На правах рукописи

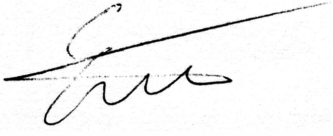
УДК 621.9.048.7

ЕЛФИМОВ Владимир Михайлович

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ВЫБОРА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ГИДРОАБРАЗИВНОЙ РЕЗКИ МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ ПО ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОМУ КРИТЕРИЮ

Специальность: 05.02.08 – Технология машиностроения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2013

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: **Чумадин Анатолий Семенович,** доктор технических наук, профессор, Российский государственный технологический университет (МАТИ), заведующий кафедрой

Петухов Евгений Николаевич, кандидат технических наук, доцент, Владимирский государственный университет, доцент

Ведущая организация: **Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-производственное объединение «Техномаш»** (ФГУП «НПО «Техномаш»), г. Москва

в 16[00]

Защита состоится «13» 03 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.

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» 02 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.141.06
доктор технических наук, доцент — Михайлов Валерий Павлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований. Резание материалов высокоскоростной гидроабразивной струей является прогрессивным физико-техническим методом обработки материалов и конструкций, который обладает уникальными функционально-технологическими возможностями.

В последние годы в России наблюдается интенсивный рост парка технологического гидрорежущего оборудования в различных отраслях промышленности, расширение сферы его рационального применения. Данное обстоятельство обусловлено рядом преимуществ технологии гидроабразивного резания по сравнению с механической и лазерной обработкой. Анализ показал, что наиболее эффективно использование гидроабразивного резания при сложноконтурном раскрое листовых заготовок из металлических, неметаллических и композиционных материалов.

Развитию технологии гидроабразивного резания (ГАР) способствовали следующие разработки. Создавались надежные насосные системы для получения высоких гидравлических давлений (300-400 МПа), обеспечивающих формирование высокоэнергетической гидроабразивной струи – специфического режущего инструмента. Параллельно исследовались технологические возможности метода, изучались особенности процесса взаимодействия гидроабразивной струи с обрабатываемым материалом, оценивалась его производительность, как основной показатель эффективности ГАР.

В дальнейшем в рамках развития ГАР были предложены математические модели, связывающие исходные физико-энергетические параметры гидроабразивной струи с выходными технологическими показателями процесса формообразования: точностью и качеством обработанной поверхности. Осуществлена оптимизация параметров ГАР по критерию производительности обработки. В последние годы значительное внимание уделяется программно-математическому обеспечению и числовому управлению процессом ГАР, созданию баз данных по обрабатываемости различных материалов, развитию элементов систем автоматизированного проектирования технологических операций и их информационно-диагностическому оснащению.

Однако до настоящего времени не проводились исследования с целью структурного анализа и оптимизации технологических параметров процесса ГАР по критерию удельной технологической себестоимости (удельных оперативных затрат средств на отделение единицы объема обрабатываемого материала), как важнейшей характеристики технико-экономической эффективности. Это объясняется, в первую очередь, достаточно сложным функциональным характером зависимости оперативных затрат средств на

2017956
Елфимов В.М. Разработка мет

ГАР от технологических условий обработки: рабочего давления струи, расходов воды и абразива и т.д.

В связи с этим, построение и анализ модели взаимосвязи функционально-технологических и стоимостных показателей процесса гидроабразивного резания, позволяющей дать объективную оценку его удельной технологической себестоимости и осуществить целенаправленную оптимизацию технологических параметров обработки, является актуальной научно-практической задачей, решение которой имеет существенное значение для повышения конкурентоспособности этой технологии в различных отраслях машиностроения.

Цель работы заключается в повышении технико-экономической эффективности гидроабразивного резания материалов путем оптимизации технологических параметров обработки на базе построения и анализа математической модели удельной технологической себестоимости процесса формообразования.

Научная новизна работы:

Признаками научной новизны обладают следующие положения работы:

1. Обобщение имеющихся данных по стоимостным показателям технологии гидроабразивного резания, которое показало, что основной вклад в общую величину затрат на осуществление процесса гидроабразивного резания на современном технологическом оборудовании обусловлен затратами на абразивный материал (~60%) и струеформирующие сопла (~15%).
2. Положение о подобии процессов эрозии обрабатываемого материала и материала фокусирующего сопла, сформулированное на основе анализа процессов массопереноса и энергетических превращений в условиях гидроабразивной обработки материалов.
3. Формулировка целевой функции и решение оптимизационной задачи по технико-экономическому критерию, устанавливающее связь между экономически целесообразной концентрацией и стоимостью абразива, параметрами эрозионного изнашивания материалов и расходами по эксплуатации технологической установки. При получении решения использовано положение о подобии процессов эрозии обрабатываемого материала и материала фокусирующего сопла.

