

На правах рукописи

УДК 621.9.048.7

АБАШИН МИХАИЛ ИВАНОВИЧ

**УСКОРЕННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА
ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ МАТЕРИАЛА ИЗДЕЛИЙ ПО
РЕЗУЛЬТАТАМ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА НЕГО СВЕРХЗВУКОВОЙ СТРУИ
ЖИДКОСТИ**

Специальности:

05.02.08 – Технология машиностроения;

05.02.11 – Методы контроля и диагностика в машиностроении

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2013

2

Работа выполнена в Московском государственном техническом
университете имени Н.Э. Баумана

Научный руководитель: **ГАЛИНОВСКИЙ Андрей Леонидович**,
доктор педагогических наук, кандидат технических
наук, доцент

Официальные оппоненты: **БАРСУКОВ Геннадий Валерьевич**,
доктор технических наук, профессор,
Государственный университет — учебно-научно-
производственный комплекс, начальник
управления инновационных проектов и
производств (г. Орел);
МАСЛОВ Борис Георгиевич,
кандидат технических наук, доцент,
Московский государственный технический
университет имени Н.Э. Баумана, доцент
(г. Москва)

Ведущая организация: **ОАО НПО «Центральный научно-
исследовательский институт технологии
машиностроения» (ОАО НПО «ЦНИИТМАШ»)**,
г. Москва

Защита состоится «13» сентября 2013 г. на заседании диссертационного
совета Д 212.141.06 в Московском государственном техническом
университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул.,
дом 5, стр.1.

Ваш отзыв на автореферат в 1-м экземпляре, заверенный печатью,
просим направить по указанному адресу.

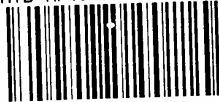
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского
государственного технического университета имени Н.Э. Баумана.

Телефон для справок 8 (499) 267-09-63

Автореферат разослан «13» февраля 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.141.06
доктор технических наук,
доцент

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



2017959

Абашин М. И. Ускоренное опре

— 930

Михайлов Валерий Павлович

2013

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований. В настоящее время технологии гидро- и гидроабразивного резания (ГАР) получают все большее распространение в современном машиностроении. Как показал анализ, это связано с рядом достоинств данной технологии, среди которых следует отметить широкую номенклатуру обрабатываемых материалов.

Современные исследования в основном направлены на решение вопросов модернизации элементов технологического оборудования и оптимизацию режимов гидрорезания, т.е. они ориентированы на развитие традиционных технологий ГАР. Однако в ряде работ отмечается, что среди возможных областей применения гидроструйных технологий могут быть такие как упрочнение и очистка поверхностного слоя, обработка гидротехнологических сред, получение суспензий.

В последнее время на кафедре технологий ракетно-космического машиностроения МГТУ им. Н.Э. Баумана появились отдельные работы, иллюстрирующие принципиальную возможность получения технологической информации о параметрах состояния поверхностного слоя путем воздействия на него высокоскоростной струи жидкости (ультраструи), плотность потока мощности в которой сравнима с лазерным излучением и составляет порядка $0,5 \text{ МВт/мм}^2$.

Несмотря на недостаточное в настоящее время теоретическое и методическое обеспечение для практической реализации данной технологии, исследования, проведенные с применением метода экспертного оценивания, показали, что технология ультразвуковой диагностики является перспективной и обладает большим научно-техническим и практическим потенциалом.

В связи с этим, задача по реализации инновационно-технологического потенциала в сфере получения оперативной информации о параметрах качества поверхностного слоя материала изделий является **актуальной**, имеет научное и практическое значение.

Под ультразвуковой технологической диагностикой (УСД) будем понимать получение информации о техническом состоянии объекта исследования на основании анализа характеристик гидроэрозионного разрушения его поверхности ультразвуковой жидкостью. Данная диагностическая технология рассматривается в качестве составляющей ультразвуковой технологии как совокупности методов и средств создания и реализации параметров компактной высокоэнергетической струи жидкости, которая при взаимодействии с окружающей средой, в частности, ударном торможении о твердую поверхность, создает фиксируемые изменения в материале мишени. При этом, основой всех ультразвуковых технологий является технологическое оборудование, применяемое для ГАР, и соответствующие ему технологические параметры (рабочее давление от 300 до 600 МПа, скорость струи в пределах от 300 до 1000 м/с) и режимы.

Целью диссертационной работы является разработка инженерной методики ускоренного определения эксплуатационно-технологических и физико-механических характеристик поверхностного слоя материалов и изделий машиностроения путем анализа результатов воздействия на него высокоскоростной гидроструи.

Основные задачи исследования

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие основные задачи:

1. Провести анализ различных видов технологического воздействия с позиций получения диагностической информации о состоянии поверхностного слоя объекта контроля, обосновать методическую базу исследований.
2. Проанализировать специфику механизма гидроэрозионного разрушения сверхскоростной струей жидкости поверхностного слоя объекта воздействия и на этой основе осуществить моделирование данного процесса с целью определения информативных признаков ультразвуковой технологической диагностики.
3. Осуществить экспериментальную оценку результативности применения исследуемого способа ультразвуковой диагностики для определения физико-механических характеристик поверхностного слоя изделий, сопоставить полученные результаты с теоретическими данными.
4. Разработать рекомендации по практическому применению результатов исследований, осуществить их промышленную апробацию.
5. Наметить перспективы развития и пути совершенствования методики ультразвуковой технологической диагностики.

