

Проблемы и перспективы развития гидроструйных технологий в ракетно-космической технике

© В.А. Тарасов, А.Л. Галиновский

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Рассмотрены вопросы состояния гидроструйных технологий, перспективы их совершенствования на основе теоретических и экспериментальных исследований. Особое внимание уделено аспектам изучения характеристик физических явлений, сопровождающих процесс гидроструйной обработки материалов, а также взаимосвязям этих характеристик с технологическими параметрами. Проведен анализ экспериментальных и теоретических данных, позволивший выявить группы коррелирующих факторов гидроструйной обработки материалов и жидкостей, а также установить малоизученные области технологических параметров, с достаточно высокой степенью вероятности являющихся перспективными для развития новых гидротехнологий. По результатам численного моделирования методом конечных элементов определены основные этапы, соответствующие последовательному развитию волновых процессов в материале преграды и на ее поверхности.

Сделан акцент на перспективные инновационные направления развития исследований в области прикладных аспектов гидротехнологий — диагностику материалов и покрытий, приготовление наносuspензий, обеззараживание и активацию гидротехнологических сред и др.

Ключевые слова: высокоскоростная струя жидкости, материал, эрозия, суспензия, диагностика, гидроструйная обработка.

В настоящее время технологии гидрорезания (ГР) и гидроабразивного резания (ГАР) металлов, тугоплавких, жаропрочных и титановых сплавов, конструкционной керамики, композиционных и других материалов нашли широкое применение при создании ракетно-космической техники и заняли свою нишу наряду с традиционными и относительно новыми высокотехнологичными видами обработки материалов.

Энергетической основой гидроструйных технологий является процесс превращения работы, совершаемой главными исполнительными органами технологического оборудования — мультипликатором или плунжером, в кинетическую энергию струи жидкости малого диаметра. Это достигается путем сжатия рабочей жидкости (обычно воды) до сверхвысоких давлений ($p \sim 400$ МПа) и ее последующего продавливания через специально профилированное гидросопло малого диаметра ($d_c \sim 0,10 \dots 0,25$ мм). На выходе из гидросопла компактная струя воды имеет высокую скорость ($v \sim 800 \dots 900$ м/с) и обладает значитель-

ной удельной кинетической энергией ($E_k > 100$ МДж/кг). Кинетическая энергия высокоскоростной струи жидкости в зоне обработки материалов превращается в механическую работу, например в резание.

В последние годы появились работы [1–3], в которых помимо рассмотрения традиционных областей применения гидроструйных технологий формируется научно-методическая база новых, достаточно специфических направлений их практической реализации (рис. 1):