Практическая ценность работы состоит:

– В предложенном комплексе методического, алгоритмического и программно-математического обеспечения, который позволяет осуществить экономически обоснованный выбор режимов гидроабразивного резания с учетом индивидуальных особенностей

обрабатываемого материала, абразива и технологического оборудования. Комплекс содержит методику экспресс - оценки обрабатываемости материалов с помощью пробных экспериментов, программу расчета оптимальной концентрации абразива, подачи струи относительно заготовки, алгоритм выбора диаметра сопла и потребного расхода воды при резании.

– В полученных данных по обрабатываемости металлических сплавов, композиционных материалов типа армированных полимеров, которые рекомендуется использовать при проектировании технологических процессов гидроабразивной резки материалов в машиностроительном производстве, включая производство ракетно-космической и военной техники.

– В технологических рекомендациях и оптимизированных режимах гидроабразивной резки многослойных панелей с сотовым заполнителем, что важно для совершенствования технологических процессов изготовления ракетно-космической и военной техники.

Практическая значимость научно-методических разработок подтверждается актами использования разработанного методического, алгоритмического и программно-математического обеспечения в организациях: НИКИМТ (г. Москва), Дубнинский машиностроительный завод, ООО «Старт-РЛ» (г. Дмитров), НПО «Класс» (г. Москва), ОАО «Корпорация ТРВ» (г. Королев), НУК СМ МГТУ им. Н.Э.Баумана.

Методы исследований. Теоретические и экспериментальные исследования базируются на научных положениях технологии машиностроения, технологии механической обработки материалов резанием, теории принятия решений (метод экспертных оценок), элементах линейного программирования и математической статистике.

Экспериментальные исследования по ГАР различных материалов в основном проводились на технологическом комплексе «MultiCam» в специализированной лаборатории Дмитровского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Достоверность и обоснованность научных положений и выводов диссертационной работы обусловлена корректным применением математических методов, достоверностью разработанных моделей и подтверждена сравнением теоретических исследований с экспериментальными данными.

Результаты, изложенные в диссертационной работе, получены лично соискателем на основании теоретических и практических изысканий.

Апробация результатов работы. Основные результаты теоретических и экспериментальных исследований опубликованы в 7-ми печатных работах, докладывались на 3-х Международных научно-технических конференциях. Исследования проведены в рамках 2-х проектов № 2.1.2.8670 (2006-2008 гг.) и № 3293 (2009-2010 гг.) аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы» и хоздоговорной работы с ООО «Старт-РЛ», гранта Президента РФ для молодых российских ученых МК-962.2008.8.

На защиту выносятся следующие научно-практические положения:

1. Результаты экспертно-аналитической оценки научно-практической значимости основных направлений развития и совершенствования технологии ГАР, показывающие приоритетный характер решения проблемы технико-экономической оптимизации режимов (условий) гидроабразивной обработки машиностроительных материалов.
2. Результаты анализа структуры затрат на технологическое обеспечение процесса ГАР. Доказательство того, что удельная величина затрат на абразивный материал и фокусирующее сопло является превалирующей и может быть принята в качестве основы целевой функции при оптимизации технологических параметров ГАР.
3. Теоретическое и экспериментальное доказательство линейной связи между производительностью процесса ГАР и интенсивностью гидроабразивного изнашивания фокусирующего сопла, что позволяет существенно упростить оптимизацию технологических параметров по технико-экономическому критерию процесса ГАР.
4. Инженерная методика и ее программно-математическая реализация, по определению оптимальной концентрации абразивного материала в гидроструе, обеспечивающей минимальную удельную технологическую себестоимость формообразования при реализации технологических процессов ГАР.

Тема и содержание диссертации отражены в 10 научных работах, из них 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов и списка литературы. Содержит 146 страниц, из которых на 136 изложен основной текст, проиллюстрированный 36 рисунками и 14 таблицами. Список литературы состоит из 98 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе проведен анализ современного научно-методического обеспечения интенсивно развивающейся машиностроительной технологии – технологии гидроабразивного резания конструкционных материалов.

Показано, что процесс ГАР, обладая широкими функционально-технологическими возможностями, уверенно вышел в арсенал современных высокоэффективных способов физико-технической обработки различных материалов. В частности, технология ГАР в ракетно-космическом машиностроении широко применяется при сложнопрофильном раскрое материалов.

