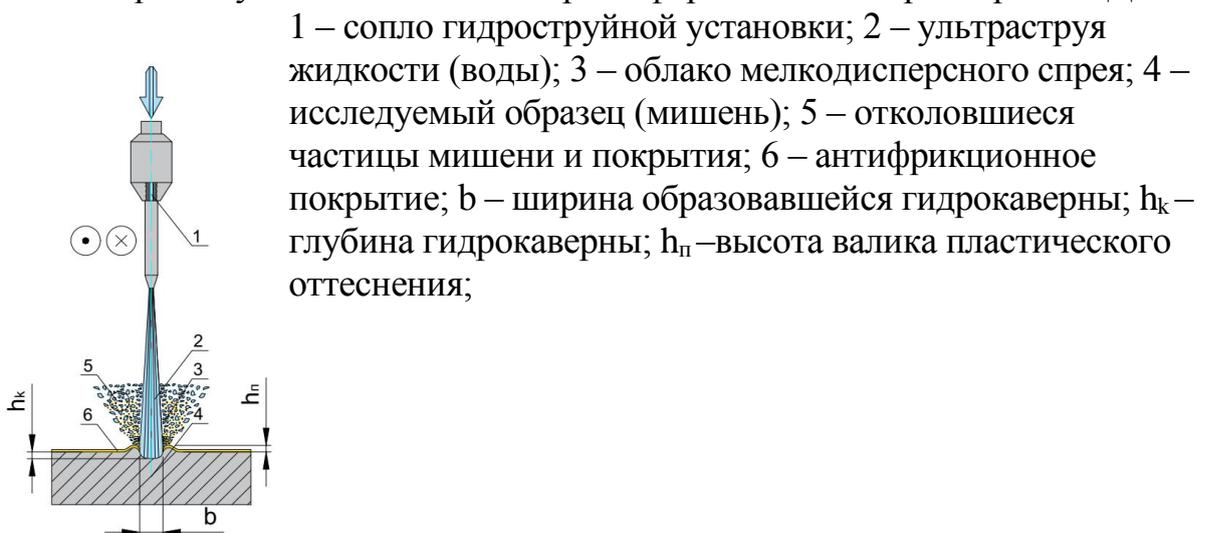
Таким образом, с учетом поставленной цели и перечня решаемых задач в заключении первой главы был разработан общий методический план проведения исследований, ключевыми этапами которого являются теоретические и экспериментальные исследования, моделирование процесса оценки качества покрытий с учетом его поврежденности, разработка инженерной методики определения параметров качества функциональных покрытий.

Во второй главе рассмотрены вопросы научно-методического обеспечения проводимых теоретических и экспериментальных исследований. Выполнен анализ оборудования, применяемого для нанесения функциональных покрытий на детали машиностроения. Объяснено устройство, состав технологических модулей и принцип работы гидроструйной установки, используемой в исследовании для реализации предлагаемого метода ультразвуковой диагностики функциональных покрытий. Предлагается для рассмотрения методическое описание процессов проведения экспериментальных исследований и обработки полученных данных. Представлены характеристики и возможности испытательной и измерительной базы исследований, применяемой для подготовки образцов для испытаний и изучения результатов диагностики покрытий различными методами. Кроме того, в главе показаны возможности используемого компьютерно-программного обеспечения теоретической части работы по моделированию процессов взаимодействия ультразвука жидкости с образцами, имеющими функциональные покрытия.

В соответствии с методическим планом исследования на первом этапе в главе два была осуществлена оценка возможности и перспективности использования высокоскоростной гидроструи для оценки качества функциональных покрытий

методом экспертного оценивания. В соответствии с разработанной совокупностью критериев оценки выполнено сравнение различных существующих и перспективных видов технолого-диагностического воздействия на образцы с покрытиями, позволяющих в последствии подучать информацию об их физико-механических и эксплуатационно-технологических параметрах. Представлена процедура реализации метода экспертных оценок, состоящая в нескольких этапах, в том числе: определении минимального числа экспертов, исходя из обеспечения требований достоверности результатов экспертизы; разработке анкет экспертов, проведении анкетирования и обработке его результатов на основе метода взвешенной суммы; оценке коэффициента конкордации. При проведении расчетов использовалось зарегистрированное программное обеспечение, разработанное на кафедре СМ-12.

