

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ УЛЬТРАСТРУЙНОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

А. А. Барзов, А. Л. Галиновский, О. Ю. Елагина

В работе рассматриваются области применения ультразвуковых технологий в машиностроении. Сделаны выводы о потенциальных возможностях использования ультразвука жидкости в качестве средства контроля эксплуатационно-технологических параметров состояния поверхностного слоя различных объектов. На основе феноменологических предположений сделаны выводы о перспективности использования ультразвуковой диагностики в решении вопроса обеспечения промышленной безопасности.

Ключевые слова: диагностика, ультразвуковые гидротехнологии, промышленная безопасность.

Введение

Первыми способ гидроструйной обработки материалов запатентовали¹ представители фирмы *McCartney Manufacturing's* (США) и успешно применили его в 1971 году на заводе *Alton Box Board Co.* для резки материалов [1]. В СССР работы по изучению и исследованию ультразвуковых гидротехнологий (УСТ) начались в конце 50-х – начале 60-х годов прошлого века [2, 3]. Перспективность использования и технико-экономическая эффективность данных технологий отмечена в трудах отечественных и зарубежных ученых: Р.А. Тихомирова, В.М. Степанова, В.А. Бреннера, А.Б. Жабина, А.Е. Пушкарева, М.М. Щеголевского, Е.Н. Петухова, Д.В. Кравченко, Г.В. Барсукова, В.А. Потапова, С.Н. Полянского, В.В. Розанова, А.Е. Проволоцкого, Р.А. Кузмина, А.А. Барзова, В.С. Пузакова, В.Н. Бернадского, G. Zhou, D. Arola, D. Summers, A. Momber, M. Hashishi, M. Hessling, H. Blickwedel, J. Zeng, Y. Zhang, H. Louis и др.

К настоящему времени УСТ уверенно вошли в мировой арсенал самых современных универ-

сальных способов физико-технической обработки материалов, обладающих широкими технологическими возможностями.

Однако, как показали предварительные исследования, возможности данной технологии определяют существенно более широкую сферу ее практических приложений в ведущих отраслях промышленности и коммерческой деятельности.

Поэтому под УСТ будем понимать совокупность технологических методов и технических средств создания и реализации таких параметров высокоэнергетической компактной струи жидкости, которые при ее взаимодействии с окружающей средой, например при ударно-динамическом торможении о твердый объект, способны привести к фиксируемым целенаправленным изменениям в обрабатываемом материале и/или в самой жидкости.

Используя функциональную инверсию такой технологической системы, как режущий инструмент–обрабатываемый материал, в МГТУ им. Н.Э. Баумана было показано, что

¹ B. C. Schwacha (North American Aviation Inc.). Liquid cutting of hard materials. U.S. Patent No. 2985050. ICP B26F 3/00. / (USA).

сверхскоростную струю жидкости можно рассматривать не только как режущий инструмент при гидрорезании материалов, но и как специфический обрабатываемый материал – гидротехнологическую среду, подвергаемую ультразвуковой активации [4]. Кроме того, было установлено, что ультразвуковая струя жидкости может являться универсальным контрольно-диагностическим инструментом, позволяющим получать оперативную информацию о параметрах состояния поверхностного слоя деталей.

Характеристики и области применения ультразвуковых технологий

Энергетической основой УСТ является процесс превращения работы, совершаемой главными исполнительными органами технологического оборудования мультипликатора или плунжера, 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 спроектированное гидросопло малого диаметра ($d_c \sim 0,10-0,25$ мм). На выходе из гидросопла компактная струя воды имеет сверхзвуковую скорость ($v \sim 800-900$ м/с) и обладает большой удельной кинетической энергией ($E_k > 100$ МДж/кг). Кинетическая энергия сверхзвуковой струи жидкости в зоне обработки материалов превращается в механическую работу, например в работу резания. Благодаря этому струя жидкости способна разрушать неметаллические материалы и металлические сплавы практически любой прочности, широко применяемые в промышленной теплоэнергетике [5–7]. В качестве иллюстрации на рис. 1 представлены существующие и перспективные области применения УСТ.

