

На правах рукописи

УДК 621.9.048.7

ХАФИЗОВ Максим Васильевич

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЛЬТРАСТРУЙНОЙ
ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ
МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ**

Специальность: 05.02.08 – Технология машиностроения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук



Москва, 2015

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

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Галиновский Андрей Леонидович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, доцент **Барсуков
Геннадий Валерьевич**, ФГБОУ ВО
«Приокский государственный университет»,
заведующий кафедрой конструкторско-
технологическое обеспечение
машиностроительных производств

кандидат технических наук **Яблуновский Ян
Юрьевич**, ОАО «Рыбинский завод
приборостроения», главный технолог

Ведущая организация: **ФГБОУ ВПО «Ижевский государственный
технический университет имени
М.Т. Калашникова»**

Защита состоится « » _____ 2016 г. в _____ на
заседании диссертационного совета Д 212.141.06 при Московском
государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу:
105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д.5., стр.1

Ваш отзыв на реферат в 2-х экземплярах, заверенных печатью, просим
направлять по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского
государственного технического университета имени Н.Э. Баумана и на сайте
www.bmstu.ru.

Телефон для справок 8(499) 267-09-63

Автореферат разослан « » _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.141.06
доктор технических наук,
доцент



Михайлов Валерий Павлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований. Методы ультразвуковой обработки (УСО) материалов в последнее десятилетие уверенно дополняют арсенал современных машиностроительных технологий. В производстве изделий ракетно-космической техники, технологии гидрорезания (ГР) и гидроабразивного резания (ГАР) нашли широкое применение и используются, в частности, для раскроя листового материала, размерной обработки элементов конструкций, изготовления оснастки, бездефектной вырезки образцов для испытаний, фрагментации частей изделий при утилизации. Для всех перечисленных ультразвуковых гидротехнологий актуальными являются задачи выбора рациональных технологических режимов, обеспечивающих максимальную производительность процесса обработки.

Применительно к контролю и диагностике процессов механического резания, лазерной и ультразвуковой обработки на кафедре технологий ракетно-космического машиностроения МГТУ им. Н.Э. Баумана, а также в НИИД, НИЦ «Курчатовский институт» и других научно-исследовательских организациях было показано, что сигналы акустической эмиссии (АЭ) из зоны формообразования несут однозначную информацию об изменениях в условиях протекания доминирующих физических процессов при обработке, в частности разрушения, трения и пластической деформации. Это явилось основой для создания соответствующего информационно-диагностического обеспечения данных технологий, в том числе инженерных методик ускоренного определения рациональных режимов обработки.

Однако отсутствие полномасштабных теоретических и экспериментальных данных об источниках АЭ при УСО, зависимостей параметров АЭ от различных технологических факторов, а также критериев определения рациональных режимов данного способа формообразования, не позволяют в неадаптированном виде использовать имеющуюся методическую базу для решения задач, связанных с технологическим обеспечением УСО методом АЭ. Поэтому создание методики ускоренного определения рациональных режимов и параметров УСО является актуальной задачей, имеющей научное и практическое значение.

Цель работы состоит в повышении эффективности этапа технологической подготовки производства (ТПП) УСО материалов за счет создания инженерной экспресс-методики акустико-эмиссионного определения рациональных режимов обработки.

Задачи исследования:

1. Обосновать результативность использования метода АЭ для выбора рациональных режимов УСО.
2. Определить источники АЭ при УСО и изучить зависимость информативных параметров АЭ от основных технологических режимов, в частности от концентрации абразива, угла взаимодействия ультразвука с поверхностью обрабатываемого материала, условий закрепления заготовки.
3. На основе анализа энергетических превращений при ультразвуковых взаимодействиях и уравнения баланса мощностей, получить физико-технологический критерий, связывающий информативные признаки АЭ и производительность УСО.
4. Для верификации полученного критерия выполнить численное моделирование процессов УСО типовых конструкционных материалов при различных технологических режимах, осуществить экспериментальную проверку полученных результатов, определить влияние технологических режимов на параметры АЭ.
5. Разработать и апробировать инженерную методику ускоренного определения рациональных режимов ГАР в конкретных производственных условиях. Дать практические рекомендации по использованию полученных результатов и наметить перспективы их развития.

Научная новизна работы:

1. Разработана и реализована конечно-элементная модель процесса взаимодействия высокоскоростной гидроабразивной струи с металлической преградой. Модель позволяет анализировать взаимосвязь эрозии поверхности обработки и упруго-волновое возмущение зоны резания в широком диапазоне изменения условий обработки: концентрации абразива, скорости ультразвука, условий закрепления и т.д. Показано, в том числе экспериментально, что волны АЭ являются активным физико-

технологическим фактором, влияющим на интенсивность эрозии обрабатываемого материала и, как следствие, производительность процесса УСО.

2. Обоснована возможность использования 2-х и 3-х мерных конечно-элементных моделей взаимодействия ультраструйных суспензий с поверхностями образцов из различных материалов в зависимости от конкретных условий анализа.

3. На основании результатов теоретического анализа сформулирован физико-технологический критерий, связывающий в единый комплекс энергетические характеристики параметров АЭ и производительность УСО, обусловленную интенсивностью эрозионного разрушения обрабатываемого материала.