Экспериментальные исследования по реализации метода УСД проводились в соответствии с договором о научно-техническом сотрудничестве в Центре гидрофизических исследований МГУ имени М.В. Ломоносова с помощью комплекса технологического оборудования марки Flow System (США). Технические параметры установки позволяют осуществлять варьирование технологических режимов ультразвуковой обработки в достаточно широком диапазоне: гидродавление от 140 до 410 МПа, скорость подачи режущей головки от 10 до 7640 мм/мин, расстояние от среза фокусирующей трубки до поверхности образца от 2 до 200 мм. Мощность насоса высокого давления составляет 37 кВт. Гидротехнологический комплекс оснащен системой с ЧПУ, имеет достаточно высокие точностные показатели по позиционированию режущей головки до 0,023 мм. Данные технические возможности позволяют управлять процессом УСД (см. Рис. 1) таким образом, чтобы формировать эрозионный след от воздействия высокоскоростной гидроструи с заданными параметрами скорости и геометрии движения по критерию возможности идентификации результатов воздействия и исходя из физико-механических характеристик материала подложки и покрытия образцов. Другими словами, при планировании экспериментов важное внимание уделялось вопросам установления и выбора информативных параметров УСД.



1 – сопло гидроструйной установки; 2 – ультразвукая жидкости (воды); 3 – облако мелкодисперсного спрея; 4 – исследуемый образец (мишень); 5 – отколовшиеся частицы мишени и покрытия; 6 – антифрикционное покрытие; b – ширина образовавшейся гидрокаверны; h_k – глубина гидрокаверны; $h_п$ – высота валика пластического оттеснения;

Рис. 1. Схема процесса УСД образцов

Измерения информативных параметров УСД выполнялись на экспериментальной базе Физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. В частности, в исследованиях использовался: цифровой оптический микроскоп; двулучевой ионно-электронный микроскоп с 3D эффектом FEI Quanta 200 3D DualBeam (Германия); профилограф-профилометр БВ-7669М.

Образцы для испытаний подготавливались согласно ГОСТ 25.502-79 из стали (см. Рис. 2, б), на которые в последующем было нанесено три типа функциональных покрытий (TiN, TiCN, DLC) методом ионно-плазменного осаждения.

Одним из этапов подготовки экспериментов было создание образцов с покрытиями, имеющими различную степень поврежденности. Покрытия на образцы наносились с использованием установки для нанесения ФП марки Plaitit.

С этой целью партии образцов с различными покрытиями были подвержены испытаниям на усталостную прочность на специально спроектированной установке, работающей по схеме одноосного изгиба при симметричном цикле нагружения. Нагружение партии образцов состояло из двух этапов: закрепление образца в держателе установки (Рис. 2 а), нагружение по схеме (Рис. 2, б) с определенным фиксированным числом циклов от 20000 до 80000 и шагом в 20000 циклов.

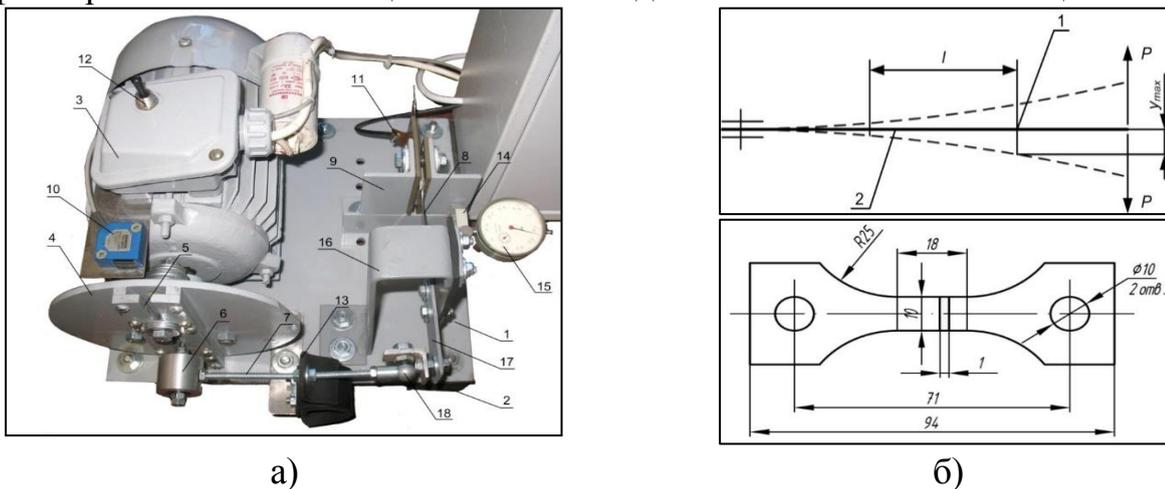


Рис. 2. Экспериментальный стенд для проведения усталостных испытаний образцов с покрытиями (каф. СМ-12 МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Предварительно часть партии образцов с каждой группой покрытия и без него доводился до разрушения, осуществлялась фиксация числа циклов до разрушения. Согласно методическому плану исследований параллельно с данными экспериментами проводилось моделирование процесса усталостных испытаний методом конечных элементов в среде ANSYS/AutoDyn для формирования представлений о характере и размерах распределения напряжений в образце. Этот же пакет был использован в ходе создания численной модели процесса взаимодействия высокоскоростной гидроструи с образцом, имеющим покрытие различной степени поврежденности.