Значительный вклад в разработку и развитие конструкторско-технологического обеспечения процесса ГАР внесли отечественные и зарубежные ученые: Тихомиров Р.А., Бабанин В.Ф., Петухов Е.Н., Шапиро И.И, Гуенко В.С., Степанов В.С., Барсуков Г.В., D. Agova, A. Momber, R. Kovacevic и др.

Весь комплекс выполненных теоретических и экспериментальных исследований по научно-методическому обеспечению технологии ГАР условно можно разделить на две группы. В работах первой группы исследований решается проблема получения эффективного технологического инструмента - высокоэнергетической струи гидроабразивной суспензии, а во второй изучается действие струи на обрабатываемый материал: производительность резания, точность и качество обработанной поверхности. В проведенных исследованиях отмечается большое количество и сложность связей между технологическими параметрами, определяющими эффективность ГАР. Однако известные эмпирические рекомендации носят частный характер и получены, как правило, путем однопараметрического варьирования при фиксированных значениях остальных технологических параметров.

Исследования по изучению технико-экономической эффективности технологии ГАР проводились в следующих основных направлениях: сравнительной оценки технической и экономической эффективности гидроабразивного формообразования по отношению к альтернативным методам раскроя листовых материалов (в частности к лазерной обработке); оценки экономического эффекта от конструктивно-технологического совершенствования оборудования для ГАР; анализа экономической эффективности автоматизированного управления технологическими условиями реализации ГАР при достижении требуемых точности и качества обработки.

Однако полномасштабный анализ и оптимизация технологических параметров ГАР по стоимостным показателям процесса обработки не проводились. В основном это объясняется сложностью создания целевой функции, которая должна учитывать функциональную связь производительности процесса ГАР с затратами на дорогостоящие расходуемые материалы: абразив и фокусирующие сопла.

В связи с этим, актуальным следует считать анализ технико-экономической эффективности ГАР и функциональной связи между производительностью обработки, расходом абразива и износом фокусирующих элементов станка.

Для достижения поставленной цели была сформулирована **научная задача:** анализ формирования удельной технологической себестоимости гидроабразивной обработки материалов и конструкций и разработка методики выбора технологических режимов.

Задачами исследования являются:

1. Обоснование актуальности и приоритетного характера технико-экономической оптимизации технологических процессов гидроабразивного резания на базе применения метода экспертных оценок.
2. Разработка модели удельной технологической себестоимости процесса гидроабразивного резания, отражающей вклад затрат на расходуемый абразивный материал и замену изношенных элементов тракта формирования струи технологического оборудования.
3. Теоретическое и экспериментальное исследование особенностей гидроабразивного разрушения обрабатываемого материала и эрозионного изнашивания фокусирующего сопла технологического оборудования, как определяющих технологическую функцию высокоскоростной струи гидроабразивной суспензии.
4. Разработка и реализация инженерной методики оптимизации основных технологических параметров гидроабразивного резания по технико-экономическому критерию процесса обработки.
5. Осуществление промышленной апробации результатов исследований и определение перспектив дальнейшего развития ГАР.

Вторая глава посвящена разработке методического обеспечения для исследования направлений повышения технико-экономической эффективности ГАР.

Анализ перспективности технико-экономической оптимизации параметров ГАР по сравнению с другими способами совершенствования данной операционной технологии осуществлен в работе на базе применения метода экспертных оценок. Для его реализации была разработана соответствующая анкета, характеризующая в общем виде перспективность рассматриваемых технологических решений.

В состав анкеты были включены такие критерии, как: потенциальная возможность реализации решения, ожидаемая технико-экономическая эффективность, общие затраты на реализацию решения, возможное повышение производительности процесса, ожидаемое улучшение качества обработки, широта сферы применения решения, наличие подобного решения, степень изученности слагаемых решения, общая оценка перспективности решения.

Процедура анкетирования специалистов - технологов содержала оценку значимости вышеприведенных параметров по 10-ти бальной шкале. Использование числовых показателей мнений экспертов позволило провести статистическую обработку результатов анкетирования и определить среднее значение и дисперсию мнений о значимости развития того или иного направления повышения эффективности технологии ГАР. Кроме того, оценивался инновационный потенциал анализируемого решения в виде отношения уровня его ожидаемой эффективности к величине затрат на реализацию решения.

Такой подход позволил с единых позиций осуществить ранжирование значимости анализируемых направлений развития технологии ГАР. Полученные результаты экспертно-аналитического анализа представлены в виде известной в теории принятия решений диаграммы Парето (рис. 1), где были учтены 7 основных направлений повышения эффективности технологии ГАР: 1. Повышение рабочего давления струи; 2. Улучшение режущих свойств абразива; 3. Увеличение диаметра гидросопла (струи); 4. Совершенствование конфигурации гидросопла; 5. Оптимизация кинематики обработки; 6. Применение дополнительных воздействий; 7. Технико-экономическая оптимизация технологических параметров.

