

УДК 621.9.048.7

А. А. Барзов, А. Л. Галиновский,
В. С. Пузаков

ИНВЕРСИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОНЯТИЙ “ИНСТРУМЕНТ”–“ЗАГОТОВКА” ПРИ УЛЬТРАСТРУЙНОЙ ОБРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ И ЖИДКОСТЕЙ

Рассмотрены вопросы инверсии технологических понятий “режущий инструмент”–“обрабатываемый материал”. Показано, что сверхскоростную струю жидкости можно рассматривать не только как режущий инструмент при гидрорезании материалов, но и как специфический обрабатываемый материал — гидротехнологическую среду, подвергаемую ультразвуковой активации. Изучены особенности энергетических превращений и выделена роль ударно-волновой энергии в виде акустического излучения, как доминирующего фактора активации гидротехнологической среды. Выделено пять основных областей энергетических превращений в зоне обработки гидротехнологической среды и предложена обобщенная структурная схема их взаимодействия.

Ключевые слова: ультразвуковая обработка, материал, жидкость, удар, мишень, критерий, акустическая эмиссия.

Одним из эффективных способов обработки деталей из современных конструкционных материалов является интенсивно развивающаяся технология гидрорезания сверхзвуковой абразивно-жидкостной струей. Однако, как показали предварительные исследования, физико-энергетическая основа данной технологии предопределяет существенно более широкую сферу ее практических приложений в ведущих отраслях промышленности и коммерческой деятельности.

Принципиально иную перспективу имеет ультразвуковая технология (УСТ), как практически не изученный метод целенаправленного изменения потребительских свойств самой жидкости, подвергнутой комбинированному высокоэнергетическому воздействию в процессе ультразвуковой обработки.

Ультразвуковая технология — это совокупность методов и средств создания и реализации таких параметров высокоэнергетической компактной струи жидкости, которые при ее взаимодействии с окружающей средой, например при ударно-динамическом торможении о твердотельную мишень, способны привести к фиксируемым целенаправленным изменениям в обрабатываемом материале и/или в самой жидкости.

Действительно, используя инверсию технологических понятий “режущий инструмент” – “обрабатываемый материал”, получим, что сверхскоростную струю жидкости можно рассматривать не только как режущий инструмент при гидрорезании материалов, но и как специфический обрабатываемый материал – гидротехнологическую среду, подвергаемую ультразвуковой активации [1, 2].

В целом УСТ можно отнести к характерному примеру инновационной технологии современного машиностроительного производства. В последние годы помимо традиционных областей ее применения, таких как ультразвуковая резка материалов, очистка и упрочнение поверхностей изделий, появился ряд абсолютно новых, специфических направлений ее научно-практического развития. Речь идет, во-первых, об ультразвуковой обработке (УСО) жидкостей, в результате которой жидкость приобретает новые потребительские свойства и, во-вторых, об ультразвуковой диагностике материалов, в частности, для получения оперативной информации о физико-механическом состоянии и эксплуатационно-технологических константах поверхностного слоя деталей.

Физико-техническую основу УСО составляет сжатие обрабатываемой жидкости до сверхвысоких давлений (150... 500 МПа), продавливание ее через специально спроектированное сопло малого диаметра (0,1... 0,2 мм), удар и дальнейшее торможение сформированной сверхзвуковой (~800 м/с) компактной струи жидкости о преграду (мишень) из износостойкого материала – своеобразный инструмент. Это приводит к изменению свойств гидротехнологических сред (ГТС), т.е. активации. В качестве обрабатываемой ГТС могут быть использованы СОЖ, водопроводная или техническая вода, различные растворы, суспензии и т.д. При этом технологическое обеспечение УСО во многом аналогично технической базе гидрорезания листовых материалов.

Если факторы воздействия на твердотельную мишень (заготовку) высокоскоростной или абразивно-жидкостной струи достаточно изучены, то исследования свойств самой жидкости при действии факторов УСО носят весьма фрагментарный характер. Это объясняется новизной постановки задачи по изучению свойств жидкостей после комплексного энергетически экстремального воздействия на них. Тем не менее, результаты проведенных исследований и их анализ показывают, что при УСО, а именно за весь период нахождения жидкофазной среды в зоне технологического воздействия, на нее оказывают влияние следующие физико-энергетические факторы, способные привести к изменению исходных свойств – активации [3].

