

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

УДК 621.9.048.7

А. А. БАРЗОВ, А. Л. ГАЛИНОВСКИЙ, И. Е. КУЗНЕЦОВ**ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ УЛЬТРАСТРУЙНОЙ ДИАГНОСТИКИ
И КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ**

Предложен перспективный экспресс-метод контроля и диагностики эксплуатационных технологических параметров качества поверхностного слоя деталей и изделий. Рассматриваются физико-технологические принципы ультразвуковой диагностики и контроля, анализируются потенциальные возможности и области его применения. *Гидродиагностика; контроль; параметры качества; поверхностный слой*

Ультразвуковая диагностика (УСД) – совокупность методов и средств создания и реализации таких параметров высокоэнергетической компактной струи жидкости, которые при ее взаимодействии с диагностируемой средой, например, при ударно-динамическом торможении о твердотельную мишень-заготовку, способны привести к фиксируемым целенаправленным изменениям в обрабатываемом материале и/или в самой жидкости.

1. АЛГОРИТМ УСД

Алгоритм УСД включает в себя следующие этапы:

1) На поверхность объекта контроля оказывается гидроструйное воздействие, вызывающее гидроэрозию поверхности при определенных режимах: рабочее давление струи, ее диаметр, кинематика движения по диагностируемой поверхности и т. д.

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

3) По полученной разнице результатов сравнений (абсолютной и/или относительной) судят о качестве (ресурсе, физико-механических свойствах) контролируемого участка (участков) поверхности и о текущем и/или прогнозном состоянии объекта в целом.

**2. ОСОБЕННОСТИ УЛЬТРАСТРУЙНОЙ
ДИАГНОСТИКИ**

Диагностика с помощью гидроструйного нагружения и анализа вызываемой им гидроэрозии поверхности контролируемого объекта имеет следующие особенности:

1) Во время проведения исследования создаются необходимые и достаточные условия для получения информации о специфических параметрах поверхности объекта: например, о ее способности противостоять коррозионно-усталостному разрушению, так как при гидроструйной эрозии происходит ускоренное локальное разрушение материала по механизмам, наиболее близким или даже идентичным механизмам реального разрушения конструкции под действием эксплуатационных нагрузок, например, циклических, вызывающих усталостное разрушение. Это обстоятельство обеспечивает сопоставимость результатов гидроструйного диагностирования полномасштабным исследованиям физико-механических свойств и ресурсно-эксплуатационных испытаний функциональных параметров объекта анализа. Использование известных теорий прочности создает необходимые научно-методические предпосылки к достоверному прогнозированию времени разрушения конструкционного материала в реальных условиях эксплуатации путем критерияльного анализа результатов кратковременных гидроструйных диагностических испытаний. Особое место при построении соответствующих моделей и критериев разрушения наряду с механическим воздействием имеет температурный и расклинивающий фактор гидроструйной эрозии. В принципе, в число факторов воздействия нетрудно добавить специальные виды физико-механического воздейст-

вия струи на твердотельную мишень, например, путем введения в ее состав химически-агрессивных добавок, поверхностно-активных веществ и т. д.

2) Полномасштабное и технически простое управление гидроструйным воздействием на поверхность объекта контроля позволяет получить необходимую диагностическую информацию. В число варьируемых параметров данного воздействия, помимо очевидных (рабочее давление – скорость струи, угол атаки и т. д.) можно включить:

- температурный фактор за счет предварительного нагрева рабочей жидкости или контролируемой поверхности объекта;

- кинематику движения струи (скрайбирование, индентирование, форма траектории движения, наложение вибраций и т. д.);

- требуемую вариативность исходной динамики струйного воздействия, которая обеспечивается с помощью резонаторов Гельмгольца, создающих импульсный («помпажный») режим или преимущественный кавитационный режим за счет применения известных кавитирующих сопловых насадок;

- дополнительные физические воздействия, например, электромагнитные в СВЧ диапазоне с целью получения специфической информации о трещиностойкости бетонной поверхности, пропитанной рабочей жидкостью, резко вскипающей при СВЧ воздействии;

- возможность получения дополнительной полезной информации о свойствах и параметрах поверхности путем воздействия на нее нескольких струй, имеющих различные рабочие и диагностические характеристики.