Научной новизной исследования является теоретически обоснованное и экспериментально подтвержденное положение о наличии однозначной связи физико-механических характеристик поверхностного слоя материала объекта контроля с параметрами его гидроэрозионного разрушения сверхзвуковой струей жидкости, что позволяет путем анализа параметров гидроразрушения поверхностного слоя материала получать информацию о его эксплуатационно-технологических и физико-механических характеристиках, в частности: поврежденности, твердости, напряженно-деформированном состоянии и др.

Признаками научной новизны обладают:

1. Экспертно-аналитическое обоснование возможности и целесообразности использования явления ультразвуковой гидроэрозии в качестве физико-технологического воздействия с позиций получения оперативной эксплуатационно-технологической информации о состоянии поверхностного слоя объекта контроля и создания на его базе аппарата ультразвуковой диагностики параметров качества поверхностного слоя материала.
2. На основе результатов моделирования методом конечных элементов установленное соответствие между разрушением материала под действием высокоскоростной струи воды на начальном этапе и механизмом гидроэрозионного разрушения Инжел-Файелла для случая удара капли воды.
3. Доказательство физико-технологического подобия механизма гидроэрозионного разрушения материала изделия процессам изменения его

поврежденности при эксплуатации в условиях нестационарных нагрузок, что отражает его перспективу при использовании для определения поврежденности объекта контроля.

Практическая значимость работы состоит в следующем:

1. Разработана и апробирована в лабораторных условиях инженерная методика ультразвуковой оценки физико-технологических параметров качества материала поверхностного слоя объекта контроля.

2. Сформулированы практические рекомендации по использованию ультразвуковой технологической диагностики изделий ракетно-космического машиностроения и проведена их апробация.

3. Разработанные в диссертации модели воздействия струи на поверхность твердотельной преграды позволяют провести детальный оперативный анализ факторов, влияющих на характер гидроэрозионного разрушения материала преграды, что позволит оперативно проводить оценку эрозионной стойкости материала с целью управления параметрами гидроэрозии.

Методы исследования. В работе использовались теоретические положения технологии машиностроения, теории усталостного и гидроэрозионного разрушения, метод экспертного оценивания, метод конечных элементов, обработка результатов экспериментов проводилась с использованием методов математической статистики и теории факторного анализа. Подготовка к проведению экспериментальных исследований осуществлялась с использованием положений теории планирования эксперимента. Экспериментальные исследования проводились с использованием стандартного и специального оборудования, в частности машины для усталостных испытаний, установки для гидроабразивной резки материалов, электронного сканирующего микроскопа, компьютеризированного профилографа-профилометра, твердомера и др.

На защиту выносятся:

1. Разработанная инженерная методика оценки физико-механических параметров качества поверхностного слоя материала изделий путем кратковременного ультразвукового воздействия на него.

2. Результаты теоретических и экспериментальных исследований, направленных на обоснование возможности определения физико-механических параметров поверхностного слоя материалов путем ультразвукового воздействия на них.

3. Результаты сравнения методом экспертного оценивания перспективности различных видов технологического воздействия с позиций получения требуемой диагностической информации о состоянии поверхностного слоя объекта контроля.

4. Конечно-элементная модель взаимодействия сверхзвуковой струи жидкости с поверхностью преграды в начальный момент времени.

Апробация результатов работы. Основное содержание работы отражено в 24 публикациях, в том числе, в пяти изданиях, рекомендуемых ВАК РФ для опубликования результатов диссертационных исследований на соискание ученой степени кандидата и доктора технических наук.

Вошедшие в диссертационную работу результаты докладывались на Второй и Третьей всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» 2009 г, 2010 г; на 34-х, 35-х, 36-х академических чтениях по космонавтике «Королевские чтения» 2010 г, 2011 г, 2012 г; на Международном молодежном научном форуме-олимпиаде по приоритетным направлениям развития Российской Федерации 2010 г; на 19-й научно-технической конференции молодых ученых и специалистов, посвященной 50-летию полета в космос Ю.А. Гагарина (РКК «Энергия» 2011 г); на 7-й международной научно-технической конференции «Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надежность машин, приборов и оборудования» (ВолГТУ 2012 г). Практические результаты работы использованы при участии в молодежной научно-инженерной выставке «Политехника» и выставке научно-технического творчества молодежи НТТМ 2010.

Реализация и внедрение результатов работы осуществлялось на предприятиях: ОАО «РКК»Энергия», ОАО «НИКИМТ Атомстрой». Данное исследование проводилось в рамках гранта РНПВШ 7.1855.2011 «Разработка и реализация научных основ полифункциональной технологии гидроструйной обработки и диагностики материалов ракетно-космической техники» и гранта РФФИ 12-08-00802-а «Разработка научных основ ультразвуковой диагностики материалов и изделий машиностроения».

Тема и содержание работы **отражены** в 24 научных работах, из них 5 в изданиях из Перечня, рекомендуемого ВАК РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Содержит 153 страницы, в том числе 51 иллюстрация, 27 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение раскрывает сущность исследуемой проблемы, ее актуальность и возможные пути решения, используемые понятия, основные положения, выносимые на защиту, определяющие научную новизну и практическую ценность работы.