Принципиально важное практическое значение имеет multifunctionальность УСТ, заключающаяся, прежде всего, в возможности совмещения операций (получения образцов,

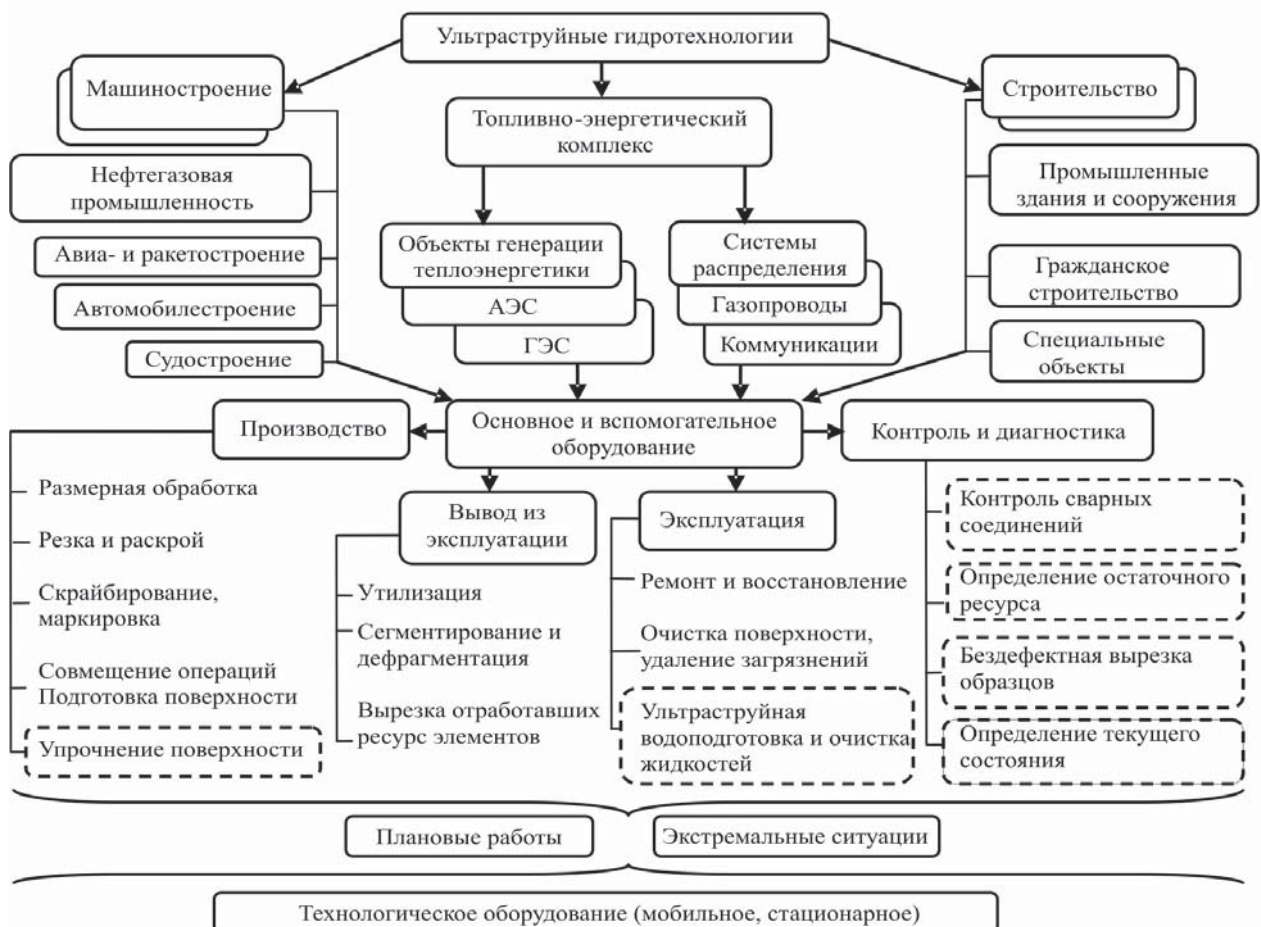


Рис. 1. Области применения ультразвуковых технологий:
— реализованные возможности; - - - предполагаемые области применения

диагностики образцов, очистки образцов, резки и размерной обработки материала и т.д.). Использование универсального ультразвукового оборудования позволит использовать его для решения весьма широкого круга задач: от производства изделий и их диагностики до утилизации при выводе из эксплуатации.

Необходимо отметить области применения УСТ в топливно-энергетическом комплексе (ТЭК), где у нее практически нет альтернативных технологических решений и где ждут развития данной технологии:

очистка и обработка различных материалов без вредных и токсичных газовыделений: резина, пластики, композиты;

очистка загрязненных мазутом, отложениями нефти и нефтепродуктов трубопроводов и коммуникаций;

разрезка, сегментация и утилизация объектов ТЭК (танкеры, нефтепроводы, резервуары-хранилища, цистерны) при отсутствии пожароопасного фактора обработки;

резка и размерная обработка материалов под водой при прокладке подводных нефте- и газопроводов, добыче полезных ископаемых с использованием морских платформ.