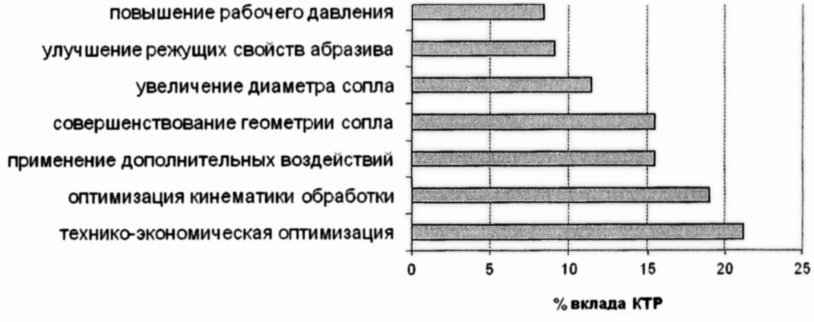


Рис. 1. Итоговая оценка вкладов различных КТР
в повышение эффективности операционных технологий ГАР

Согласно полученным данным, ожидаемая результативность технико-экономической оптимизации технологических параметров ГАР превышает по значимости другие направления совершенствования данной технологии. Причем ее инновационный потенциал уступает только оптимизации и управлению кинематическими факторами резания, что вполне согласуется с результатами работ проф. Барсукова Г.В.

Важным этапом повышения технико-экономической эффективности технологий ГАР был анализ структуры затрат (таблица 1) на обслуживание гидроструйного оборудования ведущих фирм мира Waterjet и Flow, который показал существенную значимость расходов, связанных с изнашиванием элементов фокусирующего тракта. Кроме того, таблица 1 показывает, что затраты на гранатовый абразив и фокусирующие сопловые элементы составляют ~75% от общей величины затрат. Это обстоятельство указывает на то, что оптимизация расходов на абразивный материал является важнейшим резервом повышения технико-экономической эффективности технологии ГАР.

Таблица 1.

Обобщенная структура затрат на обеспечение процесса ГАР

Наименование статьи затрат	Электро энергия	Гранатовый абразив	Гидросопло	Фокусирующее сопло	Уплотнители
Удельная величина затрат, %	13	60	2	13	12

В главе также предложены: методика изучения влияния расхода абразивного материала на производительность ГАР различных материалов и методика оценки величины гидроабразивного изнашивания фокусирующего сопла путем высокоточного взвешивания. Кроме того, приводится техническое описание технологического гидротехнологического комплекса «MultiCam» как инструмента при проведении экспериментальных исследований.

Третья глава посвящена теоретико-экспериментальному исследованию и оптимизации технологических параметров процесса гидроабразивного резания по технико-экономическому критерию.

В результате теоретического исследования процессов массопереноса и энергетических превращений при гидроабразивном резании были сформулированы физико-технологические предпосылки оптимизации режимов ГАР. Доказано несовпадение значений концентрации абразива в абразивно-жидкостной струе, соответствующих наибольшей производительности и наименьшей технологической себестоимости гидроабразивной резки материалов и конструкций.

В результате экспериментального исследования эрозионного изнашивания обрабатываемого материала и материала фокусирующего

сопла установлен характер изнашивания фокусирующего сопла и показан пропорциональный характер связи интенсивностей эрозионного изнашивания обрабатываемого материала $J_{ОМ}$ и материала фокусирующего сопла $J_{ФС}$ с концентрацией абразива c. При этом коэффициент корреляции между $J_{ФС}$ и $J_{ОМ}$ составил для различных исследуемых материалов r=0,95-0,97. Данное обстоятельство обеспечило снижение трудоемкости процедуры выбора рациональной концентрации абразива по удельной технологической себестоимости обработки.

На базе использования подхода к анализу взаимодействия струй, сформулированного акад. М.А. Лаврентьевым и проф. К.П.Станюковичем, получена обобщающая зависимость

$$J = K_T c \frac{V_{0в}^n}{(k_u + c)^n} \qquad (1)$$

между интенсивностью J эрозионного изнашивания материалов под действием потока абразива и концентрацией абразива, которая дает расхождение не более 5% с известными результатами исследований в области гидроабразивного резания. Предложенная зависимость с погрешностью <20% обосновывает наличие максимальной интенсивности эрозионного изнашивания $J_{max} = K_T \left(\frac{V_{0в}}{n}\right)^n \left(\frac{n-1}{k_u}\right)^{n-1}$ при концентрации абразива $c_{opt}^{\Phi} = \frac{k_u}{n-1}$, где K_T – коэффициент пропорциональности, зависящий от прочности и плотности эродирующего материала, k_u – коэффициент, учитывающий эффективность использования режущих свойств абразива и действия воды, $V_{0в}$ – скорость воды в случае отсутствия подачи абразива в струю.