Помимо усталостных испытаний оценка качества указанных покрытий проводилась с помощью фрикционных испытаний и методом скрайбирования.

Исследование результатов воздействия осуществлялось с применением

комплекса измерительного оборудования и приборных устройств, прежде всего средствами оптической и электронной микроскопии, а также измерением геометрических параметров участков эрозии поверхностного слоя образцов.

В третьей главе на основе результатов применения элементов теории принятия решений и экспертного оценивания, методом взвешенной суммы по разработанным критериям и результатам анкетирования экспертов показано, что метод УСД в сравнении с другими методами диагностики покрытий имеет перспективы для внедрения и успешной реализации на этапах технологической подготовки производства. В главе предложена и обоснована численная модель взаимодействия высокоскоростной гидроструи с образцом, имеющим покрытие с различной степенью поврежденности. Для исследуемой группы покрытий были разработаны численные модели процесса их скрайбирования с целью расширения представлений о физико-технологических процессах, протекающих в результате выполнения данных диагностических операций. Сформированы феноменологические представления о процессе и механизме эрозии функциональных покрытий после процедуры УСД и об их подобии механизмам изменения поврежденности при эксплуатации в условиях функционирования ряда изделий (Рис.3). Получена гидродинамическая картина поверхностно-расклинивающего и объемно-усталостного механизма разрушения покрытий при УСД. Определены численные значения времени формирования магистральных трещин в материале функциональных покрытий.

Исходя из опыта экспериментальных исследований и общих представлений о гидроэрозионном разрушении материала было выделено два механизма эрозии поверхностного слоя диагностируемого изделия под действием высокоскоростной гидроструи:

- Расклинивающее действие высокого ($P > 100$ МПа) гидродавления ультраструи на кинетику зарождения, развития и слияния поверхностных трещино-подобных микро- и макродефектов между собой и нижележащими аналогичными несплошностями в подповерхностном слое подложки;

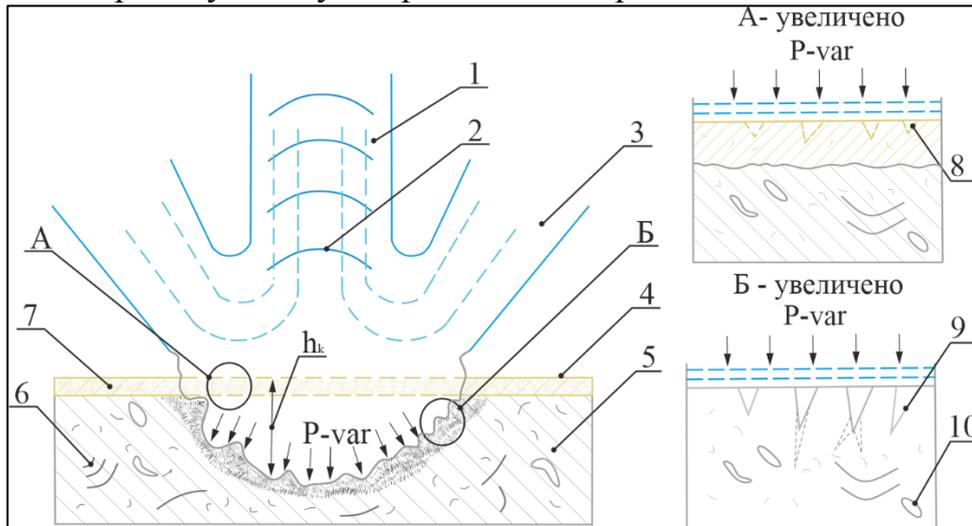
- Усталостный механизм формирования критических значений трещино-обусловленной поврежденности материала поверхностных слоев объекта диагностики в условиях интенсивных вариаций его напряженно-деформируемого состояния, характерных для гидродинамического воздействия высокоскоростной УС.

Таким образом, при УСД функциональных покрытий имеют место оба из описанных механизмов эрозии, обеспечивая тем самым необходимую информативность результатов экспресс-анализа показателей качества. Расклинивающий механизм тесно связан с «микро- и субмикрокачеством» самого покрытия, проявляющегося в процессе воздействия эксплуатационных нагрузок, приводящим к нарушению его сплошности и росту поврежденности, в частности при фрикционно-силовом контакте элементов узлов трения гироскопов и других деталей с покрытиями.

Механизм накопления усталостной поврежденности в подповерхностном слое материала подложки физически ответствен за локальную эрозионную микрофрагментацию поверхностного слоя объекта диагностического

воздействия. Это важно для оценки поврежденности границы подложки с покрытием, именно кинетика этого процесса во многом определяет технологическое качество покрытия и уровень адгезионного взаимодействия между ними.