Практическая ценность работы:

- разработана инженерная методика ускоренного определения рациональных технологических режимов ГАР материалов по критерию обеспечения максимальной производительности на основе анализа информативных признаков волн акустической эмиссии из зоны обработки;
- даны рекомендации по использованию АЭ для уточнения значения оптимальной концентрации абразива при ГАР, особенно в конкретных производственных условиях, в том числе для типовых перспективных конструкционных материалов и структур: высокопрочной керамики, полимерных композитных материалов, сотовых панелей и т.п.;
- даны предложения по использованию результатов работы в учебном процессе при подготовке специалистов в области технологий механической и физико-технической обработки материалов;

Методы исследования. Экспериментальные исследования проводились на сертифицированном зарубежном и отечественном оборудовании в Дмитровском филиале МГТУ им. Н.Э. Баумана и в Центре гидрофизических исследований физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. В проводимых экспериментах использовались установки для водяной и гидроабразивной резки производства фирм MultiCam WaterJet Systems и Flow с насосными системами мультипликаторного типа производства фирмы КМТ, которые обеспечивают рабочее давление 410 МПа. Для регистрации, записи и обработки сигналов

АЭ использовались 2-х канальная акустическая система «Малахит АС-15А/2» производства ЗАО НПФ «Диатон» при НИЦ «Курчатовский институт» и 4-х канальный осциллограф «АКИП-4110/1» производства «Pico Technology» с широкополосными датчиками - преобразователя акустической эмиссии производства «APC International» с полосой пропускания 40-600 кГц. При решении задач численного моделирования применялся программный комплекс ANSYS. Для металлографических исследований использовался микроскоп МИМ-1600Б.

Для достижения поставленной цели в ходе экспериментальных и теоретических исследований применялся комплексный подход с использованием положений технологии машиностроения, физической акустики, планирования экспериментов и методов конечно-элементного моделирования (МКЭ).

Апробация результатов работы. Основные результаты теоретических и экспериментальных исследований опубликованы в 20-ти научных работах (из них 8 статей в журналах, рекомендованных ВАК РФ), докладывались на 6-х научно-технических конференциях. Исследования проводились в рамках гранта Президента РФ №16.120.11.5069-МД, грантов Российского Фонда Фундаментальных Исследований №12-08-00802-а и №12-08-33022 мол_а_вед, а также проекта №7.1855.2011 целевой программы Министерства образования и науки РФ «Развитие научного потенциала высшей школы». Получены 4 акта апробации инженерной экспресс-методики определения рационального значения концентрации абразива в высокоскоростной гидроабразивной струе (ООО «Старт-РЛ», ООО «МагДжет») и возможностей гидроструйных технологий (ООО «Горстрой», АО «ПЗТМ»).

На защиту выносятся следующие научно-практические положения:

1. Результаты математического моделирования, отражающие взаимно-однозначное соответствие между условиями обработки и уровнем упруго-волнового возмущения из зоны формообразования. Это позволяет только путем анализа АЭ оценить производительность процесса УСО в конкретных условиях формообразования.
2. Теоретическое и экспериментальное обоснование возможности экспресс-определения рациональной концентрации абразива в струе при ГАР, путем определения акустико-эмиссионного физико-

технологического критерия W , представляющего собой мощность акустического излучения, генерируемого в зоне обработки.

3. Инженерная методика и технологические рекомендации по определению оптимальной концентрации абразива по критерию обеспечения максимальной производительности ГАР на основании анализа информативных параметров АЭ.
4. Перспективы развития информационно-технологического обеспечения УСО. В частности, использование АЭ для определения степени износа струеформирующих сопловых элементов, оптимального угла взаимодействия ультразвуки при обработке поверхностей.

Личный вклад автора состоит в анализе и систематизации данных, известных из литературных источников и полученных в результате выполнения экспериментов и теоретических исследований, проведении численного моделирования УСО, анализе влияния параметров ультразвуковой обработки материалов на АЭ, возникающую в зоне резания, создании и апробации инженерной экспресс-методики определения рациональных режимов ГАР на основе регистрации АЭ из зоны обработки.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов и списка литературы. Содержит 125 страниц, из которых на 115 изложен основной текст, проиллюстрированный 49 рисунками и 14 таблицами. Список литературы состоит из 88 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность темы исследования, формулируется цель и решаемые задачи. Приводятся основные положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая ценность диссертационной работы.

В первой главе проведен анализ отечественных и зарубежных литературных источников, в результате которого было установлено, что УСО материалов является современной, интенсивно развивающейся производственной технологией, обеспечивающей эффективное решение широкого круга практических задач, стоящих перед ведущими предприятиями машиностроения. Рассмотрены возможные пути повышения эффективности процессов, связанных с ГАР и ГР.

В главе отмечается, что на настоящее время решен ряд важных научно-практических задач, касающихся вопросов УСО материалов. В частности,

отмечается, что поиском рациональных технологических режимов ГАР и оптимизацией гидрообработки занимались такие ученые, как Барсуков Г.В., Елфимов В.М., Ерухимович Ю.Е., Петухов Е.Н., Степанов Ю.С., Тарасов В.А., Тихомиров Р.А., Черепанов Г.П., Яблуновский Я.Ю., Abdel-Rahman A.A., Agus M., Chen L., Liu H., Maniadaki K., Ramulu M., Srinivasu D. S., Wang J.; совершенствованием агрегатов и узлов гидрооборудования - Петухов Е.Н. и Тихомиров Р.А.; поиском новых областей применений технологии - Абашин М.И, Барзов А.А., Галиновский А.Л., Пузаков В.С., Сысоев Н.Н., Hashish M., Whalen, J.; вклад в разработку и развитие конструкторско-технологического обеспечения процесса ГАР также внесли - В.Ф. Бабанин, В.С. Гуенко, И.И. Шапиро, Agoва D., Momber A., Kovacevic R. и многие другие. Однако остаются не решенными вопросы оперативного создания информационно-диагностического обеспечения УСО на этапе ТПП, в частности определение рациональных технологических режимов формообразования. Делаются выводы, что для решения этой задачи может быть эффективно использован потенциал метода АЭ, положительно зарекомендовавший себя в технологии механической и физико-технической обработки материалов.