1. Квазистатическое всестороннее сжатие в диапазоне рабочих давлений от 100 до 500 МПа, а в перспективе до 700... 10000 МПа, способное инициировать сложную цепочку межмолекулярных и молекулярных взаимодействий, включая макроизменения свойств самой

жидкости. Отличительная черта этого энергетически квазистационарного этапа УСО состоит в том, что при указанных давлениях жидкость вполне ощутимо проявляет аномальное для нее свойство сжимаемости, что необходимо учитывать при расчете скорости и температуры ультраструи, формируемой в специально спроектированном сопле.

2. Истечение обрабатываемой ГТС через профилированное сопло малого диаметра. В результате этого происходит резкое нестационарное ускорение жидкости, ее взаимодействие со стенками сопла. Данный процесс характеризуется весьма активными сдвиговыми деформациями в жидкости, генерированием относительно мощных колебаний в широком спектре частот, разогревом жидкости вследствие процессов внешнего и внутреннего трения.

3. Свободное, нестесненное движение жидкости на выходе из сопла. Этот этап технологического воздействия на ГТС характеризуется незначительным понижением температуры струи из-за расширения сжатой жидкости, наличием тормозных перегрузок — небольших из-за трения о воздух (газ) и больших при истечении струи в жидкость; незначительным газонасыщением (газовыделением) ГТС из-за малого промежутка времени свободного движения струи (~ 1 мс) и частичным фракционированием (каплеобразованием).

4. Удар и торможение высокоскоростной струи о мишень. При этом происходят сверхинтенсивные механофизические ударные явления динамического типа. В частности, возникают сверхмощные волновые процессы и вторичные эффекты каплеобразования. Кроме того, имеет место переход первичной кинетической энергии струи в другие виды энергии, в первую очередь, тепловую, химическую и поверхностную, что также приводит к увеличению эффекта активации жидкости.

5. Свободное движение распыленной струи жидкости характеризуется изменением температуры из-за процессов остывания капель, трения капель о воздух (газ), частичным испарением жидкости и, главное, ее интенсивным газонасыщением в спреобразном виде.

Необходимо также отметить, что, помимо приведенных факторов, на активацию ГТС оказывает влияние характер перепада давлений в сопле, степень распыления жидкости, темп (динамика) цикла разгон-торможение, степень газонасыщения жидкости, наличие в ней микрочастиц сопла и особенно преграды, а также другие факторы, взаимодействие которых схематично показано на рис. 1.

Для прогнозирования результативности изучаемой операционной технологии, в частности для активации ГТС путем УСО, был предложен комплексный физико-технологический критерий оценки ее подобия одному из известных методов обработки.

В общем случае критерием, описывающим условия протекания большинства формообразующих операционных технологий механической и физико-технической обработки материалов, является соотношение следующего вида:

$$K_M = \frac{\dot{U}_{o.m} \rho_{o.m}}{\dot{U}_{и.м} \rho_{и.м}}, \quad (1)$$

где K_M — масс-энергетический критерий или параметр, характеризующий отношение масс и в скрытом (латентном) виде энергий основных элементов (инструмент–деталь) технологической системы, участвующих в процессе структуро- и формообразования при выполнении ряда технологических операций, например точения, фрезерования и др.; $\dot{U}_{o.m}$ и $\dot{U}_{и.м}$ — удельные ($dU/d\tau$) объемы обрабатываемого и инструментального материалов, расходуемые и/или образующиеся при обработке, m^3/c ; $\rho_{o.m}$ и $\rho_{и.м}$ — плотности обрабатываемого и инструментального материалов, kg/m^3 . Важно отметить, что энергетическая латентная составляющая в соотношении (1) присутствует в виде удельного импульса струи ($v_c \rho_{ж}$), что будет показано далее.



Рис. 1. Физические факторы, влияющие на ультразвуковую активацию ГТС (жидкостей)

Применительно к УСО материалов K_M имеет вид

$$K_{УСО}^M = \frac{s_{п} h \rho_M}{v_c R_c \rho_ж}, \quad (2)$$

где v_c и $s_{п}$ — скорость струи и скорость подачи заготовки, м/с; h , R_c — толщина заготовки и радиус струи, мм; ρ_M и $\rho_ж$ — плотность обрабатываемого материала и рабочей жидкости без учета абразива, кг/м³.