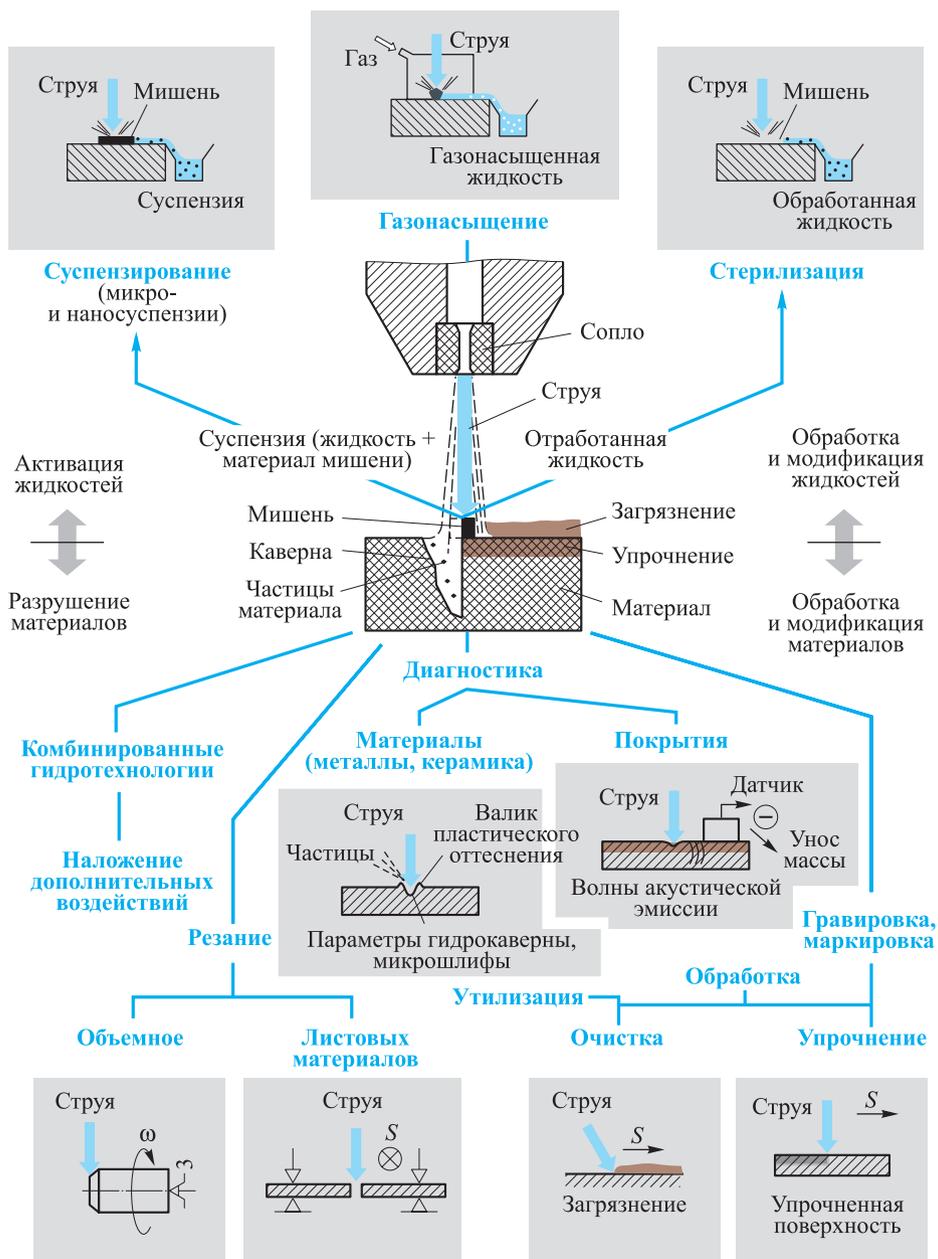


Рис. 1. Технологические возможности гидроструйных технологий

- гидроструйная обработка (активация) гидротехнологических сред, применяемых в машиностроительном производстве, в результате которой они приобретают новые потребительские свойства [1];

- гидроструйная диагностика деталей и изделий ракетно-космической техники (РКТ) для получения оперативной информации об эксплуатационно-технологических параметрах поверхностного слоя материала;

- гидроструйная технология получения микро- и наносuspensions на основе управляемой эрозии поверхностного слоя материала мишени.

Все традиционные и новые гидротехнологии объединяет обобщающий фактор — интенсивная эрозия поверхности твердого тела под действием высокоскоростной струи жидкости. В процессе эрозии участвует несколько факторов, среди которых следует назвать накопление поврежденности в материале, возникающие вследствие его деформации в поверхностном слое, распространение волн напряжения, поперечное растекание струи жидкости и ее дальнейшее проникание внутрь материала [4].

Под действием одного или нескольких из этих факторов (механизмов) возникает повреждение, а затем унос материала. Накопление поврежденности в материале преграды развивается как сложный динамический процесс, состоящий из ряда взаимосвязанных событий. Кроме очевидных результатов удара струи, на процесс эрозии влияют возникающие и перемещающиеся по материалу волны напряжений, последовательно отделяющиеся от места контакта продольные (дилатационные), поперечные (искажений, или деформации сдвига) и поверхностные волны Рэлея.

Помимо мощного широкополосного акустически-волнового возмущения зоны взаимодействия гидроструи и преграды в ней имеют место интенсивная механоэмиссия электронов и другие явления электромагнитной природы. Кроме того, после воздействия высокоскоростной струи жидкости достигается такое деформированное состояние, при котором на отдельных участках поверхности преграды значительно возрастает концентрация дислокаций, внутренние напряжения превышают сопротивление излому и возникает трещина. Углубления на поверхности и кольцевые трещины образуются в результате деформаций материала под действием радиально расширяющегося пятна контакта гидроструи и преграды. Повреждения такого рода вызываются значительными растягивающими изгибающими напряжениями, что получило название «механизм Инджел—Файелла». Процесс эрозии происходит вследствие развития этих трещин, а интенсификация разрушения материала связана с отмеченной выше волновой спецификой. Все перечисленные явления в наибольшей степени оказывают заметный вклад в процесс обработки материалов струей жидкости. В слу-

чае гидроабразивной обработки механизм разрушения материала еще более усложняется процессом взаимодействия абразива с обрабатываемой поверхностью.