В первой главе приведены результаты сравнительного анализа методом экспертного оценивания контрольно-диагностических возможностей технологических методов воздействия на обрабатываемый материал. Представлена краткая классификация методов контроля качества поверхностного слоя материала, рассматриваются и критически оцениваются возможности стандартных методов оценки физико-механических характеристик поверхностного слоя материала деталей.

Также приводится информация о существующих методах технологического воздействия в целях получения диагностической информации об объекте контроля, описываются возможности ультразвуковой гидроакустики.

В результате анализа числа защит диссертаций и опубликованных монографий по тематике, связанной с технологиями и оборудованием механической и физико-технологической обработки материалов, был выявлен существенный рост интереса к технологии ГАР за последние 10 лет. При этом исследования ученых в данных публикациях в основном направлены на совершенствование оборудования и новые конструктивно-технологические решения (Р.А. Тихомиров, Е.Н. Петухов, М. Hashih и др.), оптимизацию режимов резания (В.А. Тарасов, Г.В. Барсуков и др.), обеспечение стойкости струеформирующих элементов установок ГАР (Я.Ю. Яблуновский и др.). Однако, как показывает предварительный анализ, область применения данной технологии имеет более широкие возможности и научно-технический потенциал. Среди возможных областей применения, помимо традиционных технологий, отмечается гидроочистка поверхностей от загрязнений водоледяными струями (М.А. Бурнашов и др.), гидромодификация поверхности, получение микросuspензий (Н.Н. Сысоев, В.С. Пузаков и др.).

Следует отметить, что существенный вклад в развитие технологий оценки и обеспечения качества поверхностного слоя внесли такие ученые как А.Г. Суслов (оценка геометрических параметров поверхностного слоя деталей), Е.Е. Зорин, А.А. Хлыбов (оценка поврежденности), А.А. Дубов (оценка физико-механических характеристик поверхностного слоя методом магнитной памяти металла) и др.



Рис. 1. Принципиальная структурная схема гидродиагностирования

Анализ возможностей гидроструйных технологий открывает перспективы для ее реализации и создания на ее базе аппарата ускоренного определения параметров качества поверхностного слоя материала. В связи с этим, рассматриваемая гипотеза о возможности использования ультраструи в диагностических целях требует системной научно-методической проработки, обладает **актуальностью** и практической полезностью. Структурная схема гидродиагностирования, отражающая данную гипотезу, представлена на рис.1.

В заключении главы сформулирована цель и задачи исследования.

Вторая глава посвящена вопросам методического обеспечения проводимых исследований по определению зависимости характеристик гидроэрозионного разрушения материала от параметров качества поверхностного слоя исследуемого изделия. В частности, в главе используются возможности метода экспертного оценивания (МЭО) с целью определения методической базы исследований процесса УСД и обсуждается гипотеза об использовании ультразвукового технологического воздействия в качестве средства диагностирования. Также представлен обзор используемого технологического оборудования и аппаратуры, методические особенности проведения экспериментов и обработки опытных данных.

Экспериментальные исследования по определению параметров качества поверхностного слоя материала деталей проводились в Дмитровском филиале МГТУ им. Н.Э. Баумана на промышленной установке гидроабразивной резки MultiCam с насосной станцией высокого давления KMT мультипликаторного типа производства США. Данная установка оснащена системой ЧПУ, с точностью позиционирования режущей головки 0,025 мм. Насосная станция мощностью 37 кВт позволяет работать при давлении жидкости до 410 МПа.

Измерение геометрических характеристик гидрокаверны производилось при помощи компьютеризированного профилографа-профилометра производства НИИ «Измерения» (г. Москва). Дальнейшие измерения твердости производились при помощи портативного твердомера МЕТ-УД (г. Зеленоград) с динамическим датчиком.

В теоретической части работы при построении математических моделей методом конечных элементов было использовано программное обеспечение Ansys AutoDyn версии 6.1.

Для проведения экспериментальных исследований по определению зависимости параметров гидроэрозионного разрушения от поврежденности материала (числа циклов нагружения) потребовалось спроектировать и создать машину для проведения испытаний на усталость в условиях жесткого нагружения при симметричном цикле напряжения в условиях изгиба. Спроектированный электронный блок управления данной машиной позволяет выставлять требуемое число циклов нагружения, отображать в реальном масштабе времени количество отработанных и оставшихся циклов, производить отключение исполнительного механизма в случае разрушения образца или неисправности электрической схемы.

Для обоснования результативности применения ультразвукового воздействия в качестве средства диагностики применялся МЭО. В частности, выполнено сравнение различных видов технологического воздействия с целью получения диагностической информации о состоянии поверхностного слоя материала объекта воздействия. Этапами сравнения было: определение минимального количества членов экспертной группы, необходимого для обеспечения достоверности проведения экспертизы, обработка экспертных анкет с использованием метода взвешенной суммы и оценка результатов путем расчета коэффициентов конкордации для каждого рассмотренного вида технологического воздействия.

Анализ полученных при экспертизе данных показал, что наиболее важными критериями оценки результативности применения того или иного вида технологического воздействия в качестве диагностического являются информативность и соответствие вида воздействия реальным условиям эксплуатации. Исходя из этих критериев, наиболее результативными эксперты признали механическое и ультразвуковое воздействие.

Экспериментальные исследования проводились с целью установления и выбора информативных признаков и определения рациональных режимов УСД.