Наличие в процессе УСД совокупности рассмотренных выше механизмов позволяет говорить о возможности получения достоверной информации о параметрах качества функциональных покрытий, как на этапе технологической подготовки производства, так и при текущем или выборочном контроле. Локальность воздействия позволяет осуществлять диагностическое воздействие гидроструи на нерабочую зону покрытия или образцы свидетели.



1 –ультрагидроструя (УГС) со скоростью V_c , создающая в процессе торможения в зоне воздействия гидродинамическое давление $P - var$; 2 – волны акустической эмиссии (АЭ), распространяющиеся по телу УГС; 3 – гидроструи, отраженные от поверхности объекта анализа; 4 – покрытие; 5 – исходный материал объекта анализа; 6 – волны упругой деформации; 7 – микронесплошности (микро- и субмикротрещины) в структуре покрытия; 8 – зарождающиеся и развивающиеся микротрещины на поверхности ФП; 9 – зарождающиеся и развивающиеся микротрещины на свободной поверхности гидродинамического контакта между объектом анализа и заторможенной УГС; 10 – технологические потенциально опасные дефекты в поверхностном слое объекта анализа; H_k – глубина гидрокаверны;

Рис. 3. Иллюстрация феноменологических представлений о механизме гидроэрозионного разрушения покрытия и материала

В третьей главе также представлены расчетная схема и постановка задачи численного моделирования процесса УСД (Рис. 4). Численное моделирование проводилось в программном комплексе ANSYS/AutoDyn при следующих начальных параметрах гидроструи: скорость 550 м/с, диаметр 1,5 мм, плотность 0,997 г/см³. Решение задач осуществлялось в неподвижной системе координат в двумерной осесимметричной постановке с использованием идеальной упругопластичной модели взаимодействия струи и материала. В качестве материала подложки использовалась сталь с покрытием нитрида титана (TiN) толщиной $h=6$ мкм.

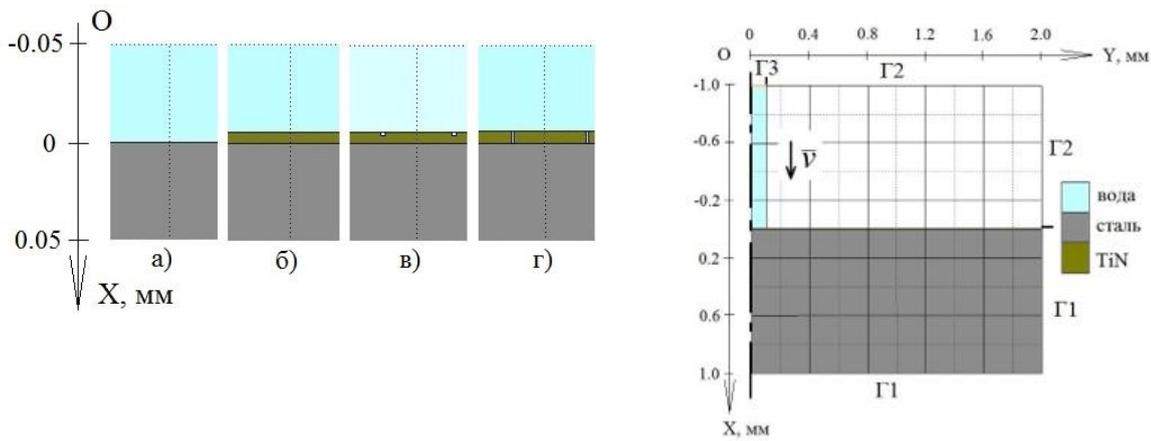
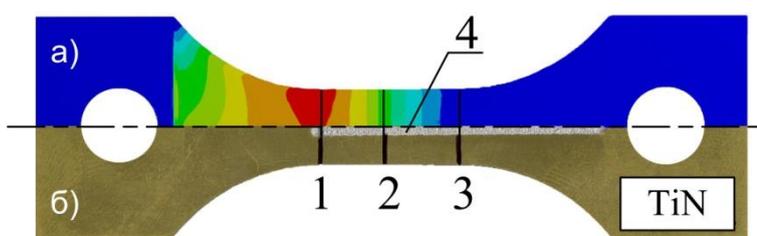


Рис. 4. Расчетная схема и постановка задачи моделирования

В качестве граничных условий были выбраны следующие: на область взаимодействия накладывались ограничения на скорость индивидуальных точек по направлению оси OZ в соответствии с условиями непроницаемости материала и на напряженное состояние, реализующееся в этих точках в соответствии с третьим законом Ньютона.