В данной работе проведен экспериментально-теоретический анализ факторов гидроструйной обработки с целью установления взаимодействий между технологическими режимами, свойствами преграды и уровнем параметров, характеризующих факторы обработки.

Исследование волновых особенностей гидротехнологии проводилось с использованием аппарата механики сплошной среды. При решении задачи была использована замкнутая система уравнений, которая описывает движение и состояние сплошной среды с учетом ее физико-механических свойств и внешних силовых факторов, а также позволяет найти все функции, определяющие движение и состояние среды (скорость, давление и др.) в зависимости от координат и времени. Идеализированная расчетная схема рассматриваемого процесса (представлена в начальный момент времени) показана на рис. 2.

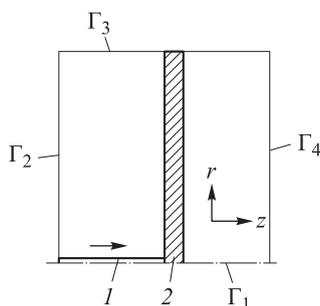


Рис. 2. Расчетная схема взаимодействия гидроструи жидкости (воды) с преградой (мишенью):

1 — струя жидкости (воды), движущаяся со скоростью $V_0 = 0,8 \dots 1,2$ км/с; 2 — обрабатываемый материал (мишень); Γ_1 — Γ_4 — прямые, ограничивающие рассматриваемую область

Моделирование производилось в относительной системе координат с точкой начала координат в месте соприкосновения гидроструи и мишени. При этом для описания поведения взаимодействующих материалов принималась идеальная упругопластическая модель среды.

Задача решалась в двумерной постановке в переменных Эйлера. Система уравнений, описывающая осесимметричное течение, имела классический вид [5, 6].

На основе расчетной схемы (см. рис. 2) было проведено моделирование взаимодействия гидроструи с преградой (материал — сталь 20) для выявления закономерностей зарождения и развития совокупности волновых процессов в зоне гидрообработки материала.

На рис. 3 представлены результаты численного моделирования и определены основные этапы процесса, соответствующие последовательному развитию волновых процессов в материале преграды