Накопленный научно-методический потенциал, в создании которого принимали участие такие ученые как Барзов А.А и Горелов В.А. (диагностика процесса резания труднообрабатываемых материалов); Логинов В.П. и Корнеев С.С. (выбор рациональных режимов механической обработки); Камалов В.С. и Зарубина О.В. (определение параметров качества деталей лазерно-акустическим методом), позволил создать информационно-диагностическое обеспечение различных методов механической и физико-технической обработки, в том числе на этапе ТПП.

Однако, как показал анализ, отсутствие теоретических и экспериментальных данных об информативности источников АЭ при УСО, зависимостей параметров АЭ от технологических факторов не позволяют в полной мере использовать имеющиеся наработки в области создания полномасштабного диагностического обеспечения этой прогрессивной технологии.

В заключение главы поставлена цель и сформулированы основные задачи исследования.

Вторая глава посвящена разработке методического обеспечения проводимых теоретических и экспериментальных исследований. В главе представлен общий методический план проведения исследований. Перечислено применяемое в экспериментах оборудование с указанием его основных технических характеристик; предложены схемы и программы проведения экспериментов; рассмотрены использовавшиеся методы и подходы к моделированию технологических процессов и обработке экспериментальных данных.



S – скорость подачи режущей головки;

$F_{1пр.}$, $F_{2пр.}$ – силы прижима образца и датчика соответственно.

Рис. 1. Схема проведения эксперимента исследование влияния волновых процессов на эффективность гидроструйного резания материала

Даны методические указания по организации схемы установки датчиков и предложена обобщенная схема для определения параметров АЭ в процессе УСО (см. Рис. 1).

Кроме того, в главе были решены задачи численного моделирования процесса взаимодействия гидроабразивной струи с преградами в двумерной и трехмерной постановке. Было проведено решение серии задач, в которых варьировались и уточнялись параметры расчета (размер и число ячеек, используемые модели состояния и разрушения материалов и их характеристики и т.д.). В результате были построены схемы расчетных областей (см. Рис. 2), учитывающие свойства обрабатываемых материалов, а также начальные и граничные условия.

Моделирование показало, что форма абразива и его распределение по окружности вокруг струи слабо влияют на протекание процесса гидроабразивной эрозии. Также была подтверждена допустимость двумерной осесимметричной постановки задачи ГАР, которая позволяет получить результат отличающийся от трехмерной постановки не более, чем на 15%, при более чем в 50 раз меньших затратах машинных ресурсов.

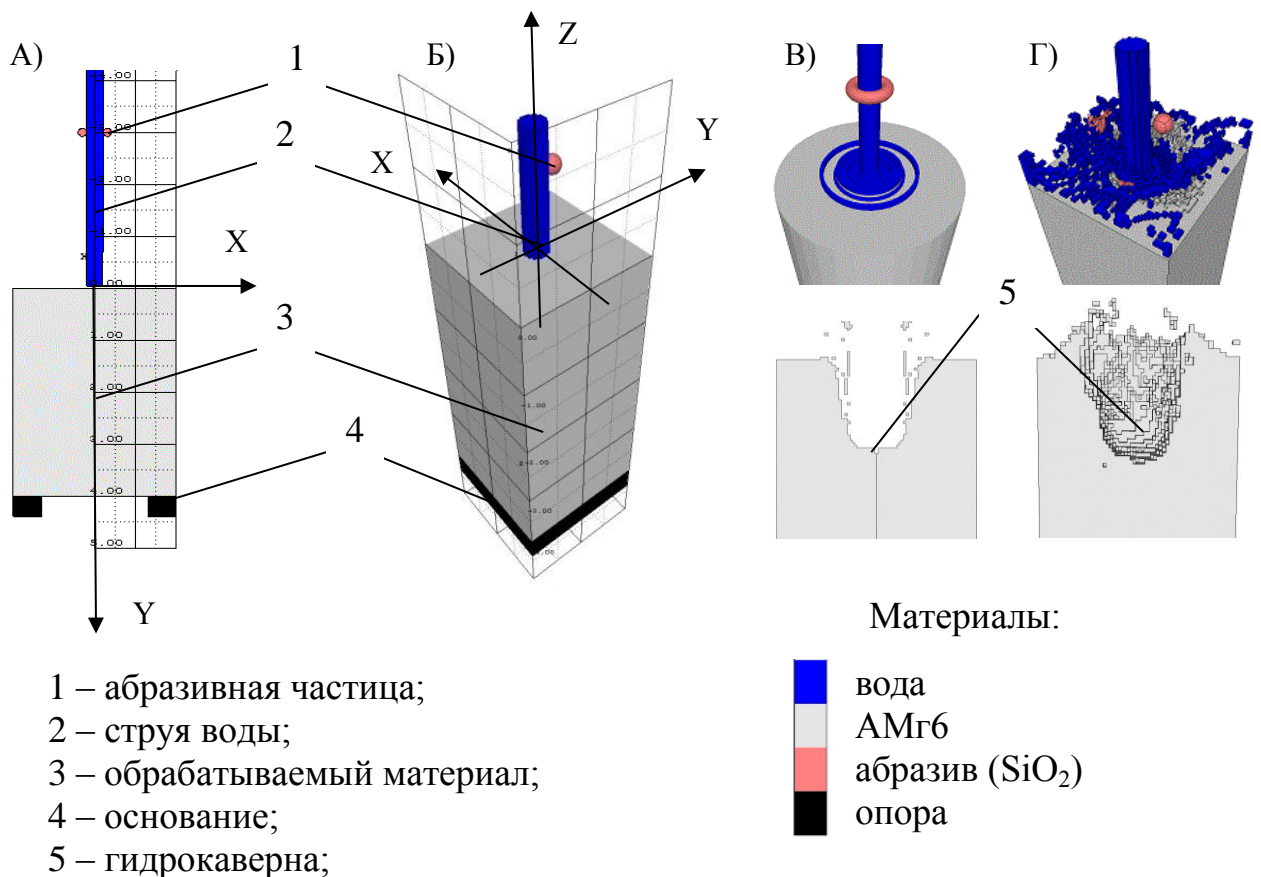


Рис. 2. Схемы двумерной осесимметричной (А) и трехмерной (Б) постановок задачи численного моделирования процесса ГАР, и соответствующие им гидрокаверны, полученные при расчете (В, Г)

