

А. А. Барзов, А. Л. Галиновский, М. И. Абашин

## АНАЛИЗ ФИЗИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРОЦЕССА УЛЬТРАСТРУЙНОЙ ДИАГНОСТИКИ

*Приведены результаты анализа физико-технических процессов, происходящих при ударе высокоскоростной струи (ультраструи) жидкости о поверхность твердого тела с точки зрения использования параметров этих процессов в диагностических целях. Рассмотрен процесс формирования прямых (постоянных во времени) и косвенных (динамических) информативных признаков ультразвуковой диагностики с точки зрения энергетических позиций. Проанализирована трансформация энергетических и информационных параметров самого процесса гидроэрозионного разрушения.*

**E-mail:** texhelp@list.ru

**Ключевые слова:** *ультраструя, экспресс-диагностика, информативный признак, гидроэрозия, гидрокаверна, неравновесность, энергетический баланс.*

Совокупность технологических факторов, в основе которых лежит физическое явление удара струи (ультраструи) жидкости, со скоростью, превышающей 300 м/с, о твердотельную преграду на сегодняшний день нашли широкое применение в решении задач очистки поверхностей от загрязнений, раскроя и обработки широкого спектра материалов. Однако вся гамма сложных взаимосвязанных процессов, происходящих в месте удара ультразвуковой струи о твердую преграду, вызывающая интенсивную гидроэрозию последней и характеризующуюся целым рядом параметров, несет в себе содержательный и практически значимый массив информации непосредственно о самом объекте воздействия. Именно эта особенность и положена в основу ультразвуковой экспресс-диагностики параметров поверхностного слоя изделий – аппарата определения свойств объекта по информативным признакам гидроэрозионного разрушения.

Физико-технологические и информационные особенности ультразвуковой диагностики (УСД). Технологически процедура последней состоит из следующих основных этапов [1].

1. На исследуемый объект оказывают кратковременное контрольно-диагностическое воздействие ультразвуковой жидкости, вызывающее гидроэрозию его поверхностного слоя. Воздействие осуществляется при определенных режимах: заданном рабочем давлении жидкости, ее диаметре, требуемом угле падения, рациональной кинематике

движения по диагностируемой поверхности (индентирование или скрайбирование) и т. д.

2. Определяют параметры ультраструйной эрозии, такие как характеристики гидрокаверны (макро- и микро топография ее поверхности и близлежащей области, а также эрозионный унос массы у не крупногабаритных деталей или образцов); масс-геометрические параметры частиц, эродированных с поверхности объекта диагностирования (их количество, законы распределения и др.).

3. Полученные результаты сравнивают с эталонными характеристиками и/или между собой на различных участках диагностируемой поверхности объекта исследования. Таким образом, можно судить о параметрах качества контролируемого участка (участков) поверхности, например об остаточном ресурсе конструкционного материала и/или о его эксплуатационно-технологической поврежденности, а также о состоянии объекта в целом. При этом весьма результативно использование соответствующего программно-математического обеспечения, фотомикроскопических исследований, резко повышающих эффективность обработки визуально наблюдаемой картины гидроэрозии и ее продуктов, включая компьютерную оцифровку цветных изображений эродированных микрочастиц.

Все особенности УСД как технического средства получения необходимой информации об изучаемом объекте условно разделим на две основные группы, связанные с физико-технологической и с информационно-диагностической спецификой данного способа исследования свойств поверхностного слоя твердых тел.

Физико-технологическая специфика УСД сводится к перечисленным ниже основным положениям.

1. Энергетически экстремальная неравновесность ударно-динамических процессов в зоне взаимодействия ультраструи жидкости с поверхностью твердого тела (мишени) обуславливает доминирующий характер усталостно-волнового механизма ее ультраструйной гидроэрозии. При этом нужно учитывать, что при плотности мощности ультраструи  $\sim 1$  МВт/мм<sup>2</sup> возникает сверхинтенсивное акустическое излучение (до 10 МГц) и сопутствующие явления электромагнитной природы [2], сопровождающиеся также фонон-фононными и фонон-электронными взаимодействиями на границе фаз: твердое тело – жидкость – газ (прямой и обратный акустоэлектрические эффекты, механоэмиссия и др.).