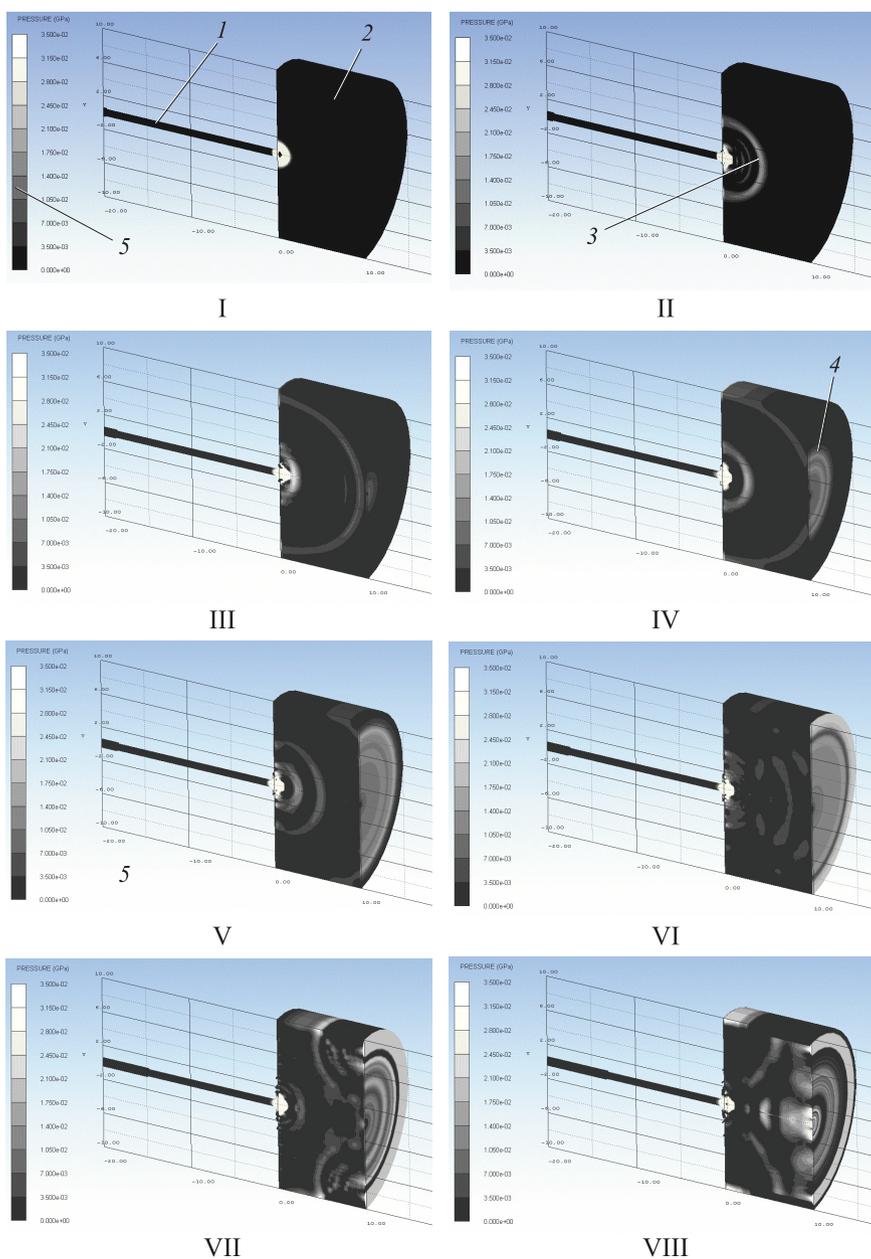


Рис. 3. Этапы развития волновых процессов (3D-модель) при взаимодействии высокоскоростной гидроструи воды с цилиндрической металлической (сталь 20) преградой:

1 — ультраструя жидкости; 2 — мишень (сталь 20); 3 — волны деформаций продольные; 4 — поверхностные волны Рэлея; 5 — шкала напряжений, ТПа

и на ее поверхности. На данном рисунке можно проследить поэтапное возникновение волновых флуктуаций при взаимодействии в некоторой достаточно малой области поверхности и/или подповерхностном слое мишени различных по мощности и типу волн упругой деформации. При этом напряженно-деформированное состояние материала мишени в месте появления волновых флуктуаций достигает критического значения. Безусловно, это приводит к изменению структуры материала, в частности к локальному пластическому течению, оттеснению поверхностных слоев на периферию области удара гидроструи, формированию микро- и субмикротещин, а также к их развитию в течение времени воздействия на преграду (мишень).

Очевидно, что исследование этих факторов должно завершиться построением математических моделей и установлением взаимосвязей между ними и другими технологическими параметрами гидроструйной обработки.

В настоящее время отечественные и зарубежные ученые провели достаточное количество исследований, в ходе которых установлен ряд взаимосвязей между входными технологическими и выходными эксплуатационными параметрами, позволяющими оптимизировать существующие гидроструйные технологии обработки материалов по различным критериям [7–9].

В качестве иллюстрации на рис. 4 представлена экспериментальная зависимость глубины нарезаемой щели в материале от отношения массового расхода абразива m_a к массовому расходу воды m_b при разрушении мрамора [7]. Данные зависимости подтверждены результатами теоретических исследований, доказывающих наличие оптимальной концентрации абразива по критерию максимальной производительности гидроабразивной обработки [8].

Зависимость, представленная на рис. 5, выявлена в результате конечно-элементного моделирования процесса взаимодействия высокоскоростной струи жидкости с алюминиевой преградой, демонстрирует

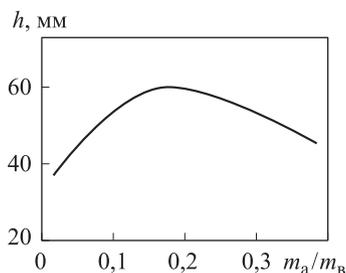


Рис. 4. Зависимость глубины h нарезаемой щели от отношения массового расхода абразива к массовому расходу воды m_a/m_b при разрушении мрамора