Технология ультразвукового гидродиагностирования

Согласно схеме (см. рис. 1) целесообразной и перспективной является попытка экспериментально-теоретического анализа возможностей использования ультразвука жидкости в качестве нового средства исследования и инструментального контроля эксплуатационно-технологических параметров состояния поверхностного слоя различных объектов. Вероятно, в перспективе реализация этой идеи позволит создать высокоэффективный аппарат ультразвуковой диагностики (УСД), способный оперативно решать ряд практически важных вопросов, в первую очередь связанных с оценкой остаточного ресурса материалов конструкций потенциально-опасных объектов, в частности, ТЭК, транспортных систем, АЭС и т.д.

При этом физическая сущность данного способа диагностики будет неизменна, так как она неразрывно связана с анализом и практическим использованием механизмов взаимодействия ультразвука жидкости с твердым телом, в частности с механизмом его гидродразрушения.

Как показал анализ, УСД позволит определять параметры состояния поверхностных

и подповерхностных слоев изделий, соответствующие их прочностным, усталостным и иным эксплуатационным характеристикам, связанным с поврежденностью конструкционного материала и остаточным ресурсом объекта диагностики в целом, наличия в нем дефектов и остаточных напряжений.

Суть УСД состоит в оценке параметров воздействия на определенные участки поверхности контролируемого (диагностируемого) объекта жидкостной или абразивно-жидкостной струи: пластическая деформация поверхностного слоя; продукты гидроэрозии и т.д. Так, например, может быть определена интенсивность гидроэрозии (унос массы в единицу времени). Далее, полученные результаты сравниваются с исходными данными по идентичному струйному воздействию на образцы аналогичного конструкционного материала с известными физико-механическими свойствами (эталона). Различия результатов этих воздействий (диагностического и эталонного) будут свидетельствовать о физико-механическом состоянии поверхностных и/или подповерхностных слоев материала контролируемого объекта, элемента конструкции, серийной детали или лабораторного образца исследуемого материала.

В качестве эталона сравнения можно использовать априори наиболее качественные (менее дефектные, с большим остаточным ресурсом) участки самой диагностируемой конструкции, в частности, ее наименее нагруженные зоны, элементы и т.д. Эталоны для сравнения могут быть специально созданы при формировании диагностируемой в будущем конструкции (образцы-свидетели с легко определяемыми физико-механическими свойствами на основе проведения прямых экспериментов) или вырезаны, например методом гидроабразивной резки, из исследуемой эксплуатируемой конструкции с последующим ремонтом образующихся повреждений.

Восстановление участков поверхности конструкции, подвергнутых струйному диагностированию, также может быть осуществлено путем заполнения образующихся гидрокаверн, например в конструкциях из железобетона, ремонтным составом с целью, как минимум, неумения несущей способности (ресурса) объекта контроля.

Можно выделить основные этапы УСД.

1. На поверхность объекта контроля оказывается гидроструйное воздействие, вызывающее

гидроэрозию поверхности при определенных режимах: заданном рабочем давлении струи, ее диаметре, рациональной кинематике движения по диагностируемой поверхности и т.д.

2. Параметры гидроэрозии (геометрические характеристики гидрокаверны, масса и размеры частиц материала, структура материала в месте реза и т.д.) сравниваются с эталонными характеристиками и/или между собой на различных участках поверхности.

3. По результатам сравнений (абсолютной и/или относительной) можно судить о качестве (остаточном ресурсе, физико-механических свойствах) контролируемого участка (участков) поверхности и о текущем и/или прогнозируемом состоянии объекта в целом.

Важным прикладным аспектом УСД является возможность проведения выходного технологического контроля качества изготавливаемой продукции, достоверной экспресс-оценки эксплуатационных параметров поверхностных и подповерхностных слоев (участков) объектов и деталей промышленного назначения, наиболее уязвимых при изготовлении и функционировании. Применение УСД может способствовать повышению производительности процедуры контроля и дает возможность ее совмещения с другими технологическими операциями, например со струйной очисткой поверхности от загрязнений для последующей окраски, сварки, склеивания и т.д.