Третья глава посвящена теоретическому исследованию высоко динамических процессов, возникающих при взаимодействии жидкостных и абразивно-жидкостных ультразвуковых струй с преградами. Были рассмотрены источники АЭ в зоне обработки и предложено уравнение баланса мощностей с учетом роли волнового фактора взаимодействия ультразвуковой струи с преградой. На основании анализа соотношений слагаемых баланса мощностей УСО, было показано, что в первом приближении

$$\dot{E}_{\text{АЭ}} \sim \dot{m}_m \rightarrow W = A\dot{N} = k J$$

где $\dot{E}_{\text{АЭ}}$ - энергия волн упругой деформации (волны АЭ), генерируемых в зоне ультразвуковой обработки, $\dot{m}_m = J$ - производительность процесса гидроабразивного резания (унос массы материала), k - коэффициент, зависящий от конкретных физико-технологических параметров процесса обработки и свойств материала.

В последнем соотношении, введен параметр (критерий) оценки производительности УСО материалов: $W = A\dot{N}$, где A – амплитуда сигнала, \dot{N} – интенсивность характерных импульсов АЭ, в частности при ГАР пропорциональная количеству ударов частиц абразива в поверхность заготовки в единицу времени.

На Рис. 3 показаны зависимости акустико-эмиссионного критерия W , позволяющего осуществлять экспресс оценку производительности и его составляющих A и \dot{N} от концентрации абразива в струе, а также изменение данного критерия и производительности J процесса обработки материала.

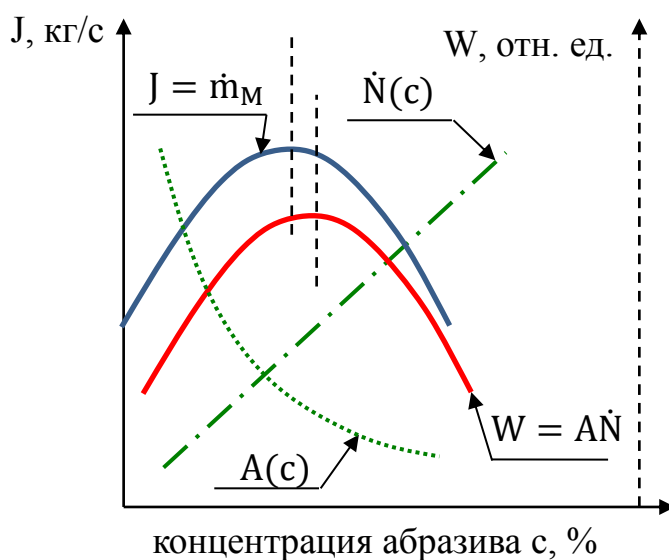


Рис. 3. График производительности процесса ГАР и акустико-эмиссионного критерия ее оценки

Для численной верификации вышеизложенного феноменологического подхода к формированию энергетического критерия W , отражающего активную роль волн АЭ в процессе гидроэрозии, было проведено численное моделирование процессов УСО. Для этого изменялся уровень волнового возмущения путем варьирования условий закрепления обрабатываемой заготовки (пластина, толщиной 4 мм, материал АМг6): на жестком (сталь 40Х) и упругом (техническая резина ТУ 2534-002-61734928-2013) основании. Общая схема постановки задачи численного моделирования представлена на Рис. 4, а.

Экспериментально было установлено, что аккумуляция волновой энергии, достигаемая благодаря условию упругого закрепления детали, значительно влияет на увеличение производительности процесса ГР (15-25%). Согласно картине напряженно-деформированного состояния материала мишени напряжения достигают критического значения в месте появления волновых флуктуаций (см. Рис. 4, б, в). Это приводит к локальному пластическому течению материала, оттеснению поверхностных слоев на периферию удара ультраструи, формированию микро и

субмикротрещин и их последующему развитию. Экспериментальная проверка данных расчетов выполнена в главе 4.

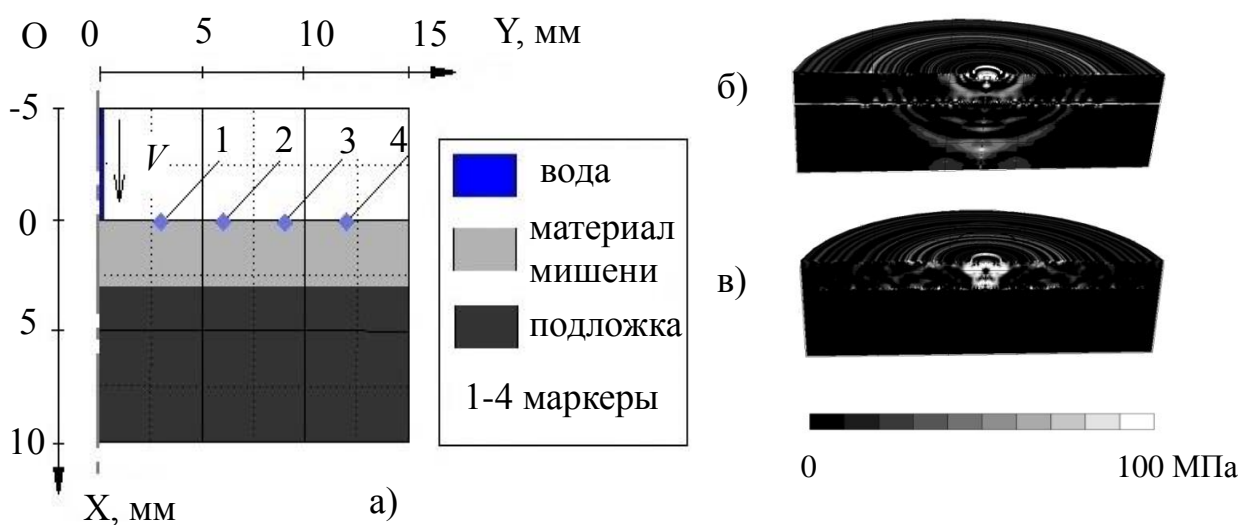


Рис. 4. а) Расчетная схема численного моделирования процесса ГР, б) Распределение волн упругой деформации в материале мишени на жестком основании, в) на изолирующей подложке