3) Широкий спектр информативных диагностических признаков гидроэрозии поверхности значительно увеличивает достоверность определения контролируемых параметров. Признаки условно можно разделить на две категории:

а) прямые:

- интегральная интенсивность гидроэрозии материала диагностируемой поверхности объекта контроля: отношение суммарной массы частиц контролируемого материала, вымываемых с поверхности объекта контроля, ко времени, в течение которого произошло их удаление. Данный параметр – удельная интенсивность процесса ультраструйной гидроэрозии, размерность которого совпадает с интенсивностью других известных видов износа: $J = \Delta m / \Delta t$, где Δm – изменение массы (объема) объекта контроля ко времени Δt – времени, в

течение которого произошло данное изменение;

- дифференциальная гидроэрозия материала диагностируемой поверхности объекта контроля: зависимость между геометрическими или объемно-массовыми параметрами частиц гидроэрозии и их числом (количеством частиц данной массы объема, радиуса или другого характерного размера) от режимов и условий струйно-диагностического воздействия и свойств материала поверхности. Эта зависимость определяется путем селекции и анализа продуктов гидроэрозии по размерам или массам отделяющихся от объекта частиц материала в течение определенного времени струйно-диагностического воздействия на объект. Этот параметр – дифференциальная удельная гидроэрозия – представляет собой зависимость вида: $N_m = f(\Gamma_m)$, где N_m – число продуктов гидроэрозии данного диаметра или массы (Γ_m), которые отделились от диагностируемой поверхности за время диагностирования Δt . Наиболее близким аналогом данного параметра является амплитудное распределение сигналов акустической эмиссии при контроле дефектности материалов. Зависимость $N_m = f(\Gamma_m)$ в значительной мере определяет макро- и микрорельеф гидрокаверны (профиль, топографию), образующейся на диагностируемой поверхности в результате струйного воздействия;

б) косвенные диагностические признаки:

- информативные признаки акустической эмиссии из зоны взаимодействия гидроструи с диагностируемой поверхностью;

- изменение во времени параметров акустической эмиссии, связанное с интенсивностью протекания процессов гидроэрозии;

- электромагнитное излучение и изменение его энергетических и спектральных характеристик из зоны диагностирования;

- классические термо-силовые параметры взаимодействия струи с твердотельной преградой – диагностируемой поверхностью.

3. ФИЗИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СУЩНОСТЬ МЕТОДА

Единая физико-технологическая сущность ультраструйной диагностики параметров качества поверхностного слоя исследуемого объекта допускает весьма значительное число вариантов его практической реализации. Так, важным отличительным признаком УСД является возможность оценки внутренней механической напряженности объекта контроля. Схематично данное обстоятельство проиллюстрировано на

рис. 1, на которой изображен образец 1, нагруженный силой F , вызывающей в нем различные механические напряжения, описываемые эпюрой 2. В процессе гидроскрайбирования глубина гидрокаверны 3 будет большей там, где действуют большие растягивающие напряжения σ . Аналогичная диагностическая картина будет наблюдаться и при гидроструйном индентировании (точечном, локальном воздействии). Глубина h единичных гидрокаверн 4 в зоне больших напряжений будет большей, чем в зоне с меньшим уровнем напряженности материала.

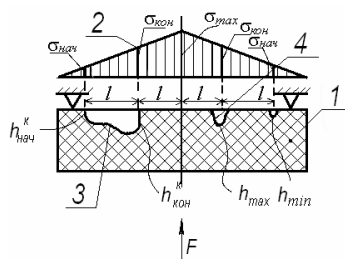


Рис. 1. Оценка внутренней механической напряженности объекта контроля

Тем самым обеспечивается возможность оценки уровня напряженности материала конструкции и/или образца как под действием внешних силовых нагрузок, так и остаточных напряжений. Причем о величине напряженности поверхностного слоя можно судить по форме гидрокаверны, как показано на рис. 2. Из схемы видно, что в поле действия растягивающих напряжений $\sigma_{\text{раст}}$ ширина гидрокаверны $l_{\text{раст}}$ больше, чем ее ширина $l_{\text{сж}}$ в направлении действия сжимающих $\sigma_{\text{сж}}$ напряжений.