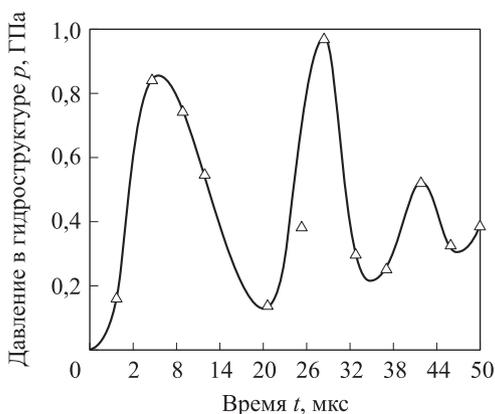


Рис. 5. Изменение давления в месте взаимодействия гидроструи и преграды по времени (Δ — расчетные значения)

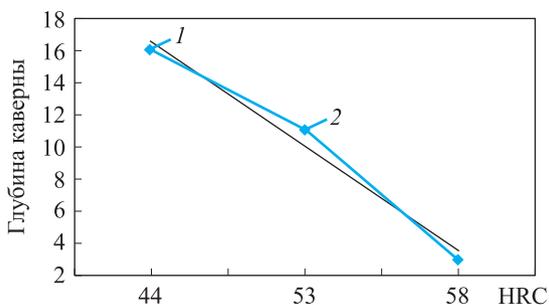


Рис. 6. Зависимость глубины образовавшейся гидрокаверны от твердости образца, изготовленного из стали 37Х2НВМБР:

1 — линейная аппроксимация; 2 — значение глубины гидрокаверны от твердости

затухающий синусоидальный колебательный характер функции изменения давления [9]. Полученные данные показывают наличие волнового фактора взаимодействия гидроструи и преграды и несут информацию о высокой интенсивности энергетических превращений в этой зоне.

В результате экспериментов по изучению параметров гидроэрозии и физико-механических характеристик материала была установлена зависимость между глубиной гидрокаверны и твердостью образцов, изготовленных из стали 37Х2НВМБР и прошедших термообработку на различных технологических режимах (рис. 6). Рассчитанный коэффициент ранговой корреляции между рассматриваемыми параметрами по Спирмену составил $P = -0,94$, а коэффициент линейной корреляции составил $R = -0,96$ [10].

Для гидроабразивной обработки на рис. 7 представлены сопоставительные данные экспериментальных и теоретических исследований, демонстрирующие взаимосвязь уровня акустической эмиссии (АЭ),

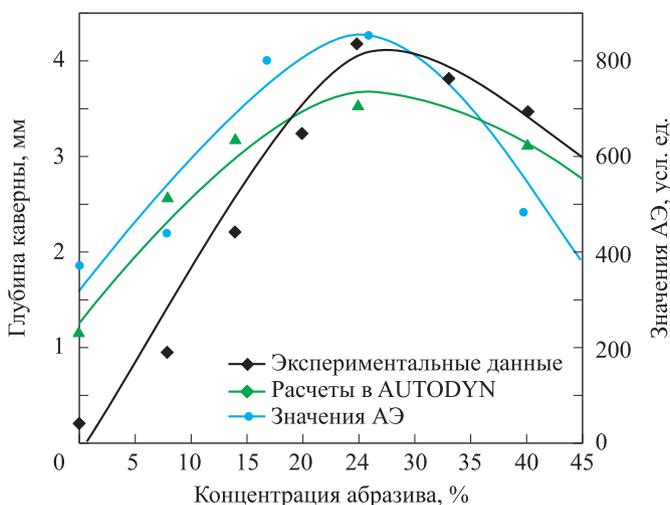


Рис. 7. Сопоставление результатов моделирования производительности гидроабразивного резания с данными эксперимента и полученными значениями сигнала АЭ для стали 10