Также в главе было осуществлено численное моделирование процесса ГАР. Его целью являлась проверка теоретических предположений о наличии оптимальной концентрации абразива, по критерию обеспечения максимальной производительности резания. Схема постановки задачи моделирования представлена на Рис. 5а, а на Рис. 5б приведены результаты расчетов. На основе анализа полученных результатов моделирования была показана физико-технологическая справедливость акустико-эмиссионного критерия.

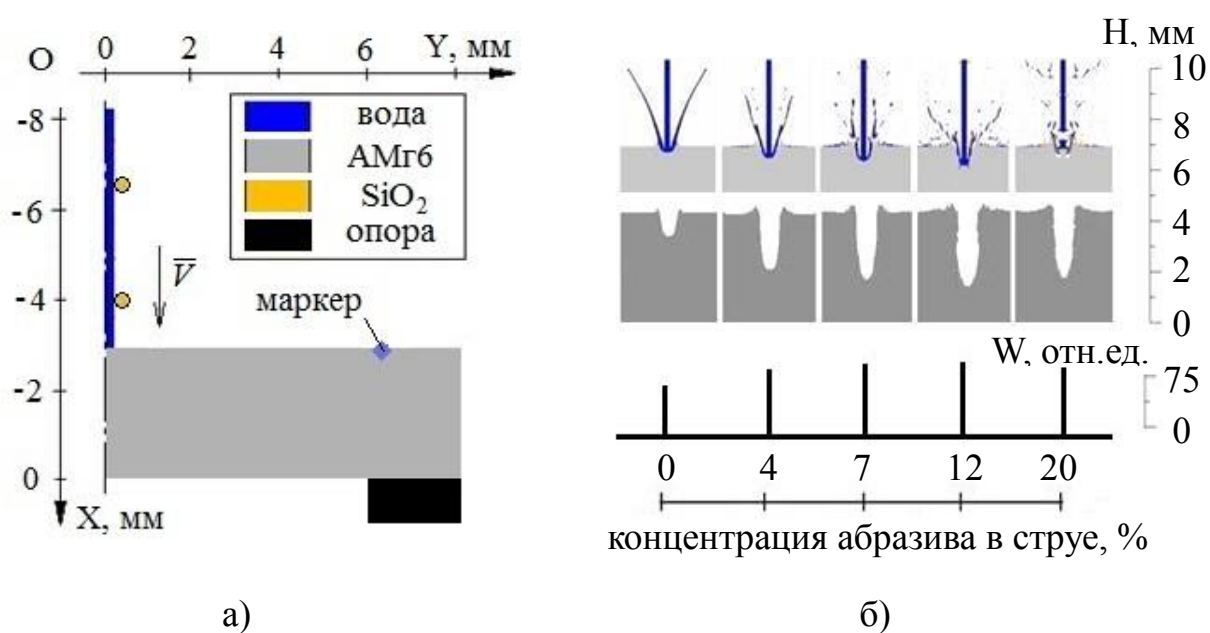


Рис. 5. а) Расчетная схема численного моделирования процесса ГАР, б) Величины гидрокаверн и соответствующие значения критерия W

В четвертой главе представлены результаты выполненных экспериментальных исследований, касающихся вопросов верификации конечно-элементных моделей. Для этого были проведены оценки влияния волновой энергонапряженности зоны взаимодействия ультраструи с заготовкой на эффективность процесса гидрорезания, определена рациональная концентрация абразива для достижения максимальной производительности ГАР путем анализа количественных характеристик акустического излучения, описываемых критерием W .

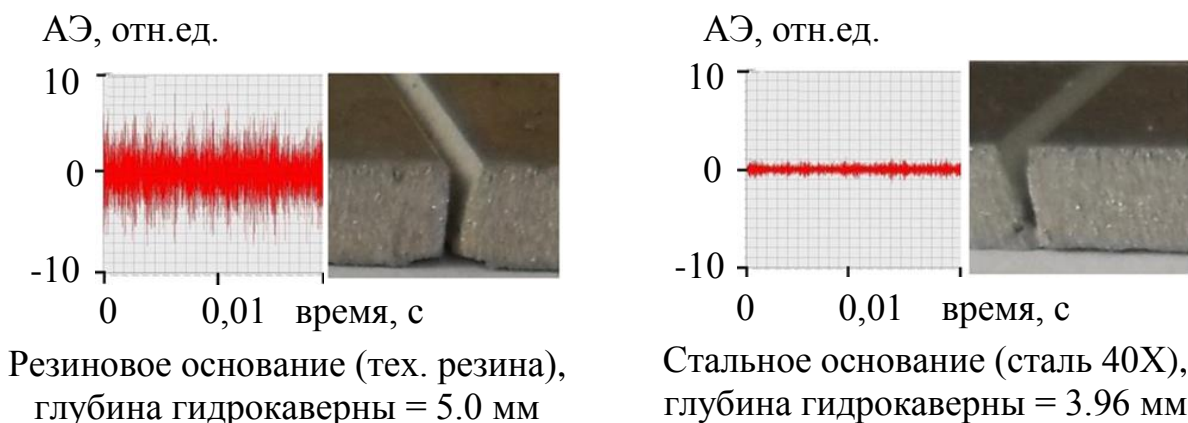


Рис. 6. Гидрокаверны и записи сигнала АЭ, полученные при УСО для пластин, расположенных на подложках разного типа

На Рис. 6 представлены результаты эксперимента по исследованию влияния энергетики волновых процессов на эффективность ГР материала, а также показано изображение и параметры гидрокаверн и сигнала АЭ. Схема проведения экспериментов представлена на Рис. 1. Проведенный эксперимент подтвердил результаты численных расчетов и доказал, что волновые процессы вносят заметный вклад в процесс гидроэрозии материала, а их аккумуляция в зоне обработки способна значительно увеличить производительность ГР.