По величине геометрических параметров гидрокаверны 1, а именно по $l = l_{\text{раст}} / l_{\text{сж}} > 1$ можно судить о напряженно-деформированном

состоянии (НДС) поверхностных слоев объекта диагностирования 2.

Так, используя вышеприведенное соотношение, осуществляется требуемая детальная диагностика и контроль НДС промышленной конструкции или строительного объекта.

4. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЭКСПРЕСС-МЕТОДА УСД

На основе вышесказанного можно сделать вывод, что сфера применения УСД позволяет обеспечить информационно-диагностическое обеспечение всех ключевых этапов жизненного цикла изделий и объектов различного назначения, а также обеспечивает получение оперативной и достоверной диагностической информации о параметрах состояния поверхностных и подповерхностных слоев (их поврежденности, физико-механических свойствах), геометрически соизмеримых с геометрическими параметрами гидроструйной эрозии.

Важным аспектом УСД является возможность проведения выходного 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, повышении производительности процедуры контроля, возможности ее совмещения с другими технологическими операциями, например, струйной очисткой поверхностей от загрязнений с целью последующего выполнения ремонтно-восстановительных работ, окраской и т. д.

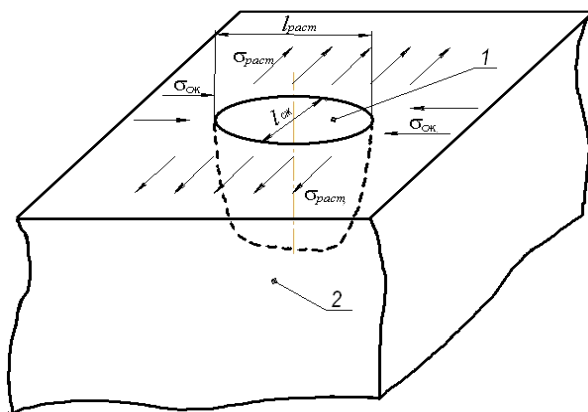


Рис. 2. Оценка внутренней механической напряженности объекта контроля

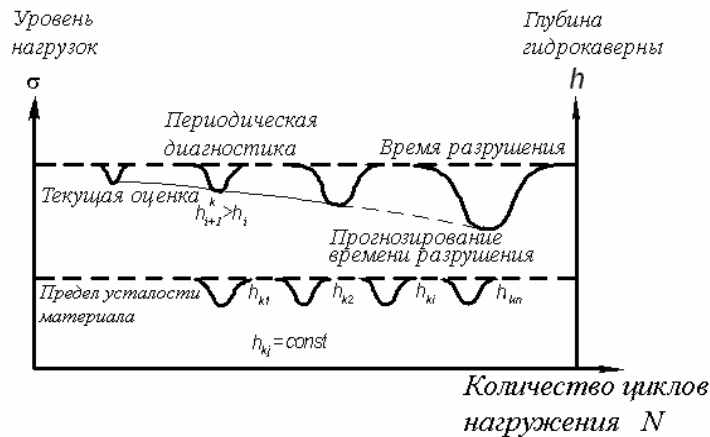


Рис. 3. Схема, иллюстрирующая возможность прогнозирования остаточного ресурса элемента конструкции

С практической точки зрения, использование УСД имеет большое значение на завершающих этапах гарантийного срока эксплуатации изделий, например, для обоснования его возможного продления, что является актуальной задачей современной промышленности.

Кроме того, УСД будет весьма полезной в качестве инструмента оперативного диагностирования объектов, подвергшихся нерасчетным режимам эксплуатации, например, при оценке состояния силовых конструкций после стихийных бедствий: пожара, наводнения, землетрясения и т. д. На рис. 3 показана схема прогнозирования остаточного ресурса при испытании гидронагружением. Весьма вероятно, что в недалеком будущем УСД войдет в число средств, обеспечивающих безопасную эксплуатацию технически сложных изделий по их фактическому ресурсу.