Для механической обработки (МО) материалов, например при свободном резании, K_M определяется по формуле

$$K_{МО}^M = \frac{v_p t \rho_M}{\dot{v}_и \rho_и}, \quad (3)$$

где v_p — скорость резания, м/с; t — глубина резания, м; $\dot{v}_и$ — удельный объем износа инструмента, отнесенный к ширине режущего лезвия, мм²/с; ρ_M и $\rho_и$ — плотность обрабатываемого материала и инструмента, кг/м³.

Соотношения (2) и (3) могут быть легко получены и для других известных способов обработки, например электроэрозионной (ЭЭО), ультразвуковой (УЗО) и др. Их анализ с логарифмической точностью позволяет утверждать, что операции МО характеризуются максимальным значением K_M , а УСО материалов (резание) — минимальным (рис. 2). С этой точки зрения УСО материалов резанием — весьма несовершенный способ формообразования деталей по сравнению с другими методами обработки.

Таким образом, своеобразный масс-энергетический КПД ультразвукового резания весьма низок. Однако критериальное соотношение (1) позволяет методически полно охарактеризовать тот или иной вид УСО материалов и жидкостей. Если $K_{УСО} \ll 0$, то это указывает на классический вариант гидрорезания и/или струйной очистки,

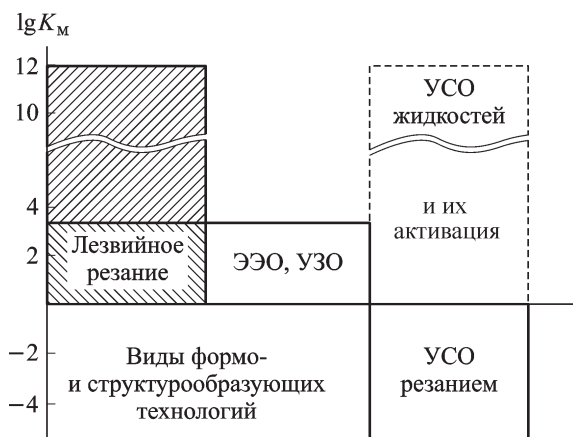


Рис. 2. Ориентировочные значения масс-энергетического критерия K_M для различных формообразующих технологий

если $K_{УСО} \gg 1$, т.е. материал мишени практически не разрушается, — на предельный случай УСО жидкостей при их ультразвуковой активации. Это схематично показано на рис. 3.

Промежуточное значение $K_{УСО}$ соответствует достаточно интенсивному процессу разрушения материала мишени, т.е. образованию суспензии. Эта суспензия состоит из жидкофазной матрицы (обработанной УСО ГТС) и мелкодисперсных частиц твердой фазы — продуктов гидроэрозии мишени. Данное обстоятельство иллюстрирует еще одно перспективное применение УСО в качестве специфической технологии получения микро- и наносуспензий из различных материалов.

Подчеркнем еще раз методологическое отличие УСО жидкостей от традиционной УСО материалов резанием, согласно предлагаемому критериальному подходу. В соотношении (1) в числителе должен находиться параметр, масс-энергетически характеризующий количество обработанной жидкости, а в знаменателе — значение удельной гидроэрозии материала мишени (инструмента). Тогда, в результате инверсии технологических понятий “обрабатываемый материал”–“инструмент” (рис. 3) для УСО жидкостей K_M будет иметь вид

$$K_{УСО}^ж = \frac{\pi R_c^2 v_c \rho_ж}{\dot{v}_M \rho_M}, \quad (4)$$

где \dot{v}_M — удельное значение гидроэрозии мишени при УСО жидкостей, $\text{мм}^3/\text{с}$; ρ_M — плотность мишени. В этом смысле, согласно сравнению зависимостей (3) и (4), исследуемая УСО жидкостей подобна традиционной МО, в частности лезвийному резанию (см. рис. 2). Проведенную критериальную оценку можно расширить и детализировать, например путем рассмотрения $K_{МО}$ для труднообрабатываемых резанием материалов и аналогичных им гидроэрозионно стойких материалов мишени (инструмента) — керамик, СТМ, алмазоподобных композиций и т.д.