На следующем этапе теоретических исследований в комплексе Ansys Mechanical разработана математическая модель усталостных испытаний. В ее основу положена объемная модель образца в соответствии с ГОСТ 25.502-79. Один конец пластинки был закреплен неподвижно, на расстоянии 38 мм от другого конца было задано перемещение 3,4 мм в виде симметричного цикла нагружения в соответствии с Рис. 2, б. Ресурс оценивался на основе картины напряженно-деформированного состояния в статическом положении, а заключение о ресурсе было сделано на основании диаграммы Веллера для стали.

Напряженно-деформированное состояние модели образца показано на Рис. 5. из которого видно, что зона максимальных напряжений соответствует месту излома образцов, доведенных до разрушения при усталостных испытаниях. В результате получения полей напряжений были определены координаты расположения реперных аналитических точек 1, 2 и 3, где первая точка – точка максимальных напряжений, вторая точка – точка средних значений и третья точка - область практически не подверженная усталостной нагрузке. В экспериментальной части работы параметры гидрокаверны исследовались в указанных областях с разной поврежденностью материала и покрытия, что необходимо для сопоставления информативных параметров УСД



а) результаты численного моделирования; б) фотография реального образца после УСД
1, 2, 3 – реперные точки на образце; 4 – гидрокаверна

Рис. 5. Напряженно-деформированное состояние и изображение образца после усталостных испытаний и УСД

Далее в главе 3 проводится расчет числа циклов нагружения до момента образования критических трещин в покрытии на основе TiN. В результате расчетов установлено, что число циклов усталостного разрушения, в результате которых формируется магистральная трещина соответствует ~60000 циклам.

Заключительным этапом теоретической части работы являлось решение задачи моделирования процесса скрайбирования методом конечных элементов. Исследование проведено с целью визуализации процесса испытаний покрытий данным методом. Установлено, что при внедрении индентора в материал, происходит образование бегущей «волны» материала, сопровождающейся пластическими деформациями подложки и растрескиванием покрытия, что делает невозможным проводить адекватную оценку его эксплуатационных характеристик в особенности для случая, когда подложка имеет существенно меньшую твердость, чем покрытие.

В четвертой главе обсуждаются результаты проведенных экспериментальных исследований. Проводится сравнительно сопоставительный анализ информативных критериев УСД функциональных покрытий и других методов оценки их качества, в частности фрикционных испытаний. Представлены результаты исследования структуры «покрытие-подложка» с применением средств ионно-лучевой микроскопии, показавшие характер развития трещин и особенности их образования. Предложены зависимости между результатами численного моделирования и экспериментальными значениями УСД.

Образцы с покрытиями (TiN, TiCN, DLC), прошедшие усталостные испытания, были подвержены процедуре УСД по схеме (см. Рис. 1). Измерение глубин каверн проводилось по длине образца в реперных точках 1, 2 и 3. (см. Рис. 7, а). С помощью средств микроскопии установлено, что растрескивание и отслоение нанесенного покрытия от подложки было характерно выражено в месте сосредоточения наибольших напряжений, что не противоречит логике рассматриваемой задачи. (Рис. 6, а, б).