С практической точки зрения, использование УСД имеет также важное значение на завершающих этапах гарантийного срока эксплуатации

изделий, например для обоснования его возможного продления, что является актуальной задачей для современной промышленности. Кроме этого, УСД будет весьма полезной в качестве инструмента оперативного диагностирования объектов, подвергшихся нерасчетным режимам эксплуатации, например при оценке состояния несущих конструкций после стихийных бедствий: пожара, наводнения, землетрясения и т.д. Весьма вероятно, что в недалеком будущем УСД войдет в число средств, обеспечивающих контроль безопасной эксплуатации технически сложных изделий по их фактическому ресурсу.

Таким образом, сфера практических приложений УСД охватывает информационно-диагностическое обеспечение всех ключевых этапов жизненного цикла изделий и объектов различного назначения. Ультразвуковая диагностика обеспечивает получение оперативной и достоверной диагностической информации о параметрах состояния, в первую очередь поврежденности и физико-механических свойствах поверхностных и подповерхностных слоев, соизмеримых с геометрическими параметрами гидроструйной эрозии.

Результаты предварительных экспериментальных исследований

Авторы исследовали возможности УСД для экспресс-контроля эффективности химико-термической обработки, существенно повышающей эксплуатационные характеристики поверхностного слоя деталей за счет увеличения твердости материала, улучшения его структу-



Рис. 2. Профилограмма поверхности гидрокаверны неупрочненной шестерни (масштаб по вертикальной оси – 50 нм/см, по горизонтальной оси – 500 нм/см, протяженность замера – 9 мм)

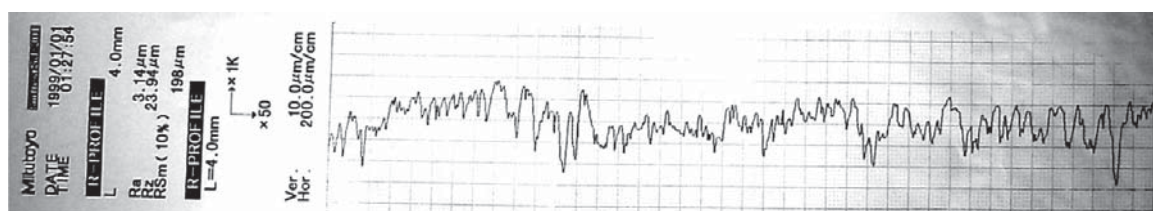


Рис. 3. Профилограмма поверхности упрочненной шестерни (масштаб по вертикальной оси 10 нм/см, по горизонтальной оси – 200 нм/см, протяженность замера – 4 мм)

ры и т.д.

В экспериментах проводилась УСД поверхности (до и после химико-термического упрочнения (цементации)) шестерни коробки двигательного агрегата типового газотурбинного двигателя, изготовленного из стали 16Х3МВФАБ-Ш. Ультразвуковая диагностика поверхности шестерни велась гидроструей со следующими параметрами: рабочее давление жидкости – 400 МПа; подача – 5 мм/с; диаметр гидросопла – 0,15 мм.

Результат воздействия ультразвука на поверхность шестерни контролировался с помощью портативного индукционного профилометра, что позволило получить профилограммы гидрокаверн на поверхности неупрочненной и цементированной детали (рис. 2 и 3).

На профилограмме поверхности неупрочненной детали отмечается ярко выраженная гидрокаверна, а параметры гидрокаверны упрочненной детали лежат в пределах шероховатости поверхности самой шестерни. Полученные данные показывают возможность применения УСД в качестве средства технологического контроля твердости деталей после их химико-термической обработки.

В другой части эксперимента осуществлялось экспресс-определение эксплуатационно-технологических свойств материалов, заключающееся в исследовании геометрических характеристик гидрокаверн, полученных на образцах после азотирования в течение 5, 10 и 15 ч и на образце, не подвергнутому азотированию.

В результате изучения каверн на поверхности образцов (рис. 4), подвергнутых гидроэрозионному воздействию, были сделаны выводы о том, что в качестве критериев диагностирования для высокотвердых (в нашем случае азотированных) образцов может выступать как глубина каверны, так и ее площадь. Сравнительный анализ результатов изучения геометрических параметров (глубины) гидрокаверн образцов с характеристиками глубины азотированного слоя позволил установить значение корреляции между ними (0,967). Данный результат подтверждает целесообразность применения УСД как средства оперативного контроля эксплуатационно-технологических параметров качества поверхностного слоя различных объектов.