Энергетически латентная составляющая в уравнении (4) присутствует в виде удельного импульса струи ($v_c \rho_ж$). Она может быть легко конкретизирована путем анализа чисто энергетических критериев, связывающих различные виды энергий: кинетическую, энергию вновь образованных поверхностей, общую работу (энергию) формообразования и т.д. Однако с методической точки зрения анализ таких критериев дает аналогичные результаты. Поэтому для более детального анализа физико-энергетического подобия УСО жидкостей другим технологиям необходимо учитывать конкретное содержание процессов структуро- и формообразования, в частности механизмы трансформации энергии путем генерации колебательных и волновых процессов, в первую очередь волн упругой деформации, т.е. акустического излучения и/или акустической эмиссии (АЭ). Справедливость данного положения была подтверждена результатами исследования физико-технологического подобия различных операций методом экспертного

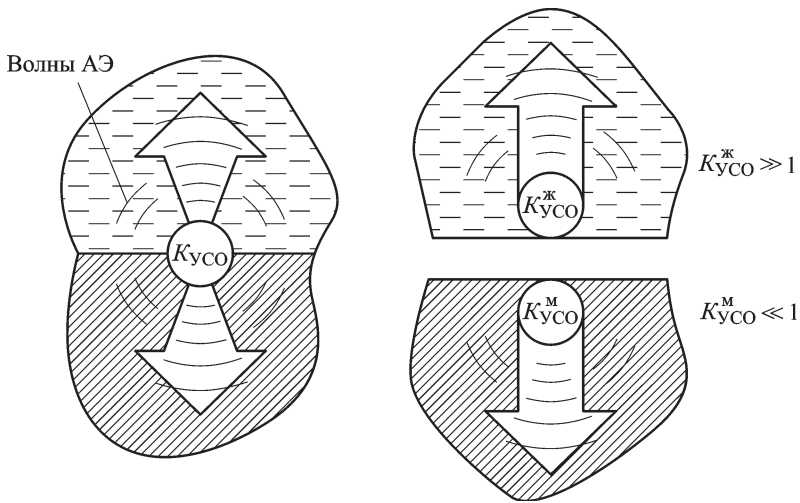


Рис. 3. Инверсия технологических понятий “обрабатываемый материал”– “инструмент” для УСО жидкостей

оценивания, в частности с использованием метода взвешенной суммы [4].

Следует отметить, что анализ особенностей информационно-диагностического обеспечения исследований на примере типовых способов формообразования показал достаточно близкое соответствие между динамическими характеристиками ультраструйного и ультразвукового воздействий на обрабатываемый материал. Это позволит использовать имеющуюся методическую базу исследований для анализа УСО, в том числе и методом АЭ [5].

Кроме того, учитывая, что при УСО жидкостей ударно-динамическим способом происходят многократные и различные по интенсивности превращения энергии, т.е. переход одного вида энергии в другой, необходимо проанализировать энергетику процесса обработки, дать интегральные оценки происходящих при этом энергетических превращений. Для этого представим последовательность превращений в виде уравнений энергетического баланса для различных участков и характерных зон формирования и действия струи.

На рис. 4 показаны основные зоны энергетических превращений при реализации технологий УСО.

Работа внешних сил $A_{в.с}$ будет перераспределяться в: 1) $E_{кин}$ — кинетическую энергию струи жидкости; 2) $E_{пот}$ — потенциальную энергию, которая образуется из-за сжатия жидкости и деформации элементов технологического оборудования; 3) E_T — тепловую энергию, выделяющуюся в результате трения жидкости о стенки сопла, о воздух, в результате торможения жидкости о мишень (преграду) и т.д.; 4) $E_{Аи}$, $E_{Эми}$, $E_{ЭЭЭ}$ — волновую энергию широкополосного акустического и электромагнитного излучения, а также энергию экзоэлектронной эмиссии соответственно; 5) $E_{н.п}$ — энергию, затрачиваемую на

образование новых поверхностей. Она связана с изменением площади различных поверхностей, в основном с диспергированием жидкости до спреобразного состояния; 6) $E_{гн}$ — энергию газонасыщения; 7) $E_{сф}$ — энергию возможных структурно-фазовых превращений.