Третья глава посвящена теоретическому исследованию и описанию процесса ультразвуковой гидроэрозии (УСГ). В результате проведенного математического моделирования было установлено сходство механизма гидроразрушения твердой преграды под действием струи жидкости известному ранее механизму гидроэрозии Инджел-Файелла для случая удара капли жидкости. Предложена и обоснована структура математической модели процесса ультразвуковой гидроэрозии и приведен анализ факторов, влияющих на процесс УСГ.

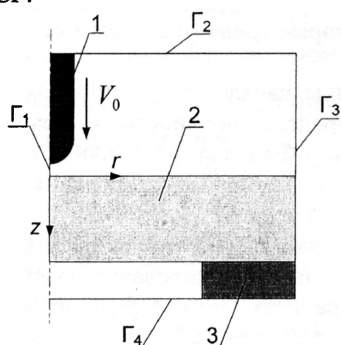


Рис. 2. Постановка задачи моделирования

1 – струя воды с начальной скоростью V_0 ;
2 – преграда из стали 20;
3 – стальная опора.

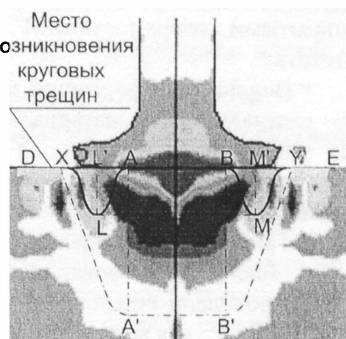


Рис. 3. Сравнение результатов моделирования с известным механизмом Инджел-Файелла

Для моделирования условий разрушения в металлических элементах конструкции принято два критерия – прочностной и деформационный. Согласно первому из них, отрывные разрушения в материале происходят при выполнении прочностного критерия вида $\sigma_i \geq \sigma_p^*$, где σ_i – интенсивность напряжений, σ_p^* – откольная прочность материала. Согласно второму критерию, разрушение материала происходит при достижении интенсивностью деформаций своих критических значений $\epsilon_i \geq \epsilon^*$. Здесь ϵ^* – критическая деформация.

Уравнения состояния для металлов принимались в форме линейной баротропной зависимости давления от плотности $p = K(\rho/\rho_0 - 1)$. Здесь ρ_0 – начальная плотность; K – модуль объемного сжатия, принимаемый для стали 175 ГПа. Уравнение состояния воды принималось в виде полиномиальной зависимости давления от плотности:

$$p = A_1\mu + A_2\mu^2 + A_3\mu^3 + (B_0 + B_1\mu) \cdot \rho_0 e \quad \text{при } \mu \geq 0;$$

$$p = T_1\mu + T_2\mu^2 + B_0 \cdot \rho_0 e \quad \text{при } \mu < 0,$$

где $\mu = \rho/\rho_0 - 1$; ρ , $\rho_0 = 1 \text{ г/см}^3$ – текущая и начальная плотности соответственно. Коэффициенты уравнения состояния воды принимали следующие числовые значения: $A_1 = 2,2 \text{ ГПа}$, $A_2 = 9,54 \text{ ГПа}$, $A_3 = 14,57 \text{ ГПа}$, $B_0 = 0,28$, $B_1 = 0,28$, $T_1 = 2,2 \text{ ГПа}$, $T_2 = 0$.

В качестве граничных условий использовались следующие. В области контактного взаимодействия струи с преградой накладывались ограничения на скорость индивидуальных точек в направлении оси OZ в соответствии с условиями непроницаемости материала, а также на напряженное состояние, реализующееся в этих точках в соответствии с третьим законом Ньютона.

Из уравнений движения следует, что это может быть реализовано только при отсутствии касательных напряжений на оси симметрии ($\sigma_{rz} = 0$).

При решении задачи на неподвижной сетке область интегрирования ограничена: слева осью симметрии ($\Gamma 1$ на рис. 2); сверху, справа, снизу – открытыми поверхностями ($\Gamma 2$, $\Gamma 3$, $\Gamma 4$), через которые среда может вытекать или втекать.

Величина деформаций и возможные причины начала разрушения связаны со сжимаемостью материала и зависят от предела прочности на разрыв. Из рис. 3 видно, что поля напряжений Инджел-Файелла идентичны полям напряжений, полученным в результате математического моделирования, что позволяет говорить об адекватности математической модели.

Также с целью проверки адекватности конечно-элементной модели и для дальнейшего использования полученных данных при ранжировании факторов было проведено численное моделирование удара струи о преграду из стали 37Х2НВМБР, для материала которой варьировалась твердость (для трех режимов термообработки). Скорость струи составляла 350 м/с. Результаты (рис. 4) показали, что с ростом твердости уменьшается глубина гидрокаверны. Данные результаты согласуются с экспериментальными данными, описанными в четвертой главе.