2. УСД существенным образом способны изменить исходные физико-механические параметры поверхностного слоя материала мишени.

3. В соответствии с вышеизложенным, при осуществлении процедуры УСД для большинства объектов контроля соблюдается принцип подобия между диагностическими и эксплуатационными воздействиями, так как подавляющее число конструкций ответственного назначения работают в условиях циклических нагрузок различной термо-силовой интенсивности. Это подчеркивает физико-технологическую значимость УСД как перспективного средства получения оперативной и достоверной информации о параметрах состояния объекта диагностирования, ее межотраслевую результативность применения и возможность эффективного использования на основных этапах жизненного цикла изделий.

4. УСД органически сочетается с выполнением других операционных ультразвуковых технологий (УСТ), в частности с гидроочисткой поверхности изделий от трудноудаляемых загрязнений. Данное обстоятельство положительно влияет на инновационно-технологический потенциал УСД, расширяет функциональные возможности УСТ в целом.

Приведем основные информационно-диагностические особенности УСД.

1. УСД оперирует весьма значительным и представительным массивом физически взаимосвязанных информативных признаков и критериев, что в вероятностном смысле положительно влияет на результативность и достоверность ультразвукового экспресс-контроля параметров качества поверхностного слоя деталей или изделий и, как следствие, на эффективность диагностики в целом.

2. Информативные параметры УСД можно разделить на прямые (постоянные во времени) и косвенные (динамические).

К прямым или квазистатическим признакам относят: массо-геометрические характеристики эродированных частиц твердотельной мишени; микро- макрогеометрия гидрокаверны и прилегающей к ней зоны пластического оттеснения материала, параметры его физико-механического состояния и др. Все эти признаки условно можно назвать контрольно-диагностической остаточной информацией, так как они являются материализованным результатом ультразвукового гидроэрозионного воздействия на твердое тело и относительно стабильны во времени после возникновения.

Косвенные или динамические информативные признаки обусловлены неравновесной спецификой энергетически экстремального взаимодействия ультразвуку жидкости (воды) с твердотельной мишенью. К ним относят, помимо традиционных термо-силовых параметров данного взаимодействия, совокупность волн упругой деформации –

сверхинтенсивное широкополосное акустическое возмущение зоны диагностирования: акустическое излучение (АИ) или акустическая эмиссия (АЭ) – аппаратурно-регистрируемая часть АИ, широкополосное, вплоть до рентгеновского [3], электромагнитное излучение (ЭМИ) и экзоэмиссия энергоемких электронов (ЭЭЭ). Данные динамические информационные параметры УСД существенно расширяют ее контрольно-диагностические и исследовательские возможности. Кроме того, они могут весьма эффективно использоваться при построении соответствующих диагностических методик оперативного, в режиме реального времени, контроля за ходом выполнения других операционных процессов УСТ. Например, при гидроабразивном резании различных материалов параметры АЭ эффективны при оценке состояния элементов технологического оборудования (текущий контроль износа струеформирующих элементов – гидросопла и абразивно-жидкостного насадка).

**Взаимосвязь энерго-физических и информационно-диагностических параметров.** Для формализации количественных соотношений между совокупностью физико-информационных параметров, характеризующих эффективность УСД, воспользуемся результатами анализа энергетических превращений в зоне ударно-динамического взаимодействия между ультразвуковой жидкостью и поверхностью объекта исследования или контроля [4]. Отличительной чертой уравнений энергетического баланса в этой зоне является пропорциональная зависимость между отдельными энергетическими слагаемыми. Это следствие справедливости на каждом из этапов энергетических превращений, протекающих параллельно-последовательно, неравенств вида

$$E_i \gg E_j; i = 1, 2, \dots n; j = 1, 2, \dots m; i \neq j, \quad (1)$$

где  $E_i$  – значительные величины энергий в поэтапных уравнениях энергетического баланса, например исходная кинетическая энергия ультразвуковой струи или суммарная величина поверхностной энергии микрокапель распыленной ударом о преграду струи жидкости (спрея), а также конечное значение тепловой энергии жидкости после ее ударного торможения о мишень;  $E_j$  – малые в энергетическом отношении, но весьма информационно значимые слагаемые энергетического баланса. В частности, под  $E_j$  понимают практически все информационно-насыщенные слагаемые энергетического баланса, например суммарную поверхностную энергию вновь образованных в процессе гидроэрозии поверхностей:

$$E_{\text{пов}} = \sigma \left( \sum_{i=1}^N s_i + S_k \right), \quad (2)$$

где  $s_i$  – поверхность  $i$ -й частицы эродированного материала мишени (объекта исследования);  $S_k$  – суммарная площадь гидрокаверны в месте удара ультразвуку;  $\sigma$  – поверхностная энергия эродированной твердой фазы. Причем, в общем случае,  $\sigma = f(s_i)$ ;  $N$  – общее число эродированных ультразвуку частиц материала мишени.

Основываясь на энергетических неравенствах типа (1), нетрудно показать, что в первом приближении имеет место совокупность соотношений вида

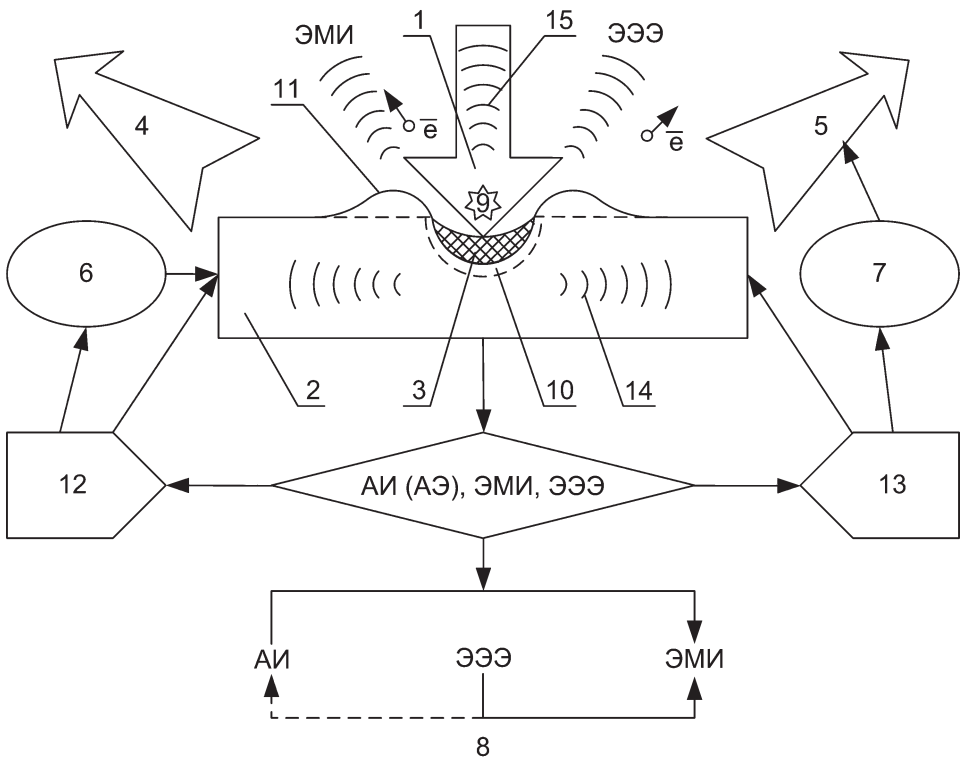
$$E_i = k_{ij} E_j; k_{ij} \sim \text{const}; i = 1, 2, \dots n; j = 1, 2, \dots m. \quad (3)$$

Здесь  $E_i$  и  $E_j$  – слагаемые энергетического баланса, в первую очередь информационно-диагностического содержания;  $k_{ij}$  – коэффициенты связи, характеризующие кинетику трансформации одного вида энергии в другой. Учитывая (1), нетрудно заметить, что  $k_{ij} \ll 1$ .

Применительно к задачам ультразвуку диагностирования под соотношениями (3) будем понимать информационно-энергетическую реакцию объекта исследования или контроля на конкретное физико-технологическое ультразвуку воздействие. Причем в физико-энергетическом соотношении механизмы трансформации исходной кинетической энергии ультразвуку жидкости – инструмента диагностирования – в другие виды энергии связаны, в первую очередь, с процессами ультразвуку эродирования поверхностного слоя твердого тела.