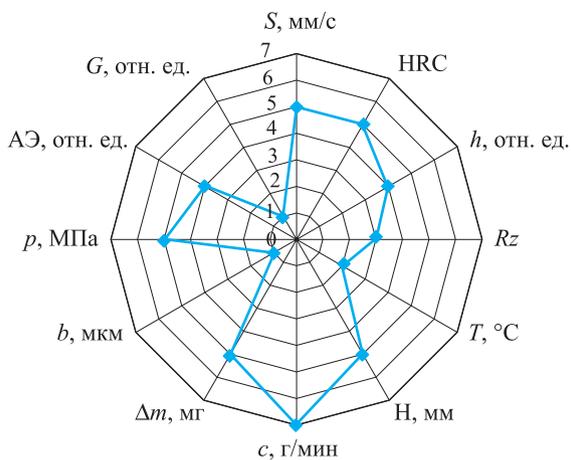


Рис. 8. Количество взаимосвязей (1–7) для параметров гидроструйной обработки материалов и жидкостей

глубины каверны и концентрации абразива в гидроструе на примере обработки стали 10. Полученные результаты позволяют говорить о возможности использования АЭ для экспресс-оценки рационального режима гидроабразивной обработки материала в соответствии с известными исследованиями и положениями теории свободных струй [11].

Системный анализ данных, в частности, представленных на рис. 4–7, а также результатов исследований ряда авторов [1–3, 7–11] позволил сформировать таблицу соответствия различных параметров гидроструй-

Наличие, ожидание и отсутствие установленных зависимостей между параметрами

Показатель	АЭ, отн. ед	S , мм/с	HRC	h , отн. ед.	R_z	T , °C	H , мм	c , г/мин	Δm , мг	b , мкм	p , МПа	G , отн. ед
S , мм/с	—	0	+	+	+		+	+	+		0	
HRC	—	+	0			+		+	+	+		
h , отн. ед	—	+		0	+		0	+			+	
R_z	—	+		+	0			+				
T , °C	—		+			0					+	
H , мм	+	+		0			0	+		0	+	+
c , г/мин	+	+	+	+	+		+	0	+	0	0	
Δm , мг	+		+					+	0		+	
b , мкм			+				0	0		0		
p , МПа	+	0		+		+	+	0	+		0	
АЭ, отн. ед							+	+	+		+	
G , отн. ед							+					

Примечание. АЭ — акустическая эмиссия, отн. ед; S — скорость подачи гидро/гидроабразивной струи, мм/с; HRC — твердость обрабатываемого материала; h — толщина обрабатываемого материала, отн. ед.; R_z — шероховатость поверхности, мкм; T — температура гидроструи, °C; H — глубина гидроаверны, мм; c — концентрация абразива, г/мин; Δm — унос массы материала вследствие эрозии, мг; b — величина валика пластического отгеснения материала, мкм; p — давление жидкости, создаваемое насосом высокого давления, МПа; G — газонасыщение струи жидкости/суспензии, отн. ед. Заштрихованная область — область установленных взаимосвязей параметров, нуль иллюстрирует невозможность определения взаимосвязи, пустые ячейки говорят об отсутствии работ по установлению взаимосвязей между параметрами.

ной и гидроабразивной обработки. Из представленной выше таблицы следует, что разработанное научно-методическое обеспечение этих технологий охватывает далеко не весь спектр возможных задач их совершенствования и оптимизации, в настоящее время установлено лишь около 40 % возможных взаимосвязей факторов и параметров, причем некоторые из них изучены крайне недостаточно, что следует из результатов сопоставительного анализа (рис. 8). Таким образом, существуют реальные предпосылки для развития, продолжения совершенствования,

а также для нахождения новых областей применения и расширения сферы традиционной реализации обработки материалов и жидкостей с использованием высокоскоростных гидроструй.

В связи с этим следует отметить способность гидроструйной технологии к изменению свойств самой жидкости (воды) или суспензии на ее основе, подвергающейся энергетически экстремальному ударно-динамическому воздействию со стороны твердотельной мишени. В результате существования совокупности взаимно обусловленных прямых и обратных связей между физическими, энергетическими, химическими и другими параметрами жидкости и твердого тела происходят изменения их свойств, интенсивное диспергирование (разрушение), т. е. эрозия (твердого тела) и спреобразование (жидкости). Именно сочетание этих активирующих факторов приводит к тому, что гидроструйные суспензии приобретают новые функциональные свойства, в частности сильный стерилизующий (бактерицидный) эффект, изменение биологической активности и другие потребительские свойства, важные при производстве и хранении смазочных гидротехнологических сред машиностроительного назначения.