В главе также представлены результаты экспериментального исследования по определению зависимостей между концентрацией абразива в ультраструе, производительностью процесса ГАР и значениями мощности АЭ для материалов: АМг6, сталь 40Х (см. Рис. 7, 8). Полученные данные были сопоставлены с результатами расчетов численными методами (см. Рис. 8) и наглядно показывают практически эквидистантный характер изменения зависимостей производительности процесса ГАР и параметра W

от концентрации абразива. Это обстоятельство дает возможность экспресс-выбора оптимального значения концентрации абразива по критерию W без проведения достаточно длительных и материалоемких исследований. Коэффициент корреляции значений глубины каверны для экспериментальных данных и расчета МКЭ составил $r_{1AMг6} = 0,85$, $r_{1сталь40X} = 0,87$; для значений глубины каверны и показаниями АЭ $r_{2AMг6} = 0,82$, АЭ $r_{2сталь40X} = 0,89$.

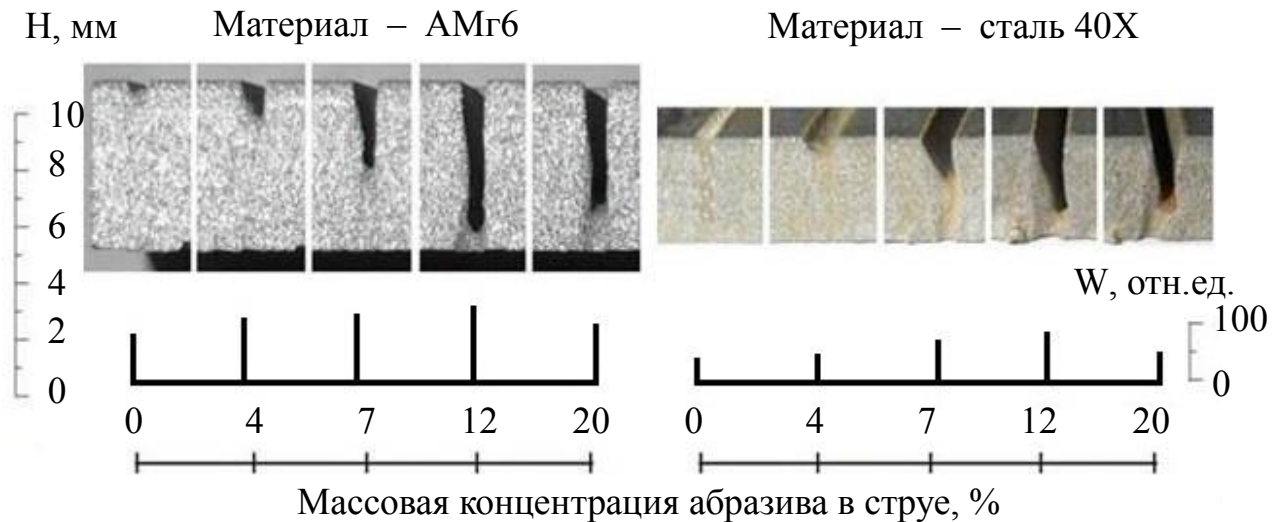


Рис. 7. Гидрокаверны, полученные в результате эксперимента и значения критерия W ; слева для АМг6, справа – для стали 40Х