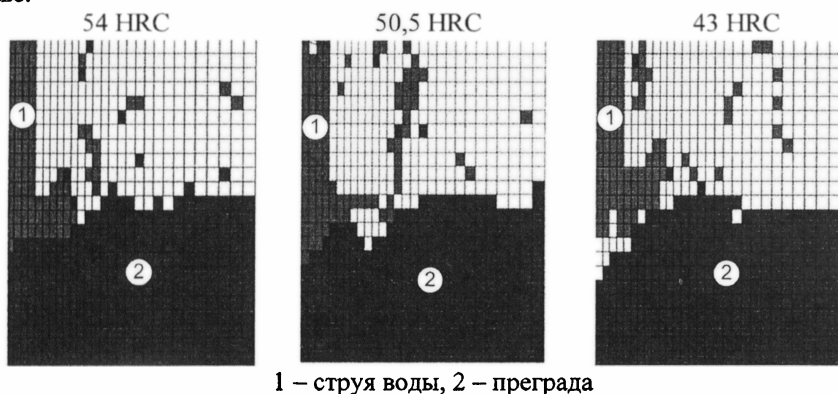


Рис. 4. Результаты численного моделирования

Также в главе был предложен общий вид уравнения факторной модели. Для явления явления УСГ используется физический подход для основных членов модели и эмпирический – для описания факторов. Для построения математической модели был проведен предварительный анализ факторов и их кирование по значимости, в результате была сформирована структура модели, ощая полиномиальный вид. Уравнение состоит из двух частей: в левой части аны члены, относящиеся к струе, в правой – к мишени.

$$P_w + \sum_i k_i^c \cdot f_i^c(x_i^c, u_1, u_2, \dots, u_m) = \sigma_b + \sum_j k_j^m \cdot f_j^m(x_j^m, u_1, u_2, \dots, u_m) + \epsilon,$$

P_w – гидроконттактное давление ультраструи; σ_b – предел прочности риала мишени; ϵ – ошибка модели (шум вследствие неконтролируемых или тенных факторов)

$$\epsilon = f(x_1^c, x_2^c, \dots, x_i^c, x_1^m, x_2^m, \dots, x_i^m, u_1, u_2, \dots, u_m);$$

- функция i -го фактора влияния свойства ультраструи; x_i^c – i -ый фактор ния свойства ультраструи; f_j^m – функция j -го фактора влияния свойства ени; x_j^m – j -ый фактор влияния свойства мишени; k_i^c – коэффициент влияния фактора свойства ультраструи на характеристики гидроэрозии; k_j^m – фициент влияния i -го фактора свойства мишени на характеристики оэрозии; u_m – условие эксперимента.

Особенность явления УСГ состоит в том, что оно является многофакторным ю количеству независимых варьируемых параметров и условий эксперимента, и по спектру параметров функции отклика. Как показывают ериментальные исследования, можно выбрать такой фактор, которому будет ветствовать определенная функция отклика, однозначно связанная с деляемым параметром преграды. Функция отклика в данном случае упает в роли информативного признака.

В четвертой главе обсуждаются проведенные экспериментальные едования и их результаты по определению зависимости характеристик оэрозионного разрушения от параметров качества поверхностного слоя риала изделий.

Для экспериментальной проверки гипотезы о возможности оценки очного ресурса изделий были подготовлены образцы типа IV по Т 25.502-79 из стали 12Х17, подвергнутые усталостным испытаниям. Первый зец доводился до разрушения, фиксировалось число циклов нагружения, и саждаго последующего образца оно уменьшалось на 10%. Полученные таким обом образцы были подвергнуты УСД вдоль линии, лежащей на поверхности едуемого объекта (гидроскрайбированию), в результате которого едовались параметры эрозионного разрушения их поверхности и определялся массы материала. Из графиков (рис. 5) видно, что наблюдается высокая еляция числа высоты валика пластического оттеснения с числом циклов ужения.

Для УСД с целью установления зависимости характеристик гидрокаверны от твердости были взяты образцы, изготовленные из стали 37Х2НВМБР, прошедшие термообработку на различных технологических режимах. Было произведено гидроскрайбирование поверхности изготовленных образцов и выполнен замер геометрических характеристик гидрокаверны (рис. 6). В результате анализа полученных данных был установлен факт уменьшения глубины гидрокаверны при увеличении твердости материала образца, что не противоречит логике решаемой задачи. Рассчитанный коэффициент ранговой корреляции по Спирмену составил $P=-0,94$, а коэффициент линейной корреляции составил $R=-0,96$.

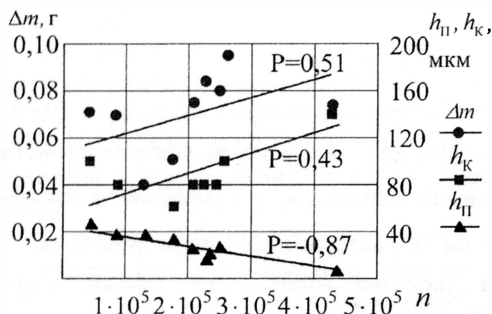


Рис. 5. Графики зависимости изменения массы Δm , глубины гидрокаверны h_K высоты валика пластического оттеснения h_{II} при ультразвужном воздействии в зависимости от числа циклов нагружения n

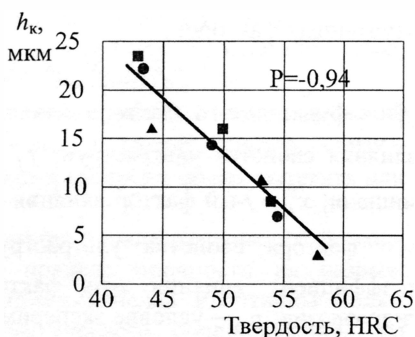


Рис. 6. Зависимость глубины образовавшейся гидрокаверны h_K от твердости образца

В главе также представлены результаты экспериментов, демонстрирующие, что УСД также применима для оценки эксплуатационных свойств материала, подвергнувшегося термо-механическому нагружению. Для эксперимента использовалась лопатка газотурбинного двигателя, прошедшая огневые испытания, и материал лопатки в состоянии поставки. На образце материала был подобран эффективный режим воздействия, затем было осуществлено гидроскрайбирование лопатки с внешней и внутренней стороны (рис.7). Наиболее нагруженная в процессе огневых испытаний внутренняя сторона лопатки имеет самую большую глубину гидрокаверны, в то время как на внешней стороне данный параметр в три раза меньше. При этом на материале в состоянии поставки гидрокаверна практически не идентифицируется. Данные измерения приведены в табл. 1.