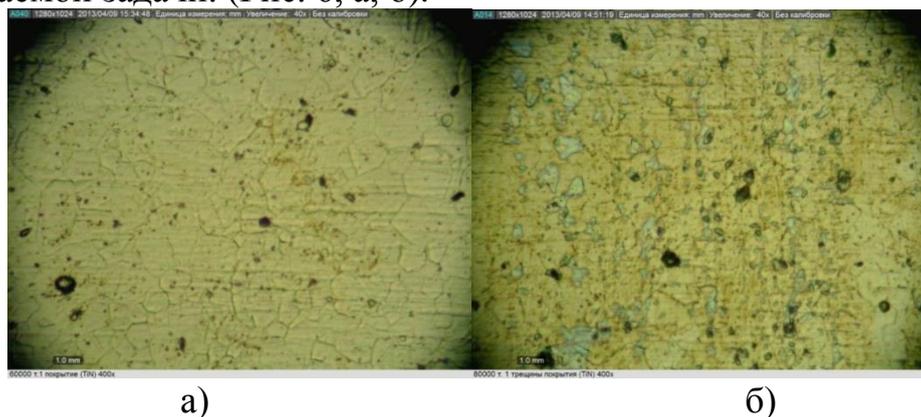


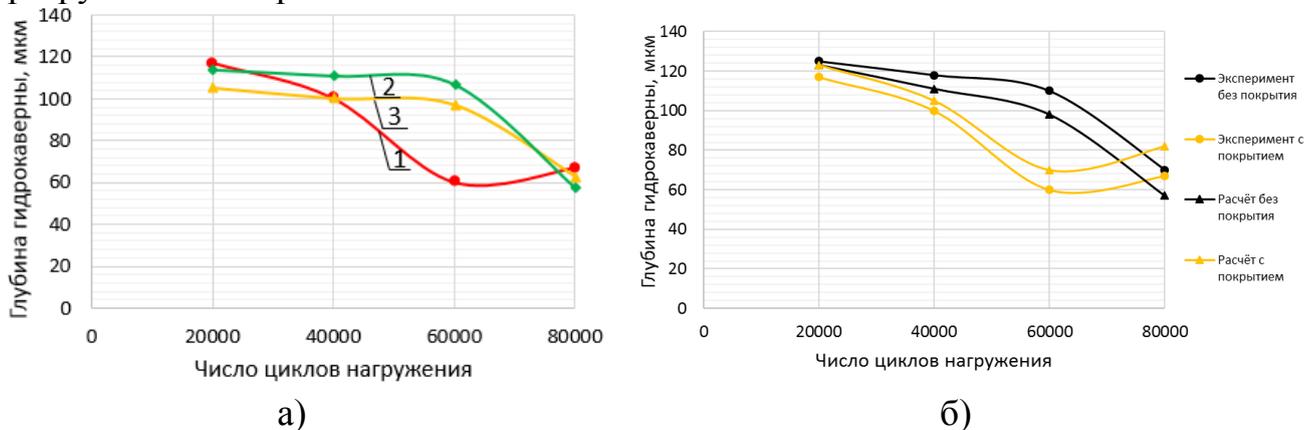
Рис. 6. Поверхность образца с покрытием TiN в точке №1 при увеличении х400 (а- 60 тысяч циклов, б- 80 тысяч циклов)

Из результатов экспериментов видно, что при достижении 60 тысяч циклов нагружения при симметричном изгибе покрытие перестает выполнять барьерные функции, что связано с ухудшением адгезии покрытия и подложки, достижением усталостными трещинами своих критических размеров, снижением когезионных

свойств, а также растрескиванием поверхности покрытия и начала расклинивающего действия в результате действия высокого гидродавления струи. Это согласуется с данными расчетов по определению числа циклов нагружения до образования критической трещины в покрытии.

В четвертой главе так же представлены результаты сравнительно сопоставительного анализа данных численных расчетов и экспериментов по изучению зависимостей глубины гидрокаверны на поверхности образцов с покрытиями от числа циклов усталостного нагружения (различной степени поврежденности (Рис.7, а, б). Анализ полученных графиков (Рис.7, а, б) показал, что при достижении 60000 циклов усталостного нагружения происходит уменьшение глубины, образовавшейся гидрокаверны. В зоне действия максимальных напряжений уменьшение глубины гидрокаверны носит более интенсивный характер на образцах со всеми тремя типами покрытий.

По достижении же 80000 циклов в зоне максимальных напряжений (Рис.7, а) происходит рост глубины гидрокаверны, что связано с накоплением поверхностной поврежденности в структуре покрытия, образованием критических трещин в структуре покрытия и дальнейшим его отслоением от подложки за счёт действия расклинивающего эффекта возникающего от воздействия высокоскоростной гидроструи и интенсифицирующего процесс роста, развития и распространения объёмных и поверхностных трещин, что в дальнейшем приводит к разрушению покрытия.

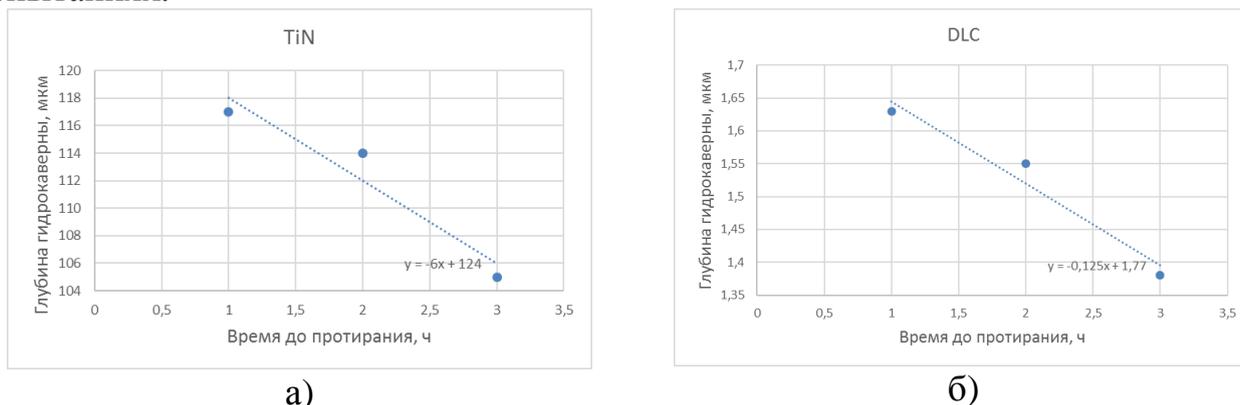


1 – зона максимальных напряжений, 2 – зона средних значений напряжений, 3 – ненагруженная зона;