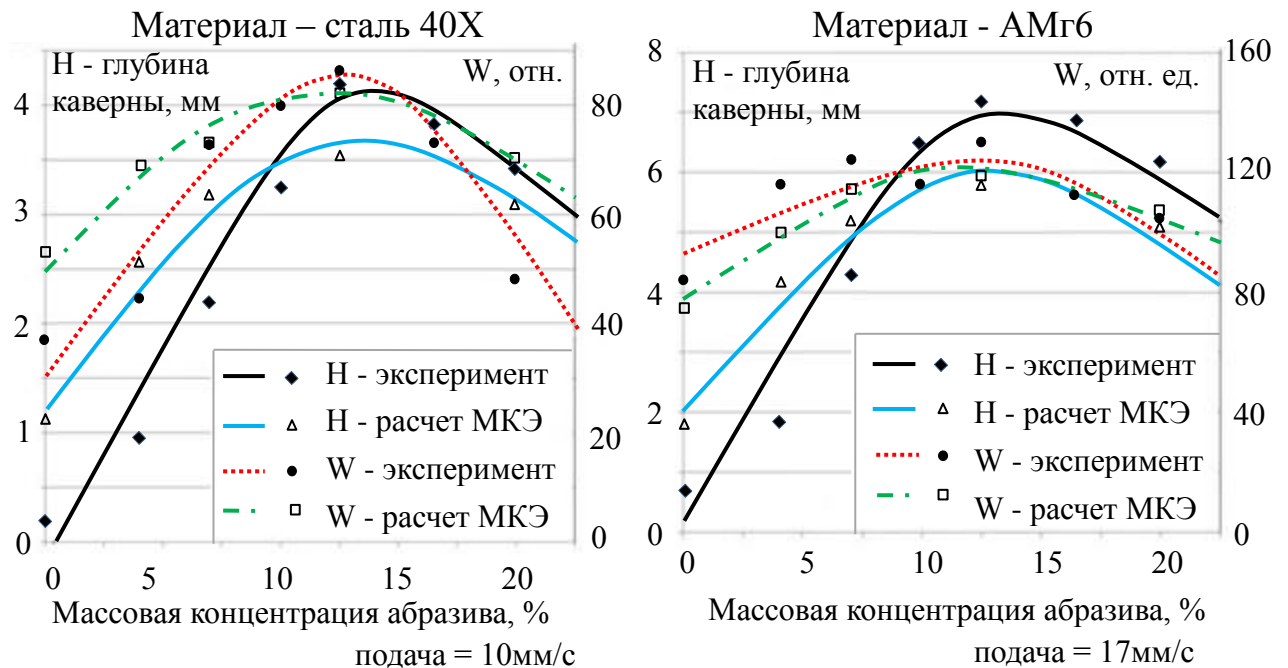
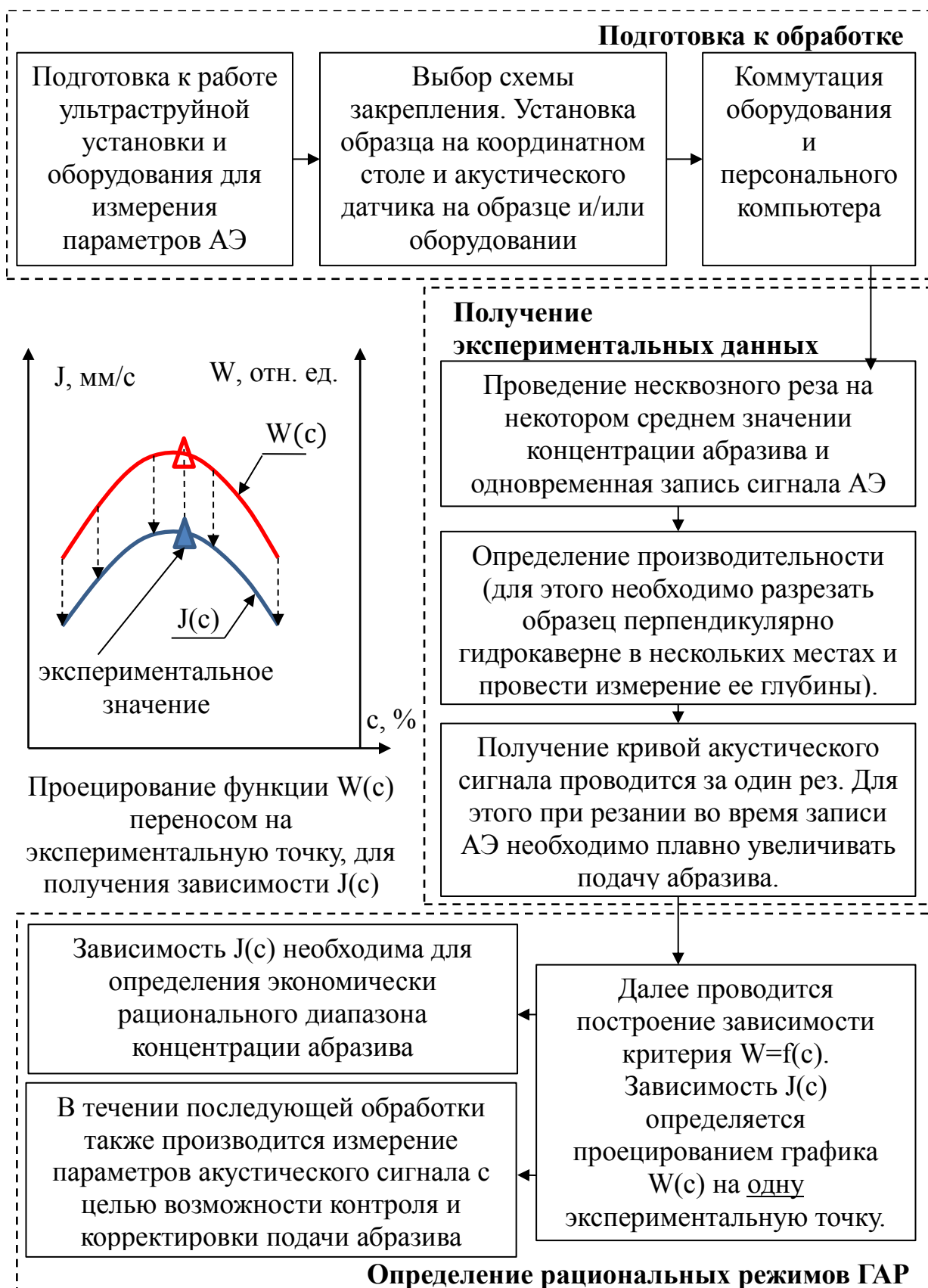


Рис. 8. Сопоставление результатов моделирования и экспериментально полученных данных по ГАР различных материалов



Зависимость $J(c)$ необходима для определения экономически рационального диапазона концентрации абразива

Далее проводится построение зависимости критерия $W=f(c)$. Зависимость $J(c)$ определяется проецированием графика $W(c)$ на одну экспериментальную точку.