Для анализа химической и коррозионной стойкости диагностируемой поверхности в жидкостную струю вводятся соответствующие химические реагенты, а термическое воздействие имитируется нагревом рабочей жидкости и/или места диагностирования, например, токами высокой частоты, конвективно, СВЧ и т. д. При этом возможна оценка стойкости конструкции к термоудару, реализующемуся при воздействии относительно холодной гидроструи на нагретую поверхность. Данная процедура будет эффективна для анализа качества сварных швов и оценки их трещиностойкости. Перед диагностированием поверхность объекта может очищаться от загрязнений, следов коррозии и т. д. с помощью гидроструйной обработки. Причем полученная после очистки поверхность, ее топография, рельеф также несут информацию о состоянии, параметрах качества поверхностного слоя объекта диагностики.

В качестве иллюстрации на рис. 4 представлены области применения разрабатываемого экспресс-метода УСД, классифицированные по решаемым задачам, технологическому обеспечению и технологическому оборудованию.

УСД может результативно использоваться для ускоренного определения технологических параметров поверхностного слоя различных деталей: их твердости, степени и глубины наклепа, уровня остаточных напряжений и т. д., причем УСД может применяться параллельно с существующими методами определения этих параметров с целью повышения достоверности получаемой технологической информации.

УСД может стать эффективным методом экспресс-оценки и прогнозирования эксплуатационно-технологических параметров качества защитных покрытий.

Весьма перспективно применение УСД возможно и для натурального моделирования эксплуатационных воздействий, когда ультраструя жидкости будет фактически имитировать процессы, происходящие на поверхности детали, имеющей соответствующее покрытие. Характерным примером этого является оценка износостойкости покрытий при диагностическом воздействии на них ультраструи гидроабразивной суспензии различного состава. Другой областью применения УСД может стать оценка остаточного ресурса изделий, например, с упрочняющими покрытиями. Осуществив ультраструйное воздействие на поверхность такого изделия на специально подобранном для этих целей режиме, можно оценить текущий уровень его свойств и характеристик, исходя из которых будет сделано заключение о возможности/невозможности продления сроков эксплуатации.