Основываясь на результатах анализа статей расходов на обеспечение гидроабразивной обработки материалов в работе была предложена зависимость для стоимостного выражения основных затрат $З_T$ на обеспечение ГАР при номинальных рабочих давлениях и расходе воды в период стойкости фокусирующего сопла:

$$\sum_{i=1}^{4} C_i + \sum_{j=5}^{10} C_j + C_{ФС} + C_a = З_T, \qquad (2)$$

где C_1 – затраты на внутрицеховое транспортирование; C_2 – затраты на услуги сторонних организаций; C_3 – внепроизводственные расходы; C_4 – заработные платы станочника (основная и дополнительная с начислениями), рабочих и инженеров, занятых обеспечением и обслуживанием основного технологического и программно-вычислительного оборудования; C_5 – затраты на электроэнергию; C_6 –

затраты на потребляемую воду; C_7 – затраты на материалы, расходуемые на содержание станка (масло, уплотнения и т.д.); C_8 – расходы на амортизацию станка и оборудования; C_9 – расходы на текущий и планово-предварительный ремонт оборудования; C_{10} – расходы на приобретение и замену гидросопла; C_{CH} – расходы на приобретение и замену струеформирующего абразивно-жидкостного фокусирующего сопла; C_a – расходы на абразивный материал.

Однако для удобства оптимизации режимов резания по технико-экономическому критерию в работе введено и описано математически понятие удельной технологической себестоимости обработки, под которой понимаются затраты средств на эрозионное разрушение (удаление) единицы объёма обрабатываемого материала в процессе ГАР

$$C_T = \frac{\dot{Ц}_{ВН} + J_{ФС}\overline{Ц}_{ФС} + \dot{m}_в c Ц_a}{J_{ОМ}}, \qquad (3)$$

где $J_{ФС}$ и $J_{ОМ}$ – соответственно функции, характеризующие интенсивность протекания процессов гидроабразивной эрозии соплового насадка и разрушения (резания) обрабатываемого материала, $\dot{Ц}_{ВН}$ – стоимость функционирования гидротехнологического комплекса в единицу времени, $\overline{Ц}_{ФС} = Ц_{ФС} / m_{кр}$, $Ц_{ФС}$ – стоимость фокусирующего сопла; $m_{кр}$ – критическая масса износа фокусирующего сопла, которая определяет потерю режущих свойств гидроабразивной струей; $Ц_a$ – стоимость единицы массы абразива, $\dot{m}_в$ – массовый расход воды.

Выражение (3) в работе использовано в качестве целевой функции процесса оптимизации режимов обработки.

Получено математическое выражение для оптимальной концентрации абразива в абразивно-жидкостной струе, обеспечивающей минимум целевой функции процесса гидроабразивной резки материалов и конструкций и учитывающей стоимостные и технологические параметры процесса обработки

$$c^{э}_{опт} = -\frac{(n-1)\dot{Ц}_{ВН}}{2nЦ_a\dot{m}_в} + \sqrt{\left[\frac{(n-1)\dot{Ц}_{ВН}}{2nЦ_a\dot{m}_в}\right]^2 + \frac{k_и\dot{Ц}_{ВН}}{nЦ_a\dot{m}_в}}. \qquad (4)$$

Результаты расчета по этой формуле (рис. 2) показывают, что при изменении показателя n в диапазоне от 2 (по Ю.Е.Ерухимовичу) до 3 (по М.А.Лаврентьеву) расхождение значений экономически оптимальной концентрации абразива не превышает 10…12%.

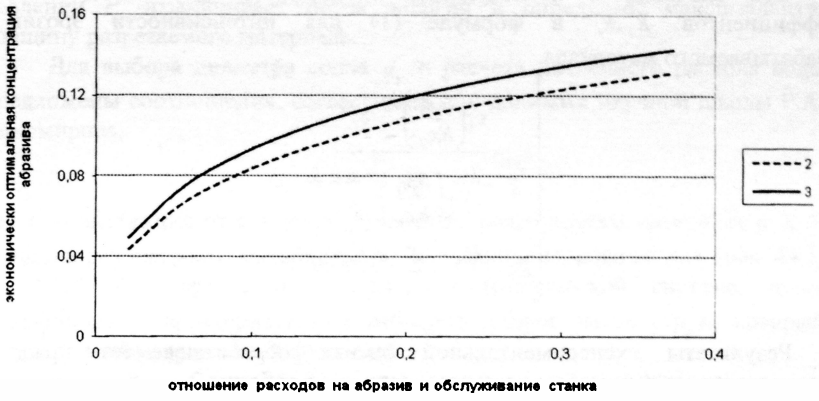


Рис. 2. Зависимость величины c'_{opt} от параметра $\frac{\dot{Ц}_{вн}}{\dot{m}_e Ц_a}$ и показателя n=2, 3