Аналогичные исследования проводились и для анализа параметров гидрокаверн, получен-

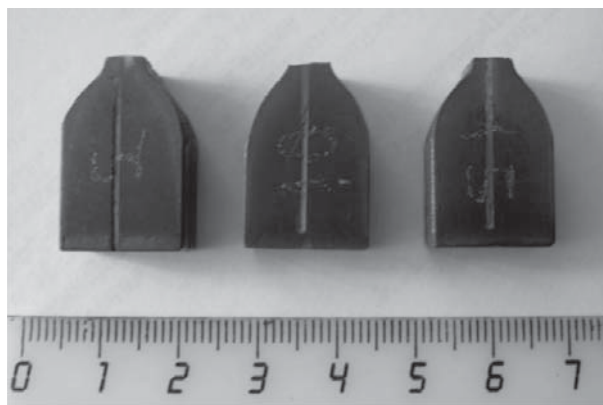


Рис. 4. Азотированные образцы после гидроэрозионного воздействия



Рис. 5. Образец после износостойких испытаний, подвергнутый гидроэрозионному воздействию

ных на азотированных образцах, подвергнутых износостойким испытаниям с помощью машины трения. Без специальных оптических приборов можно установить отличие геометрических параметров гидрокаверны (большая ширина и глубина) в зоне действия истирающих нагрузок и на периферии образца, подвергнутого ультразвуковому воздействию (рис. 5).

Заключение

Исследования показали, что экспресс-методика оценки характеристик качества поверхностного слоя деталей обеспечивает получение необходимой информации о параметрах его состояния. Диагностика осуществляется путем кратковременного (5–10 с) воздействия на объект контроля ультразвуковой воды с последующим масс-геометрическим анализом продуктов гидроэрозионного разрушения и характера пластического деформирования в зоне удара. На практике это позволит обеспечить необходимую информативность и производительность при проведении экспресс-оценки качества упрочнения поверхности, определения уровня остаточных напряжений в детали, а также прогнозирования ресурса объекта (детали)

в целом. Результаты экспериментов позволяют утверждать, что метод УСД имеет широкие перспективы применения в различных областях промышленности. Однако необходимо проведение теоретических и дополнительных экспериментальных исследований.

Список литературы

1. Ковшов А.Н., Назаров Ю.Ф., Ярославцев В.М. Нетрадиционные методы обработки материалов: электронное мультимедийное учебное пособие. – М.: Изд-во МГОУ, 2007.
2. Билик Ш.М. Абразивно-жидкостная обработка металлов. – М.: ГНТИМЛ, 1960. – 198 с.
3. Некоторые исследования гидродинамики струи жидкости, истекающей из сопла под давлением до 1500 атм / Л.Ф. Верещагин, А.А. Семерчан, А.И. Фирсов и др. // ЖТФ. 1956. Т. XXVI. Вып. 11. С. 2570–2577.
4. Ультразвуковая технология активации жидкостей / А.А. Барзов, А.Л. Галиновский, В.С. Пузаков, К.Е. Сидельников. – М.: Машиностроение-1, 2006. – 93 с.
5. Степанов Ю.С. Барсуков Г.В. Современные технологические процессы механического и гидроструйного раскроя технологических тканей. Библиотека технолога. – М.: Машиностроение, 2004. – 240 с.
6. Тихомиров Р.А., Бабин В.Ф., Петухов Е.Н. Гидрорезание судостроительных материалов. – Л.: Судостроение, 1987. – 164 с.
7. Тихомиров Р.А., Гуенко В.С. Гидрорезание неметаллических материалов. – Киев: Техника, 1984. – 150 с.

Материал поступил в редакцию 26.09.2009

БАРЗОВ Александр Александрович

E-mail: galcomputer@yandex.ru
Тел. +7 (499) 263-69-90

Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сфера научных интересов – расширение технико-технологических возможностей применения гидроструйных технологий в топливно-энергетическом комплексе. Автор более 150 научных трудов и изобретений.

ГАЛИНОВСКИЙ Андрей Леонидович

E-mail: galcomputer@mail.ru
Тел. +7 (499) 263-62-12

Кандидат технических наук, доктор педагогических наук, доцент, профессор кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Заместитель заведующего кафедрой по научной работе. Сфера научных интересов – технологии гидроабразивной и гидроструйной обработки материалов, повышение эффективности их применения в машиностроительном производстве. Автор более 100 научных и научно-методических трудов.

ЕЛАГИНА Оксана Юрьевна

E-mail: elaguina@mail.ru
Тел. +7 (495) 930 92 44

Доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАЕН. Профессор кафедры износостойкости машин и оборудования РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина. Сфера научных интересов – обеспечение гарантированного ресурса и восстановления узлов трения технически сложных объектов топливно-энергетического комплекса. Автор более 90 научных работ.