Заметим, что математически формальные соотношения типа (3) описывают параллельно-последовательный характер физико-энергетических превращений при реализации процедуры ультразвуку диагностирования, т. е. информационно-диагностические признаки, способные к энергетической трансформации, могут существовать одновременно и условно независимо друг от друга. Приведем характерные примеры, иллюстрирующие вышеизложенное.

**Трансформация энерго-информационных параметров УСД.** Мощное АИ или АЭ при ультразвуку диагностировании имеет две составляющие: активную ( $A$ ) и информативную ( $I$ ), согласно соотношению (1). Первая способна существенным образом влиять на изменение поврежденности объекта исследования или контроля путем реализации механизма малоциклового роста исходных дефектов (микротрещин), инициировать их образование и др. (рис. 1). При этом возникает информативная составляющая АЭ, обусловленная кинетикой увеличения поврежденности. Кроме того, исходная информа-



**Рис. 1. Схема формирования взаимообусловленной системы прямых и обратных энерго-физических связей в зоне ультразвукового диагностирования:**

1 – ультразвукая жидкости (воды); 2 – твердотельная мишень; 3 – промежуточный, «граничный» слой вещества твердого тела на условной границе раздела фаз; 4 – совокупность информационных признаков эродированных частиц материала мишени; 5 – информативные параметры жидкости в спреобразном состоянии; 6 – механо-физические изменения свойств твердого тела в условиях ударно-волнового возмущения; 7 – физико-химический механизм изменения свойств жидкости (воды) при ударно-динамическом воздействии; 8 – схема взаимосвязи эмиссионно-волновых признаков ультразвуковой гидроэрозии; 9 – зона ультразвуковой кавитации; 10 – зона гидроэрозионного предразрушения; 11 – валик пластического отеснения материала мишени из зоны ультразвуковой гидроэрозии; 12 – свойства материала мишени; 13 – то же ультразвуку; 14 – ударно-волновое возмущение зоны контакта ультразвуку и мишени; 15 – то же ультразвуку

тивная составляющая AI или AЭ – их аппаратно-регистрируемая часть – позволяет оперативно судить о динамическом, ударно-волновом характере взаимодействия ультразвуку жидкости с поверхностным слоем исследуемого твердого тела. Причем, согласно (3), имеют место методически важные и практически значимые соотношения между  $A$  и  $I$  частями слагаемых общей энергии AЭ, которые условно можно представить в виде

$$AI_{\text{общ}} = k_A AI_A + k_I AI_I \rightarrow \Delta\omega_A + \bar{k}_I \overline{AЭ}_P \quad (4)$$

где  $AI_{\text{общ}}$  – общая величина энергии волн упругих деформаций:  $AI$  или  $AЭ$ ;  $k_A$  и  $\bar{k}_I$  – коэффициенты пропорциональности, причем  $k_A \sim 1$ ;  $k_p, \bar{k}_I \ll 1$ ;  $\Delta\omega_A$  – контрольно-диагностическое изменение поврежденности поверхности твердого тела (мишени) в месте образования каверны, связанное с возникновением новых поверхностей (субмикроскопических трещин, скоплений дислокаций и др.).

Очевидно, что  $\bar{k}_I \ll k_p$ , согласно физической сущности рассматриваемой задачи. Поэтому регистрация  $\overline{AЭ}_I$  на фоне  $AI_I$  практически нереализуема. Однако путем анализа  $AI_I$  возможна вполне достоверная и оперативная оценка  $\Delta\omega_A$ , что крайне важно в данном методе диагностирования и контроля качества параметров состояния поверхностного слоя детали или изделия.

Помимо рассмотренного варианта трансформации (4), возможны и другие физико-энергетические схемы. Например, вполне реально существование механизма трансформации  $AI$  в  $ЭМИ$  (прямой акустоэлектрический эффект),  $AЭ$ ,  $\Delta\omega$  в  $ЭЭЭ$  (механоэмиссия быстрых электронов) и др. Однако общей чертой этих процессов и явлений будет энергетическая пропорциональность между латентными и регистрируемыми контрольно-диагностическими признаками, ответственными за текущее и прогнозное состояние поверхностного слоя конкретного объекта исследования.