В четвертой главе представлены практические результаты применения методического и программно-математического обеспечения выбора рациональных режимов гидроабразивной резки материалов и конструкций. Разработана методика экспресс - оценки индивидуальной обрабатываемости материалов и конструкций в принятых условиях ГАР. В результате пробных экспериментов, проведенных на одной подаче S, формируются две щелевые каверны (рис. 3) с разными значениями глубин h_1 и h_2.

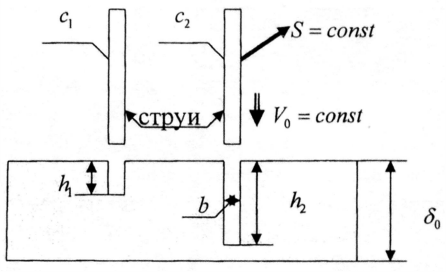


Рис. 3. Схема проведения пробных экспериментов для определения констант в формуле для интенсивности эрозии обрабатываемого материала

Эти значения в последующем используются для определения коэффициентов K_T, k_u в формуле (1) для интенсивности эрозии обрабатываемого материала

$$\begin{cases} k_u = \dfrac{c_2\left(\dfrac{h_2 c_1}{h_1 c_2}\right)^{\frac{1}{n}} - c_1}{1 - \left(\dfrac{h_2 c_1}{h_1 c_2}\right)^{\frac{1}{n}}} \\ K_T = \dfrac{(k_u + c)^n \chi d_c h_2 \rho_{OM} S}{c_2 V_{0u}^n} \end{cases}.$$

Результаты экспериментальной оценки обрабатываемости ряда машиностроительных материалов представлены в таблице 2.

Таблица 2.

Коэффициенты обрабатываемости материалов K_T, k_u и рекомендации по выбору рационального расхода абразива при гидроабразивной обработке

Материал	Скорость подачи, мм/с	K_T	k_u	$\dot{m}^3_{a\ opt}$ (наши рекомендации), кг/мин	$\dot{m}^3_{a\ opt}$ (рекомендации ООО «Старт-РЛ), кг/мин	$\dot{m}^3_{a\ opt}$ (рекомендации фирмы Water Jet), кг/мин	Расхождение ~ 20%
Сталь 45	2	0,625	2,94E-3	0,188	0,2…0,25	0,22	
Сплав ВТ-4	2	0,666	0,7E-3	0,178	0,2	0,2	
Сплав АМг6	5	0,467	2,44E-3	0,148	-	0,125	
Стеклопластик	20	0,681	5,89E-3	0,075	0,1	0,13	
Текстолит	40	1,345	55E-3	0,186	-	-	
Полиуретан	40	0,256	153	0,098	0,1…0,15	-	

Сравнение с рекомендациями фирм ООО «Старт-РЛ» и «Water Jet», полученными опытным путем для отдельных материалов, показывает, что предложенная экспресс-методика выбора оптимального расхода абразива эффективна в условиях освоения новых машиностроительных материалов.

Для уточнения задачи согласованного выбора параметров тракта формирования гидроабразивной струи и кинематических характеристик ГАР использована структурная схема взаимосвязи технических и технико-экономических факторов обработки (диаграмма К.Исикава). Показано, что проектирование технологического процесса ГАР содержит три этапа: выбор оборудования по мощности и рабочему давлению P, выбор оборудования по возможностям системы управления и выбор режимов ГАР. Рабочее давление, развиваемое технологической установкой, определяет скорость абразивно-жидкостной струи и, как следствие, интенсивность эрозии обрабатываемого материала. Важным параметром гидравлического тракта установки является диаметр сопла d_c, который при известном рабочем

давлении P ограничивает поток энергии и определяет максимальную толщину разрезаемого материала.