В течении последующей обработки также производится измерение параметров акустического сигнала с целью возможности контроля и корректировки подачи абразива

Рис. 9. Блок-схема инженерной экспресс методики, определения рациональных режимов ультразвуковой обработки на основе информативных параметров АЭ

В результате проведенных экспериментальных и теоретических исследований была предложена инженерная методика ускоренного определения производительных режимов ГАР (см. Рис. 9). Отличительной физико-технологической чертой предлагаемой методики является возможность оперативного определения количественной зависимости производительности ГАР от условий обработки путем проведения одного эксперимента. Данное положение основано на доказанном теоретически и экспериментально подтвержденным фактически эквидистантным изменении функций $J = f_y(c)$ и $W = f_w(c)$ и их совмещении в области максимума W . Реализация данной методики на практике позволит получать оперативную информацию о наиболее производительном режиме ГАР. Разработанная методика прошла апробацию на предприятиях ООО «Старт-РЛ» (г. Дмитров), ООО «МагДжет» (г. Москва), ООО «Горстрой» (г. Сыктывкар).

Результаты работы были использованы при подготовке учебного пособия «Анализ гидрофизических процессов и их возможностей при ультразвуковой обработке материалов ракетно-космической техники».

В качестве перспектив для продолжения исследований в главе предложены направления, связанные с применением метода АЭ для оценки функциональной надежности узлов и агрегатов гидрооборудования; в качестве дополнительного информативного фактора при использовании струи в качестве диагностирующего инструмента (например, при диагностике качества керамики); а также для оценки производительности процессов ультразвукового суспензирования. Предложен вариант создания системы автоматического управления подачей абразива при помощи микроконтроллера, пьезопреобразователя и шагового двигателя.

ВЫВОДЫ

1. В результате анализа литературных источников было показано, что среди различных методов диагностического обеспечения процесса ГАР, наибольшего внимания заслуживают методы, основанные на изучении высокочастотных динамических явлений – волн АЭ, генерируемых в зоне взаимодействия высокоскоростной струи и обрабатываемого материала.
2. Показано, что основным источником АЭ является ударно-динамическое воздействие высокоскоростной гидроабразивной струи на обрабатываемый материал. При этом зависимости параметров АЭ от

значения концентрации абразива и производительности процесса имеют эквидистантно изменяющийся характер, а при некотором значении концентрации наблюдается максимум производительности, которому соответствует максимум мощности сигнала АЭ.

3. В результате анализа разработанной модели баланса мощностей и энергий установлено, что наибольший вклад в широкополосный акустический сигнал вносят волны упругой деформации, связанные с ударным характером взаимодействия частиц абразива с поверхностью образца. На этой основе был предложен акустико-эмиссионный критерий физико-технологической оценки производительности ГАР с помощью регистрации и обработки информативных параметров АЭ.

4. Численным моделированием процесса гидроэрозии обрабатываемого материала при ГАР было теоретически установлено наличие связи между производительностью процесса, значением концентрации абразива и уровнем волновой энергонапряженности процесса УСО. Анализ полученных данных показал, что двумерная осесимметричная постановка задачи процесса ГАР является допустимой и позволяет получить результат, отличающийся от трехмерного расчета не более, чем на 15%, при более чем в 50 раз меньших затратах машинных ресурсов.

5. Экспериментальная проверка предложенного акустико-эмиссионного критерия, предназначенного для ускоренного определения значения оптимальной концентрации абразива, подтвердила его информативность. Это позволило разработать инженерную экспресс методику определения указанного технологического параметра. Методика основана на кратковременной регистрации и последующем анализе информативных параметров АЭ при ГАР.

6. Разработанная методика прошла производственные испытания на ООО «Старт-РЛ» (г. Дмитров), ООО «МагДжет» (г. Москва), ООО «Горстрой» (г. Сыктывкар). Проведенные испытания показали, что методика позволяет осуществлять экспресс-определение значения оптимальной концентрации абразива, путем кратковременной регистрации АЭ сигналов из зоны обработки. Это обеспечивает сокращение трудоемкости процедуры отработки производительных режимов ГАР на этапе ТПП в конкретных производственных условиях.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. Хафизов М.В., Абашин М.И. Механизмы гидроэрозионного разрушения твердотельной преграды // Наука и образование: Электронное научно-техническое издание. Эл. № ФС 77 – 48211. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2011. №10. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/223166.html> (0,56 п.л./ 0,23 п.л.)
2. Хафизов М.В., Барзов А.А., Галиновский А.Л. Оценка производительности ультразвукового микросуспензирования методом акустической эмиссии // Вестник МГТУ. Машиностроение. 2012. Спец. выпуск №3. С. 27–34. (0,31 п.л./ 0,11 п.л.)
3. Хафизов М.В., Галиновский А.Л., Муляр С.Г. Применение гибридной диагностики для оценки эксплуатационных свойств конструкционной керамики // Известия ВУЗов. Машиностроение. 2012. №9. С. 65–69. (0,26 п.л./ 0,08 п.л.)
4. Хафизов М.В., Галиновский А.Л., Проваторов А.С. Влияние волновой энергии на эффективность процесса ультразвуковой обработки материалов // Известия ВУЗов. Машиностроение. 2012. №10. С. 59–62. (0,16 п.л./ 0,07 п.л.)
5. Хафизов М.В., Барзов А.А., Галиновский А.Л. Имитационное моделирование акустического излучения, возникающего при взаимодействии высокоскоростной струи жидкости с материалом // Известия ВУЗов. Машиностроение. 2013. №8. С. 40–46. (0,49 п.л./ 0,17 п.л.)
6. Хафизов М.В., Галиновский А.Л., Проваторов А.С. Экспресс-выбор рациональных режимов гидроабразивной обработки материалов с использованием акустической эмиссии // Известия ВУЗов. Машиностроение. 2013. №3. С. 56–61. (0,43 п.л./ 0,2 п.л.)
7. Khafizov M.V., Galinovskij A.L., Abashin M.I. Rapid Determining of the Optimum Operation Mode for Abrasive Waterjet Cutting Process by Means of Acoustic Emission // Applied Mechanics and Materials. 2015. Vol. 698. P. 401–404. (0,22 п.л./0,1 п.л.)