Если рассматривать гидроструйные технологии в другой плоскости, актуальной становится поисковая задача использования высокоскоростной струи в качестве средства ускоренного определения эксплуатационно-технологических и физико-механических характеристик поверхностного слоя материалов и изделий ракетно-космической техники (см. рис. 1). По результатам выполненных исследований было выявлено наличие однозначной связи физико-механических характеристик поверхностного слоя материала объекта контроля с параметрами его гидроэрозионного разрушения сверхзвуковой струей жидкости, что позволяет путем анализа параметров гидроразрушения получать информацию о его эксплуатационно-технологических и физико-механических характеристиках, в частности о поврежденности, твердости, напряженно-деформированном состоянии и т. д.

В заключение можно отметить следующее:

- полученная обобщающая зависимость между интенсивностью эрозионного изнашивания обрабатываемого материала и концентрацией абразива имеет важное значение для выбора рациональных режимов гидроабразивной обработки;

- установленные корреляционные зависимости между глубиной образовавшейся в результате гидроструйного воздействия каверны и твердостью исследуемого материала позволяет сделать вывод о возможности разработки метода гидроструйной диагностики материалов;

- определенное доминирующее влияние малоциклового усталостно-волнового механизма гидроэрозионного разрушения поверхностного

слоя материала твердотельной мишени может служить основой диагностики остаточного ресурса после проведения испытаний малоресурсной техники.

Данное исследование проводилось в рамках грантов Президента РФ №16.120.11.5069-МД, РФФИ №12-08-33022 мол_a_вед и государственного задания №01201261758 от 23.05.2012.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Барзов А.А., Галиновский А.Л., Пузаков В.С., Сидельников К.Е. *Ультроструйная технология активации жидкостей*. Москва, Машиностроение-1, 2006.
- [2] Барсуков Г.В., Алюшин Е.Г., Шоркин В.С. Совершенствование технологии гидроабразивного резания на основе направленных вибраций материала. *Наукоёмкие технологии в машиностроении*, 2012, № 5, с. 3–6.
- [3] Степанов Ю.С., Барсуков Г.В., Алюшин Е.Г. Современные технологии гидро- и гидроабразивной обработки заготовок. *Наукоёмкие технологии в машиностроении*, 2012, № 6, с. 15–20.
- [4] Халилова Т.Ф. *Численное моделирование сильного сжатия кавитационного пузырька*. Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук, Казань, 2009, 18 с.
- [5] Орленко Л.П., ред. *Физика взрыва*. Изд. 3-е, испр. В 2 т. Т. 2. Москва, ФИЗМАТЛИТ, 2004, 656 с.
- [6] Бабкин А.В., Колпаков В.И., Охитин В.Н., Селиванов В.В. *Численные методы в задачах физики быстропотекающих процессов*. Изд. 2-е, испр. Т. 3. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006, 520 с.
- [7] Бреннер В.А., Жабин А.Б., Пушкарев А.Е., Щеголевский М.М. *Гидроабразивное резание горных пород*. Москва, Изд-во Московского государственного горного университета, 2003, 279 с.
- [8] 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*, 2008, спец. вып., с. 163–174.
- [9] Барзов А.А., Галиновский А.Л., Пузаков В.С. *Ультроструйные технологии жидкостей и суспензий*. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009, 250 с.
- [10] Абашин М.И. *Ускоренное определение параметров качества поверхностного слоя материала изделий по результатам воздействия на него сверхзвуковой струи жидкости*. Автореф. ... дис. канд. техн. наук. Москва, 2013, 17 с.
- [11] Ерухимович Ю.Э. *Математическое моделирование и совершенствование метода расчета эффективности процесса резания горных пород гидроабразивным инструментом*. Автореф. ... дис. канд. техн. наук, Тула, 1999.

Статья поступила в редакцию 21.05.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

В.А. Тарасов, А.Л. Галиновский. Проблемы и перспективы развития гидроструйных технологий в ракетно-космической технике. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 3. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/636.html>

Тарасов Владимир Алексеевич родился в 1946 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1969 г. Д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой «Технологии ракетно-космического

машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 200 научных работ в области технологии машиностроения, контроля и диагностики. e-mail: tarasov_va@mail.ru

Галиновский Андрей Леонидович родился в 1974 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 1999 г. Д-р пед. наук, канд. техн. наук, проф. кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 100 научных работ в области технологии машиностроения, контроля и диагностики. e-mail: galcomputer@mail.ru