Для выбора диаметра сопла d_c и расчета потребного расхода воды предложены соотношения, согласующиеся с данными научной школы Р.А. Тихомирова,

$$l_d + \delta_0 \le \omega d_c, \quad Q_\Phi = AK_n \frac{\pi d_c^2}{4}\sqrt{P},$$

где l_d – дистанция от сопловой головки до разрезаемого материала и δ_0 – толщина разрезаемого материала, А – коэффициент, равный для воды 44,3; $K_n = 1{,}5...2$ – коэффициент потерь в гидравлической системе; ω – коэффициент, характеризующий работоспособную часть струи, который является слабовыраженной функцией d_c.

Для выбора скорости подачи сопловой головки в работе предложена функция нескольких переменных c_{opt}^3, d_c, P, δ_0

$$S_{opt} = \frac{K_T c_{opt}^3 (2P/\rho_в)^{\frac{n}{2}} \chi d_c}{2\delta_0 \rho_{OM}\left(k_u + c_{opt}^3\right)^n}.$$

Важный класс конструкций, требующий сокращения затрат на контурную резку, составляют многослойные панели с сотовым заполнителем. Они отличаются неоднородностью толщины и требуют реализации скачкообразного изменения подачи (рис. 4).

Для повышения производительности и экономичности гидроабразивного резания предложено отклонить положение фокусирующей головки на угол α (рис. 4,а) от вертикального направления. При этом помимо роста технико-экономических показателей, обеспечивается высокое качество реза (рис. 4,б).

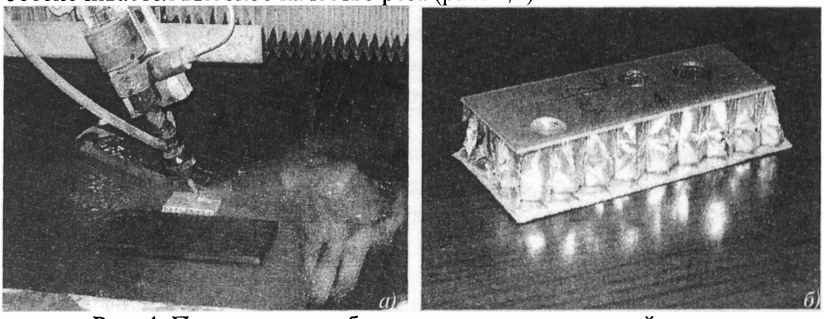


Рис. 4. Процесс гидроабразивного резания сотовой панели и качество реза при отклонении фокусирующей головки от вертикального положения

Для схемы резания, представленной на рис. 5, предложены соотношения и алгоритм (рис. 6) определения оптимального угла α, средней толщины конструкции по ходу струи.

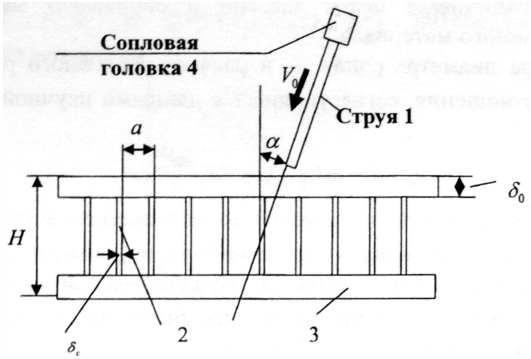


Рис. 5. Схема оптимизации угла падения струи при гидроабразивной резке сотовых панелей

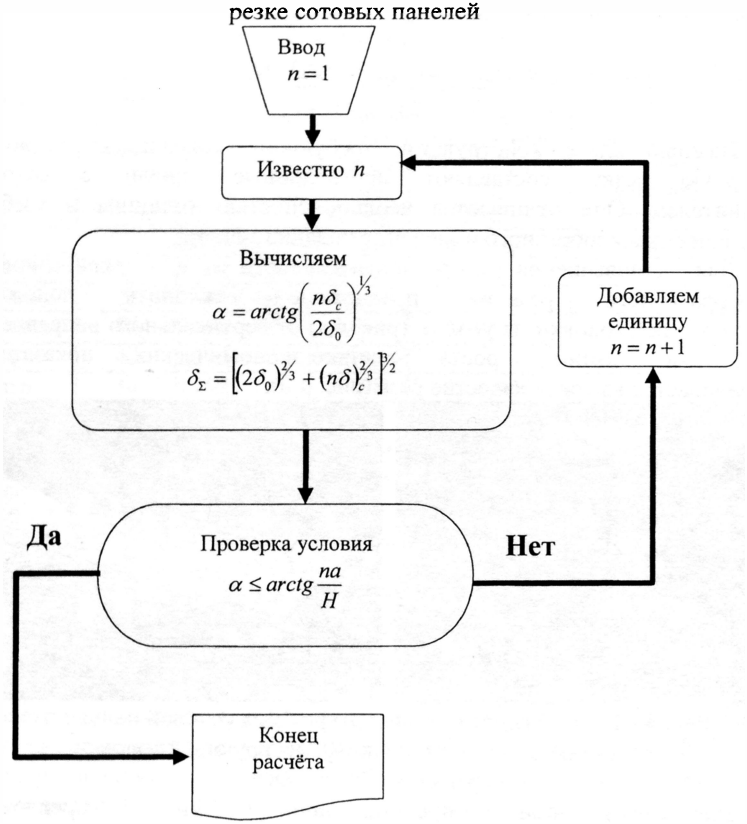


Рис. 6. Блок – схема расчета оптимального угла падения струи на многослойную панель с сотовым заполнителем