**Одновременное существование информативных параметров.** Характерным примером данного обстоятельства является параллельное протекание процессов образования эродированных частиц под воздействием ультразвука на твердотельную мишень и возникающая при этом совокупность эмиссионно-волновых процессов:  $AЭ$ ,  $ЭМИ$  и  $ЭЭЭ$ . Причем суммарная вероятность успешного решения поставленной контрольно-диагностической задачи  $P$  будет определяться соотношением

$$P = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_i), \quad (5)$$

где  $p_i$  – вероятность решения поставленной диагностической задачи с помощью  $i$ -го информативного признака;  $n$  – общее число регистрируемых информативных признаков.

Заметим, что для УСД число  $n$  достаточно велико и включает в себя как прямые, так и косвенные признаки, также связанные с параметрами состояния объекта.

**Условно независимые информативные признаки.** К условно независимым информативным признакам можно отнести изменение свойств используемой в качестве средства диагностического воздействия гидросреды, происходящее в результате удара ультразвука



жидкости о мишень, и параметров микрочастиц, эродированных с ее поверхности. Условность данного обстоятельства состоит в следующих положениях: микрочастицы (их количество и размеры) материала мишени в ряде случаев способны повлиять на свойства используемой для диагностирования гидросреды; изменение ее свойств может быть обусловлено в основном ударно-волновым механизмом активации жидкостей, например воды [2–5] при минимальной ультразвуковой эрозии материала мишени, изготовленной в частности из монокристалла алмаза. В этом случае информативность изменений свойств жидкости, несмотря на свою самостоятельную физико-технологическую значимость, будет практически не реализуема.

Таким образом, пропорциональная энергетически обусловленная взаимосвязанность между комплексом информативно-диагностических признаков УСД, их количество и совокупный характер проявления определяют технологическую значимость и техническую реализуемость аппарата данного инновационного метода исследования и контроля параметров состояния твердых тел и жидкостей.

**Информационно-технологическое содержание процесса ультразвуковой гидроэрозии.** Конкретизируем физически обусловленную энергетическую взаимосвязанность параметров ультразвукового взаимодействия на примере анализа информационно-технологического содержания процесса гидроэрозии поверхностного слоя твердой мишени – детали или изделия. Не нарушая общности рассуждений, в число ультразвуковых гидротвердофазных взаимодействий включим кавитирующие ультразвуки и резонансно-модулированные, получаемые, в частности, с помощью резонаторов Гельмгольца.

Допустим, что некоторый информативно-диагностический признак ультразвуковой гидроэрозии (УСГ), например характерный размер или исследуемый параметр распределения эродированных частиц материала мишени  $z_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ), является функцией физико-технологических характеристик этого материала:

$$z_i = f(r_j, x_k), \quad (6)$$

где  $r_j$  – совокупность внешних технологических параметров ( $j = 1, 2, \dots, l$ ) определяющих интенсивность УСГ – рабочее давление (скорость) гидроструи, ее диаметр, угол падения струи к поверхности мишени и др.;  $x_k$  – совокупность физико-механических параметров состояния поверхностного слоя объекта контроля или диагностики, определяющих его эксплуатационно-технологические свойства – микротвердость, прочность, контактную жесткость, уровень остаточных напряжений и др.



В первом приближении, с учетом того, что технологические условия диагностирования стабильны:  $r_j \sim \text{const}$  из (6) получим

$$\Delta z_i = \sum_{k=1}^m \xi_k^i \Delta x_k, \quad \xi_k^i = \partial f / \partial x_k, \quad (7)$$

где  $\Delta z_i$  – относительно малое изменение некоторого  $i$ -го информативного параметра УСГ, например уровня электродинамического потенциала твердотельной мишени при соответствующем изменении совокупности контрольно-диагностических параметров  $\Delta x_k$ ;  $\xi_k^i$  – коэффициенты влияния  $\Delta x_k$  на  $i$ -й информативно-диагностический признак ультразвукового взаимодействия. В число этих признаков входят как прямые (размеры, форма эродированных частиц и гидрокаверны и другие масс-геометрические параметры УСГ), так и косвенные, непосредственно связанные со спецификой физико-энергетических взаимодействий ультразвука жидкости с твердотельной мишенью: характеристики АИ (АЭ), ЭМИ и др. Причем косвенные признаки, проявляющиеся только в процессе УСГ можно подразделить:

– на энергетически интегральные (квазистатические), такие как: тепловой эффект УСД  $\Delta\Theta$  – разница конечной  $\Theta_{\text{кон}}$  и начальной  $\Theta_{\text{нач}}$  теплоты ( $\Delta\Theta = \Theta_{\text{кон}} - \Theta_{\text{нач}}$ ) используемой гидросреды, уровень силового воздействия ультразвука на мишень:  $P = P_c + \Delta P_v$ ,  $P_c = \text{const}$ ;  $\Delta P_v \rightarrow \text{var}$  и др. Здесь  $P_c$ ,  $P_v$  – постоянная составляющая давления (гидростатическое давление) и переменная соответственно;

– дифференциально-динамические (волновые) типа АИ (АЭ) или ЭМИ, в том числе обусловленные ЭЭЭ.

Учитывая, что  $i = 1, 2, \dots, n$ , где  $n$  – общее число информативно-диагностических параметров или признаков УСГ представим (7) в матричном виде:

$$\Delta Z = S \Delta X, \quad (8)$$

где  $\Delta Z$  – вектор-столбец информативно-диагностического «отклика» процессов УСГ на конкретное ультразвуковое воздействие, зависящее от изменений совокупности параметров состояния объекта контроля и/или исследования, определяемого вектором-столбцом  $\Delta X$ . Под « $\Delta$ » понимается относительно малое отклонение анализируемого параметра от некоторого, заданного номинального значения, что вполне соответствует физической сути рассматриваемой информационно-технологической задачи. Элементы матрицы  $S$  представляют собой совокупность соответствующих коэффициентов влияния  $\xi_{ik}^i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ;  $k = 1, 2, \dots, m$ ). Они определяются в большинстве случаев в результате предварительных экспериментов, причем нужно

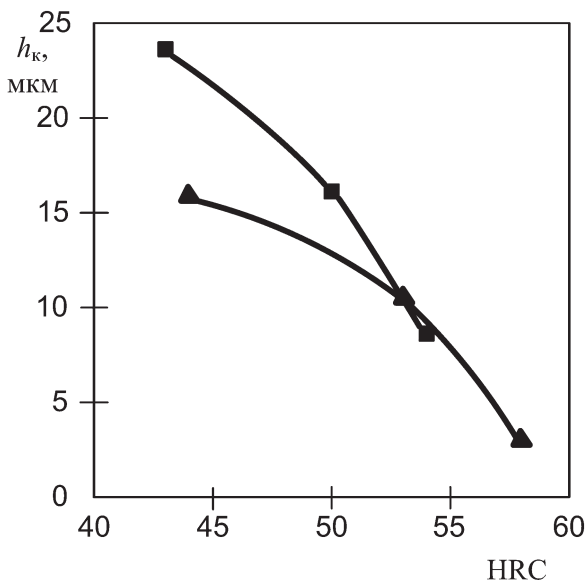
учитывать, что в общем случае  $n \neq m$ . Поэтому решение (8), связанное с определением численных значений  $\Delta X$ , требует нетривиального подхода. Так, необходимо учитывать следующее весьма важное обстоятельство. Согласно физико-технологической сущности решаемой задачи, имеют место соотношения, описывающие взаимосвязь между элементами вектора-столбца  $\Delta X$ :

$$\Delta x_j = f(\Delta x_i); i \neq j; j = 1, 2, \dots m. \quad (9)$$

Фактически соотношение вида (9) раскрывает зависимости, которые реально имеют место между различными физико-механическими, технологическими и другими функциональными параметрами, в том числе эксплуатационными. Например, известна тесная взаимосвязь между прочностью и твердостью (микроструктурой) конструкционных материалов; уровнем остаточных напряжений растяжения в поверхностном слое деталей и их усталостно-прочностными характеристиками и др. В связи с этим, только совместное решение систем уравнений (8) и (9) позволит получить однозначную зависимость между физико-технологическими и информационно-диагностическими параметрами при построении и реализации аппарата УСД. Причем вполне очевидно, что число рассматриваемых соотношений типа (7) или в матричном виде (8) из-за значительного числа информативных признаков УСГ и группы известных технологических зависимостей (9) будет явно избыточным по отношению к  $\Delta X$ . Поэтому необходимое решение такой системы уравнений можно искать в частности методом наименьших квадратов.