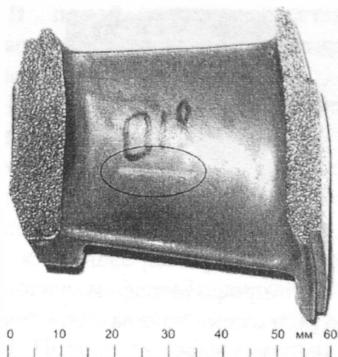


Рис. 7. Лопатка газотурбинного двигателя после огневых испытаний

Таблица 1.
Глубина образовавшейся гидрокаверны

Внутренняя сторона, мм	0,4550
Внешняя сторона, мм	0,1510
Материал в исходном состоянии, мм	0,010

С целью проверки гипотезы о возможности использования УСД для определения напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя материала были изготовлены образцы из алюминиевого сплава Д16, и часть из них подвергнута одноосному растяжению. После чего выполнялось гидроскрайбирование поверхности образца, также осуществлялось точечное ультразвуковое воздействие. В результате обработки экспериментальных данных было установлено, что ширина гидрокаверны, направленной вдоль линии действующих напряжений растяжения шире, по сравнению с гидрокаверной, полученной в поперечном направлении относительно линии действующих напряжений. При точечном воздействии струей форма гидрокаверны на растянутом образце имеет эллиптическую форму, с большой полуосью, направленной поперек линии действующих напряжений, в то время как гидрокаверна на нерастянутом образце имеет круглую форму. Из чего можно сделать вывод о возможности использования УСД для определения напряженно-деформированного состояния.

Четвертая глава также содержит результаты экспериментов по оценке возможности использования УСД для контроля качества сварных швов. На рис. 8 представлены изображения поперечного среза стыкового сварного шва, выполненного ручной дуговой сваркой, с обозначенными на нем точками замера твердости по ГОСТ 69960-66 (рис. 8, слева) и схемой трассирования профилографом-профилометром (рис. 8, справа), выполненной по результатам проведенного гидроскрайбирования поверхности среза. Об однородности сварного шва можно судить по зависимости глубины гидрокаверны от твердости. Судя по низкой корреляции твердости и глубины образовавшейся гидрокаверны (рис. 9), можно сделать вывод о низкой однородности материала шва, что подтверждено данными лабораторных исследований. Также была обнаружена связь между ударной вязкостью материала и глубиной образовавшейся гидрокаверны (рис. 10). Коэффициент линейной корреляции составил $R=-0,96$.

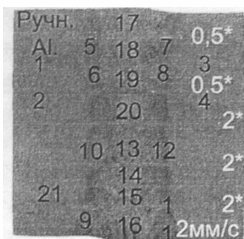


Схема точек замера твердости
(по ГОСТ 69960-66)

Рис. 8. Фотографии поперечного среза сварного шва

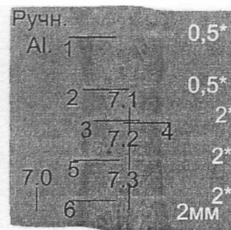


Схема трассирования
профилографом

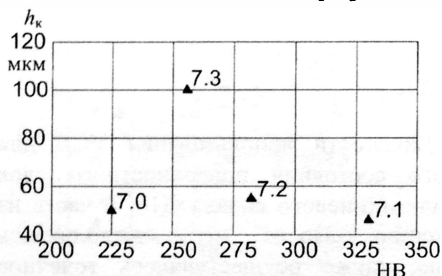


Рис. 9. Зависимость глубины
гидрокаверны от твердости по точкам
замера

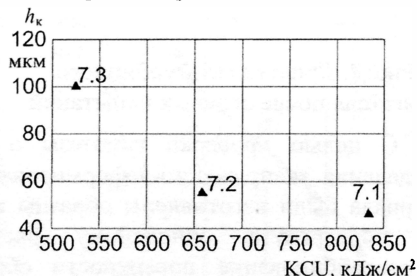


Рис. 10. Зависимость глубины
гидрокаверны от коэффициента
ударной вязкости

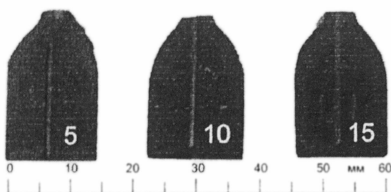


Рис. 11. Фотографии азотированных
образцов после усталостных
испытаний и гидроскрайбирования

Таблица 2.