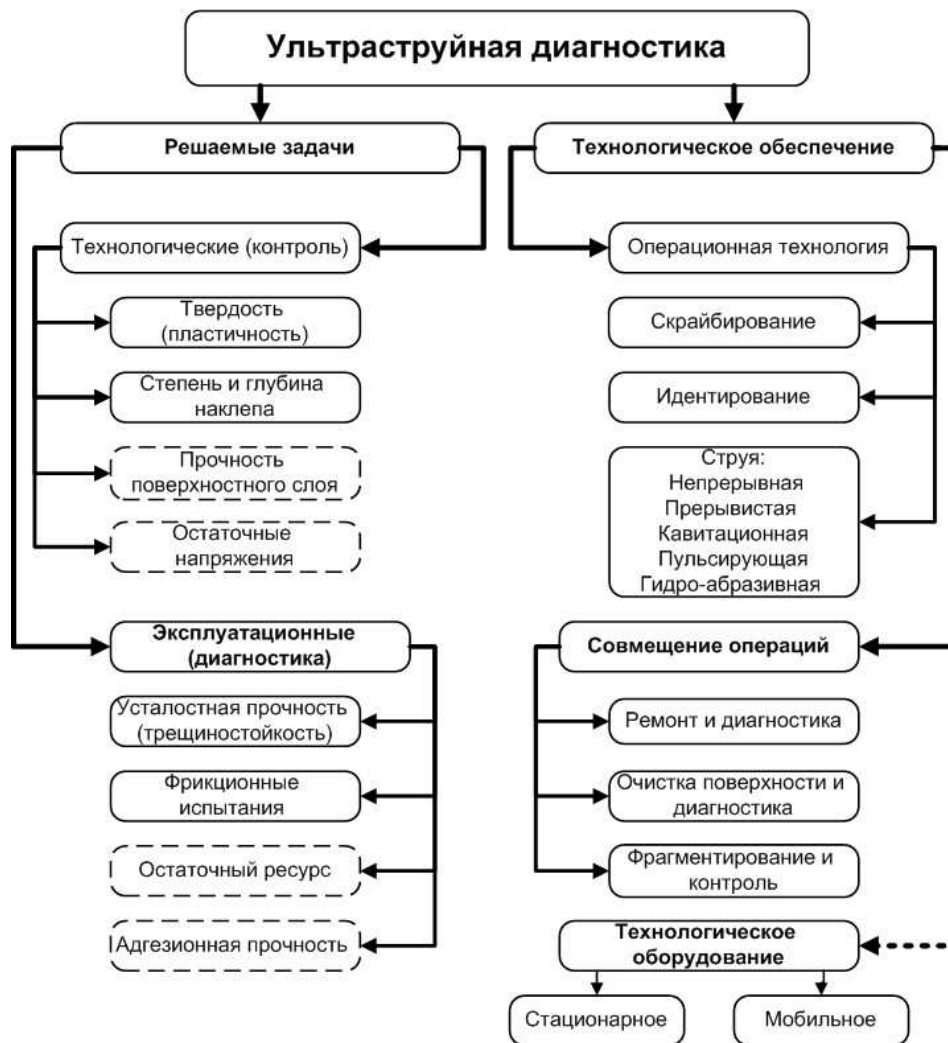


Рис. 4. Области применения экспресс-метода ультразвуковой диагностики (- экспериментально подтвержденные возможности, - - - перспективные возможности применения)

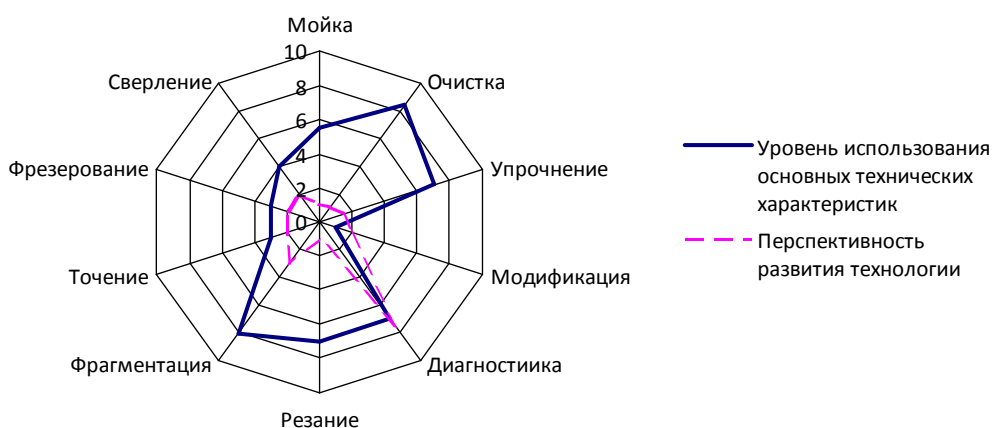


Рис. 5. Количественная оценка перспективности развития технологий и уровень взаимосвязи ультразвуковых гидротехнологий с основными техническими характеристиками

Возможным развитием УСД станет апробация данной технологии по вырезке и последующей диагностике образцов, имеющих покрытия, когда ультразвуковая технология будет применяться и как средство раскроя или фрагментации, создания экспериментальных образцов, и как средство их последующей диагностики. В данном случае можно говорить об универсальности ультразвуковой технологии, ее технологической гибкости и перспективности использования для решения самых разных задач машиностроительного и других видов производств.

ВЫВОДЫ

Проведенная экспертная оценка перспективности технологии диагностирования в сравнении с такими хорошо изученными методами как фрикционные и усталостные испытания, свидетельствует о ее потенциальных преимуществах и высокой инновационной составляющей, что является веским аргументом в пользу целесообразности начала разработки, развития и совершенствования технологии УСД.

На рис. 5 показана взаимосвязь технологических операций с применяемым оборудованием и режимами его работы, инструментом и другими технологическими характеристиками гидроструйных технологий. Из анализа представленных данных следует серьезная перспектива развития и применения ультразвуковой диагностики, как специфической технологии, сочетающей в себе информационные и формообразующие признаки.

ОБ АВТОРАХ



Барзов Александр Александрович, проф. Д-р техн. наук по технологии машиностроения (МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1991). Иссл. в обл. ультразвукин. гидротехнологий обработки и диагностики материалов.



Галиновский Андрей Леонидович, канд. техн. наук по технологиям и оборудованию мех. и физ.-техн. обработки материалов (МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001). Иссл. в обл. жидкостн. и абразивно-жидкостного резания.



Кузнецов Игорь Евгеньевич, асс. Дипл. инж. по технологии изготовления изделий из композиционных материалов (МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1998). Иссл. в обл. ультразвукин. технологий обработки и диагностики материалов.