Задача состоит в том, чтобы из всей совокупности соотношений типа (7) или (8) выбрать для реализации на практике такие, у которых параметры  $\xi_k$  – коэффициенты влияния или взаимосвязи, будут иметь максимально возможные числовые значения. В частности, вполне очевидно, что величина валика пластического оттеснения материала ( $\xi_b$ ) из зоны удара ультразвуку жидкости (воды) будет более информативна, с точки зрения оценки его пластических свойств, чем, например, тепловой эффект ( $\xi_0$ ) ультразвуку взаимодействия, т. е.  $\xi_b \gg \xi_0$ . Или размеры образующейся поверхностной гидрокаверны ( $\xi_k$ ) (рис. 2) при ультразвуку диагностировании значительно информативнее силового воздействия ультразвуку ( $\xi_c$ ) на мишень при оценке прочности или твердости материала, из которого она изготовлена, т. е.  $\xi_k \gg \xi_c$ .

В заключение отметим, что определить априори количественное соотношение между отдельными элементами всей совокупности коэффициентов влияния и, тем самым, эффективно понизить ранг



**Рис. 2.** Зависимость глубины гидрокаверны  $h_k$  от твердости образцов стали КВК37

матричных информативно-диагностических уравнений типа (8) без специального экспериментально-теоретического анализа весьма проблематично. Однако по мере развития аппарата УСД и разработки соответствующих инженерных методик комплексная научно-практическая задача должна быть решена путем табулирования характерных коэффициентов влияния для типовых случаев контроля и диагностики состояния различных конструкционных материалов, т. е. в процессе формирования необходимых функционально-технологических баз данных. В этом состоит основное информационно-техническое содержание процедуры ультразвукового диагностирования параметров качества поверхностного слоя деталей или изделий посредством анализа продуктов и результатов их гидроэрозионного разрушения с единых физико-энергетических позиций.

*Исследования выполнены за счет средств гранта Президента РФ для поддержки молодых российских ученых (МД-5069.2012.8) и гранта РФФИ № 12-08-00802-а.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А б а ш и н М. И. Физико-технический анализ информационно-диагностического потенциала ультразвуковых гидротехнологий / М. И. Абашин, А. А. Барзов, А. Л. Галиновский, А. А. Ковалев, К. В. Кучкин, Н. Н. Сысоев. Препринт. – М., 2010. – 33 с. – №10/2010.
2. К о р н и л о в а А. А. Ударно-кавитационный механизм генерации рентгеновского излучения при кавитации быстрой струи воды / А. А. Корнилова,

В. И. Высоцкий, Н. Н. Сысоев, Н. К. Литвин, В. И. Томак, А. А. Барзов // Вестник МГУ. – 2010. – С. 14–25.

3. Барзов А. А. Струйная интенсификация функциональной активности жидкостей / А. А. Барзов, А. Ф. Королев, В. С. Пузаков, К. Е. Сидельников, Н. Н. Сысоев. Препринт. – М., 2004. – 13 с. – № 7/2004.
4. Барзов А. А. Физико-технологические возможности ультразвуковой обработки материалов и жидкостей / А. А. Барзов, В. С. Пузаков, С. К. Сальников, Н. Н. Сысоев. – Препринт. – М., 2004. – 25 с. – № 6/2004.
5. Балашов О. Е. Физико-технологический анализ функциональных возможностей ультразвукового микросуспензирования жидкостей / О. Е. Балашов, А. А. Барзов, А. Л. Галиновский, Н. Н. Сысоев. – Препринт. – М., 2010. – 28 с. – № 4/2010.

Статья поступила в редакцию 30.05.2012