Параметры образцов

Время азотирования, ч	Площадь сечения гидрокаверны, мм ²
5	364342
10	356954
15	305515

Также ультразвуковой диагностике были подвергнуты 3 образца (параметры представлены в табл. 2) с различной толщиной азотированного слоя, прошедшие усталостные испытания и подвергнутые гидроскрайбированию (рис. 11). Значение тройственной корреляции между площадью образовавшейся гидрокаверны, толщиной азотированного слоя и количеством циклов нагружения до разрушения составило 0,973. Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод о наличии прямой выраженной связи между площадью поперечного сечения гидрокаверны, толщиной азотированного слоя и количеством циклов нагружения.

В пятой главе представлена разработанная инженерная методика ультразвукового гидродиагностирования и технологические рекомендации по осуществлению процесса УСД.

В результате проведенных экспериментальных и теоретических исследований была построена инженерная методика ускоренной оценки параметров качества поверхностного слоя материала деталей (рис. 12). Основой структуры методики является блок модельного эксперимента, направленного на заполнение базы данных, и блок оценки параметров качества. Реализация данной методики на практике позволит получать оперативную информацию о физико-технологических свойствах диагностируемого с помощью средств УСД объекта. Суть методики состоит в реализации следующих пунктов.

1. Подобрать эффективный режим воздействия струи на исследуемый образец, не подвергавшийся эксплуатационным нагрузкам. Образец должен быть выполнен из того же материала, что и исследуемый объект и обладать близкой шероховатостью поверхности.

(Примечание – эффективность заключается в сочетании рабочего давления струи, подачи режущей головки и диаметра гидросопла, такого, чтобы глубина образовавшейся гидрокаверны и другие ее параметры были максимально удобны и информативны для дальнейшей оценки).

2. На выбранном ранее режиме провести гидроскрайбирование поверхности ряда образцов, подверженных известному воздействию.

3. Провести оценку и обработку полученных данных с целью их систематизации.

4. На выбранном ранее режиме произвести гидроскрайбирование поверхности исследуемого объекта с целью получения диагностической информации о нем.

5. Выполнить анализ информативных признаков, полученных в результате ультразвукового воздействия.

6. Сопоставить полученные ранее в п. 2, 3 данные с данными исследуемого объекта.

7. Сделать заключение о состоянии исследуемого объекта.

Примечание. Необходимо отметить, что некоторые виды сталей обладают способностью к упрочнению в результате действия эксплуатационных нагрузок. Этот факт необходимо учитывать при прогнозировании остаточного ресурса объекта исследования.

Выполненный анализ показал, что предлагаемый методологический аппарат ультразвукового определения и оценки параметров качества поверхностного слоя конструкционных материалов и функциональных покрытий обладает необходимым потенциалом развития.

В связи с этим научно-практическая реализация вышесформулированных положений в значительной степени позволит УСД войти в ряд современных методов и средств обеспечения качества, повышения оперативности и достоверности испытаний перспективных материалов и новых изделий в различных отраслях промышленного производства.