Созданное методическое и программно-математическое обеспечение выбора технологических параметров гидроабразивной резки позволяет снизить удельную технологическую себестоимость раскроя материалов на предприятиях машиностроительного комплекса. Указанное обеспечение будет способствовать интеграции технологии гидроабразивного резания в существующие системы автоматизированного проектирования технолога $САПР_Т$.

Полученные результаты прошли успешную апробацию в производственных условиях нескольких предприятий, специализирующихся в технологии ГАР, что подтверждено актами внедрения, представленными в приложении к диссертации.

Материалы диссертационного исследования использованы в учебном процессе, в частности в лабораторном практикуме в Дмитровском филиале МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Основные выводы

1. Технико-экономическая оптимизация является приоритетным направлением развития гидроабразивного резания материалов, которое позволяет сократить расходы на обеспечение технологических процессов изготовления машиностроительной продукции.
2. Рациональный расход абразивного материала определяется соотношением цен на абразив и фокусирующие сопла, затратами на обслуживание гидротехнологического оборудования и связан с технологическими параметрами процесса обработки. Для типовых материалов даны рекомендации по выбору рационального расхода абразива при гидроабразивной обработке.
3. Предложенное в работе методическое обеспечение и рекомендации способствуют интенсификации внедрения технологических процессов гидроабразивного резания в машиностроительное производство:
   - Экспресс – оценивание обрабатываемости материалов в процессах гидроабразивного резания можно осуществить на основе формирования и измерения геометрических параметров щелевых каверн, полученных в пробных экспериментах при двух концентрациях абразива.
   - Применение предложенных алгоритма и программы расчета обеспечивает сокращение трудоемкости выбора рациональных технологических режимов гидроабразивного резания в машиностроительном производстве.
   - Применение полученных данных по обрабатываемости материалов и по режимам гидроабразивного резания в системах

автоматизированного проектирования технолога расширяет технологические возможности существующих САПРт.

- Рациональный угол поворота сопловой головки гидротехнологического оборудования при обработке многослойных панелей с сотовым заполнителем связан с такими конструктивными особенностями, как: размер и толщина стенки сотового заполнителя, толщины облицовочных листов, а также геометрические размеры закладных элементов конструкции.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. Тарасов В.А., Галиновский А.Л., Елфимов В.М. Эрозионное изнашивание обрабатываемой поверхности при циклическом нагружении потоком абразивных частиц // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Специальный выпуск. 2008. С. 163-174.
2. Галиновский А.Л., Елфимов В.М. Научно-методическое обеспечение технологических параметров гидроабразивной обработки конструкционных материалов // Оборонная техника. 2008. № 6. С. 49-54.
3. Галиновский А.Л., Елфимов В.М. Оценка технико-экономической оптимизации технологии гидроабразивного резания конструкционных материалов // Вестник МГИУ. 2008. № 2. С. 20-29.
4. Повышение результативности ультраструйной обработки путем оптимизации кинематического фактора /А.А.Барзов [и др.] // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Специальный выпуск. 2010. С.217-229.
5. Тарасов В.А., Галиновский А.Л., Елфимов В.М. Минимизация технологической себестоимости гидроабразивного резания с учетом стоимостных и технологических параметров процесса обработки // Известия вузов. Машиностроение. 2011. №4. С. 46-53
6. Технико-экономическая оптимизация технологических параметров гидрорезания / А.Л. Галиновский [и др.] // Физическая гидродинамика. 2007 (Препринт Изд-во: МГУ им. М.В. Ломоносова. 2007. Выпуск 20. № 9, 31 с.)
7. Методика рационального выбора технологии гидроабразивного и гидроструйного резания / Барзов А.А. [и др.] // Инновационный менеджмент в производстве и сервисе: Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Кострома. (ноябрь). 2009. С. 6-11.
8. Галиновский А.Л., Гуревский А.В., Елфимов В.М. Технологии гидроструйной и гидроабразивной обработки материалов в современном машиностроении. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2009. 36 с.