Рис. 7 – Зависимости глубины гидрокаверн от числа циклов нагружения для образцов с покрытием TiN в точке №1 (а); сравнение расчетных и экспериментальных данных (б);

Анализ результатов сравнительных испытаний ФП методами УСД и фрикционных испытаний (Рис. 8, а, б) показал высокую степень коэффициента корреляции Спирмена r_{xy} (от 0.97 до 0.98) между диагностическими признаками сравниваемых контрольно-диагностических воздействий, что свидетельствует о достоверности предлагаемого ультраструйного метода диагностики покрытий, а также о высокой степени соответствия контрольно-диагностического

ультраструйного воздействия нагрузкам, возникающим при фрикционных испытаниях.



а)

б)

а – покрытие TiN, б – покрытие DLC;

Рис. 8. Корреляционные поля зависимости отношения глубины гидрокаверны после УСД ко времени до протирания после фрикционных испытаний

На основе выполненных экспериментальных и теоретических исследований, апробации их результатов на предприятиях, занимающихся задачами нанесения и исследования ФП, разработана инженерная методика использования высокоскоростной гидроструи для определения показателей качества ФП, определяющих его качество (см. Рис. 9). В основе разработанной методики лежат: блок технологической подготовки, экспериментальный блок формирования базы данных об информативных диагностических параметрах ФП и блок оценки параметров качества ФП. Укрупнённо, процесс диагностики ФП методом УСД состоит из следующих этапов:

1. Выбор рационального режима диагностического воздействия ультраструи на поверхность изделия с ФП. Под рациональностью диагностического воздействия подразумеваются такие параметры образовавшейся в результате воздействия ультраструи гидрокаверны, которые позволят провести информативную оценку с помощью технических средств измерений. Варьируемыми технологическими параметрами являются: давление ультраструи, скорость подачи и расстояние от фокусирующей трубки до поверхности объекта с ФП.
2. Осуществление гидроскрайбирования поверхности объекта контроля при подобранных рациональных технологических параметрах.
3. Численная оценка информативных геометрических параметров гидрокаверны методами микроскопии и профилометрии, структуризация полученных данных с последующей фиксацией их в диагностической базе данных.
4. Проведение анализа информативных диагностических признаков, полученных в результате гидроскрайбирования поверхности объекта контроля с ФП.
5. Сопоставление полученных в результате выполнения пункта 4 значений с информацией, содержащейся в базе данных для образцов-свидетелей для данного типа ФП.

6. Вынесение заключения о состоянии исследуемого объекта контроля.

Проведенные исследования позволили сделать вывод, что предложенный методологический аппарат инженерной методики определения показателей качества функциональных покрытий по результатам воздействия на них высокоскоростной гидроструи обладает необходимым значимым потенциалом для применения и развития в машиностроении, что позволит значительно сократить этап конструкторско-технологической подготовки производства деталей и узлов с покрытиями.

На основе вышеизложенного следует, что предложенная научно-практическая реализация сформулированных положений обуславливает включение УСД в ряд современных методов и средств обеспечения качества, повышения эффективности, оперативности и достоверности испытаний тонких функциональных покрытий на этапе технологической подготовки производства.



Рис. 9. Инженерная методика установления показателей качества ФП по результатам воздействия на них высокоскоростной гидроструи

Основные выводы и результаты

1. Показано, на основе применения теории принятия решений, что использование высокоскоростной гидроструи для оценки показателей качества ФП является перспективным инструментом диагностического воздействия, однако, в

настоящее время отсутствует необходимая методическая база и практические рекомендации по развитию и внедрению этого метода на практике.

2. Проведена оценка эффективности использования ультразвука в диагностических целях методом экспертных оценок, основанным на методе взвешенной суммы с использованием специальных критериев оценки. Проведенная экспертная оценка показала высокую эффективность предлагаемого метода.

3. Выявлено, что разработанные математические модели взаимодействия высокоскоростной гидроструи с образцом из стали, имеющим функциональное покрытие, позволяют осуществить оперативную оценку факторов, влияющих на характер его разрушения. На основе результатов моделирования и данных экспериментов следует, что значительное влияние на эксплуатационные показатели ФП оказывают физико-механические характеристики подложки, прежде всего ее твердость.

4. Теоретически установлено и экспериментально подтверждено наличие связи между интенсивностью процесса гидроэрозии ФП и их поврежденностью по результатам математического моделирования процесса высокоскоростного взаимодействия высокоскоростной гидроструи с бездефектными и дефектными ФП при двумерной осесимметричной постановке задачи.