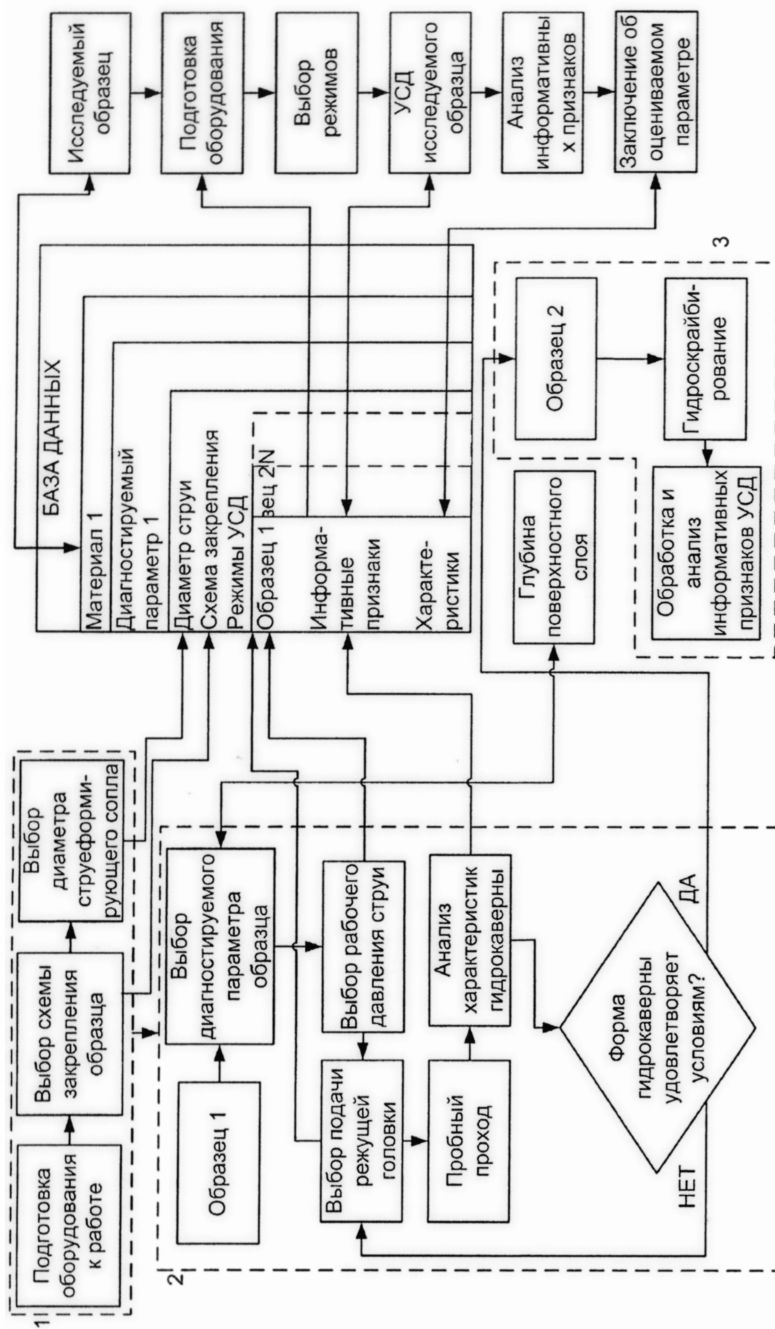


Рис. 12. Структурная схема инженерной методики ускоренного определения параметров качества поверхностного слоя материала деталей

В заключении сформулированы основные выводы диссертационной работы:

1. Методом экспертного оценивания показано, что ультразвуковое технологическое воздействие является перспективным методом ускоренного определения эксплуатационно-технологических параметров поверхностного слоя материала изделий, однако, в настоящее время оно не развито вследствие отсутствия необходимого методического и экспериментального обеспечения.

2. Построена факторная модель влияния технологических условий диагностирования на выходные параметры гидроэрозионного разрушения, что позволяет установить однозначную связь с эксплуатационно-технологическими и физико-механическими характеристиками поверхностного слоя материала изделий.

3. Предложен общий вид факторной модели ультразвуковой гидроэрозии и на основе проведенного теоретического и экспериментального исследования представлены критерии, по которым можно судить о параметрах качества поверхностного слоя материала изделий путем анализа характеристик гидроэрозионного разрушения.

4. Разработано технологическое и методическое обеспечение для достоверного определения параметров качества поверхностного слоя материала изделий, включающее в себя набор информативных признаков гидроэрозии и методику их измерения.

5. Впервые проведены экспериментальные исследования по определению поврежденности образца по параметрам ультразвуковой гидроэрозии на примере анализа геометрических характеристик гидрокаверн образцов из стали 12X17, подвергнутых известному количеству циклов нагружения, что позволит производить достоверную оценку состояния изделий, подвергающихся знакопеременным нагрузкам на этапе отработки и заводских испытаний.

6. Впервые проведены экспериментальные исследования по оценке поврежденности металла лопатки газотурбинного двигателя после огневых испытаний в сравнении с материалом в состоянии поставки, что позволит прогнозировать возможную наработку на отказ такой дорогостоящей и ответственной детали ракетного двигателя, как ротор турбонасосного агрегата, на этапе отработки и заводских испытаний.

7. Установлены корреляционные зависимости между глубиной образовавшейся в результате ультразвукового воздействия гидрокаверны и твердостью испытуемого материала, что также подтверждается результатами математического моделирования методом конечных элементов.

8. Впервые проведены экспериментальные исследования, демонстрирующие эффективность использования аппарата ультразвуковой диагностики для оценки качества образцов сварных швов, что позволит сократить время на этапе технологической подготовки производства при подборе режимов сварки.

9. Выработаны рекомендации по использованию аппарата ультразвуковой диагностики для определения параметров качества поверхностного слоя

материала изделий ракетно-космической техники на этапе технологической подготовки производства.

10. В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований была создана инженерная методика оценки параметров качества поверхностного слоя материала деталей структурно состоящая из двух блоков: модельного эксперимента с образцами, характеристики которых заранее известны, направленного на заполнение базы данных, и непосредственно блока оценки параметров качества поверхностного слоя материала детали. Реализация данной методики на практике позволит получать оперативную информацию о физико-технологических свойствах поверхностного слоя объекта исследования.

11. Намечены пути развития технологии ультразвуковой оценки в области контроля и испытания функциональных покрытий, в направлении создания и совершенствования модели ультразвуковой гидроэрозии.

Приложение включает материалы, не вошедшие в основные разделы работы.

Основные результаты диссертационной работы отражены в 24 научных работах, среди которых, 5 из Перечня, рекомендуемого ВАК РФ. Тема диссертации полностью отражена в следующих основных научных работах:

1. Абашин М.И. Возможности экспресс-оценки информационно-диагностических параметров изделий ультразвуковым методом //Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2011. №288. С. 129-133.

2. Абашин М.И., Хафизов М.В. Механизмы гидроэрозионного разрушения твердотельной преграды// Наука и образование. Электронное научно-техническое издание. 2011. №10. С. 67-67.

3. Абашин М.И., Барзов А.А., Галиновский А.Л. Факторная модель ультразвуковой гидроэрозии// Известия вузов. Машиностроение. 2012. №10. С. 63-68.

4. Абашин М.И., Барзов А.А., Галиновский А.Л. Анализ физико-технологических особенностей процесса ультразвуковой диагностики //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Естественные науки. 2012. специальный выпуск №6. С. 7-18.

5. Ультразвуковая экспресс-диагностика материалов изделий машиностроения/ М.И. Абашин [и др.]// Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2011. № 123. С. 141-147.

6. Пат. 2465064 RU, МПК B05B1/02. Износостойкое сопло для формирования режущей абразивно-жидкостной струи/ М.И. Абашин [и др.] (RU). заявл. 30.12.2010; опубл. 27.10.2012. Бюл. №30 //Изобретения. Полезные модели.