5. Теоретически установлено и экспериментально определено начало процесса зарождения и распространения магистральных трещин в ФП, приводящих к интенсификации процесса их гидроэрозионного разрушения, по достижении $6 \cdot 10^4$ циклов знакопеременного симметричного усталостного нагружения.

6. Установлены корреляционные зависимости между глубиной гидрокаверны, образованной после воздействия высокоскоростной гидроструи и информативными критериями метода фрикционных испытаний: коэффициентом трения и временем до полного истирания в диапазоне от 0,85 до 0,98 на основе данных экспериментальных исследований образцов с ФП, имеющих различную поврежденность.

7. Выявлена феноменологическая модель механизма гидроэрозионного разрушения приповерхностного слоя образцов с ФП, позволившая сделать вывод о том, что в результате высокоскоростного струйного воздействия обеспечивается необходимая информативность метода УСД и возможность получения достоверной информации об эксплуатационно-технологических параметрах ФП.

8. Разработана инженерная методика и сформулированы практические рекомендации по использованию высокоскоростной гидроструи для установления эксплуатационно-технологических характеристик ФП.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В РАБОТАХ.

1. Абашин М.И., Хафизов М.В., Проваторов А.С. Разработка методики ультразвуковой диагностики эксплуатационно-технологических характеристик поверхностного слоя материала изделий РКТ // Молодежный научно-технический вестник. 2012. № 10. С. 11. (0,98 п. л. / 0,6 п. л.).
2. Установление зависимости глубины гидроиндентирования от числа циклов нагружения для образцов с покрытиями /А.С. Проваторов [и др.] //В

- сборнике: Высокие технологии в машиностроении. Материалы всероссийской научно-технической интернет-конференции. 2013. С. 47-49. (0,25 п. л. / 0,1 п. л.).
3. К вопросу разработки научно-методической базы получения и диагностики наноструктурных покрытий /А.С. Проваторов [и др.] //Наноинженерия. 2014. № 5 (35). С. 23-27. (0,5 п. л. / 0,25 п. л.).
 4. Моделирование процесса диагностики наноструктурированных покрытий адгезиометром и ультразвуковым методом /А.С. Проваторов [и др.] // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П. А. Соловьева. 2014. № 4 (31). С. 9-16. (0,86 п. л. / 0,4 п. л.).
 5. Модернизация технологии оценки эксплуатационных динамических свойств композиционной конструкционной керамики путём использования гидроабразивной ультразвуки /А.С. Проваторов [и др.] //Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. № 3. С. 15-23. (0,98 п. л. / 0,2 п. л.).
 6. Кременецкий Н.О., Левкин А.А., Проваторов А.С. Применение метода экспертных оценок при обосновании инновационно-диагностического потенциала физико-технологических воздействий // Молодежный научно-технический вестник. 2015. № 6. С. 10. (0,74 п. л. / 0,4 п. л.).
 7. Моделирование ультразвукового воздействия для контроля качества покрытий /А.С. Проваторов [и др.] //Физическая мезомеханика. 2015. Т. 18. № 1. С. 84-89. (0,6 п. л. / 0,3 п. л.).
 8. Способ контроля и диагностики устойчивости покрытия к действию внешних нагрузок: Патент России № 2583332 / Бочкарев С.В., Цаплин А.И., Петроченков А.Б., Галиновский А.Л., Барзов А.А., Проваторов А.С., Павлов А.М., Елисеев А.Н., Хафизов М.В., Абашин М.И.; заявл. 12.01.2015; опубл. 10.05.2016. Бюл. № 13 (0,54 п. л. / 0,2 п. л.)
 9. Создание систем автоматизированного проектирования контрольно-диагностических и испытательных операций /А.С. Проваторов [и др.] //Политехнический молодежный журнал. 2017. № 7 (12). С. 3. (1,23 п. л. / 0,5 п. л.).
 10. Галиновский А.Л., Проваторов А.С. Определение эксплуатационно-технологических характеристик наноструктурированных покрытий по результатам воздействия на них высокоскоростной гидроструи // В сборнике: Ключевые тренды в композитах: наука и технологии. сборник материалов Международной научно-практической конференции. 2019. С. 137-141. (0,49 п. л. / 0,3 п. л.).
 11. Barzov A.A., Galinovsky A.L., Provatorov A.S. The information-physical mechanism of diagnostic of the functional coatings erosive wear by water jet //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2019. Vol. 683, Issue 1. Art.no 012028. (1 п. л. / 0,5 п. л.).
 12. Фрикционные и ультразвуковые испытания функциональных покрытий / А.С. Проваторов [и др.] // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2022. №2. С. 103-112. (0,56 п. л. / 0,25 п. л.).