Уравнения энергетического баланса будут выглядеть следующим образом.

В первом приближении энергетику зоны квазистатического сжатия жидкости перед струеформирующим соплом можно представить в виде

$$A_{в.с} = E_I = E_{кин}^I + E_{пот}^I + E_{АИ}^I. \quad (5)$$

В первой зоне $E_{кин}^I$ мало; $E_{пот}^I$ переходит в $E_{кин}^{II}$ и в $E_{АИ}^{II}$, $E_{АИ}^I$ обусловлено появлением акустического излучения (АИ), генерируемого в других зонах возмущения, так как скорость звука в жидкости $v_{зв}$ больше, чем скорость истечения $v_{ист}$ жидкости из сопла: $v_{ист} < v_{зв}$.

Энергетические превращения в зоне ускорения (разгона) жидкости в окосопловой области можно представить как

$$E_I = E_{II} = E_{кин}^{II} \uparrow\uparrow\uparrow + E_{АИ,ЭМИ} \uparrow + E_{н.п(износ)}^{II} \uparrow + E_{т}^{II} \uparrow. \quad (6)$$

Стрелки указывают на увеличение или уменьшение доли того или иного вида энергии. Число стрелок отражает степень (интенсивность) этого изменения, например: $\uparrow\uparrow\uparrow$ — весьма интенсивное увеличение; $\downarrow\downarrow$ — уменьшение средней интенсивности и т.д. Для оценки степени данных изменений и их направленности применяли известный в теории принятия решений метод взвешенной суммы в совокупности с использованием известных способов определения минимально необходимого числа экспертов и прогнозирования достоверности полученных результатов [4].

Во второй зоне $E_{кин}^{II}$ возрастет до максимальной величины, так как скорость резко увеличивается из-за действия интенсивного ускорения; возникновение $E_{АИ,ЭМИ}^{II}$ вызвано трением жидкости о поверхность сопла, далее $E_{АИ,ЭМИ}^{II}$ переходят в другие виды энергии, вплоть до энергии новых поверхностей $E_{н.п}^{III}$ и $E_{с.ф}^{III}$.

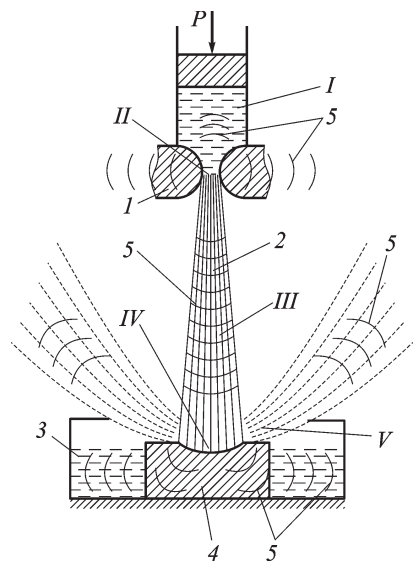


Рис. 4. Основные зоны энергетических превращений при ультраструйной активации жидкостей:

I-V — характерные зоны превращения энергии из одного вида в другие; *1* — струеформирующее сопло; *2* — сверхзвуковая струя; *3* — обрабатываемая жидкость; *4* — мишень; *5* — волны упругой деформации среды (широкополосное АИ)

Энергетическое уравнение зоны квазистабильного ультраструйного нестесненного (свободного) движения струи жидкости по инерции имеет вид

$$E_{II} = E_{III} = E_{кин}^{III} \downarrow + E_{АИ,ЭМИ}^{III} + E_{н.п}^{III} \uparrow + E_{Т}^{III} \uparrow. \quad (7)$$

В третьей зоне $E_{кин}^{III}$ несколько уменьшается из-за торможения струи жидкости о среду, например воздух, в котором происходит ее движение; $E_{н.п}^{III}$ растет за счет незначительного распыления струи жидкости воздухом и за счет поглощения части волновой энергии $E_{АИ}$ — акустического возмущения окружающей среды.

Четвертая, энергетически основная зона — зона сверхдинамичности струи жидкости. Эта зона торможения (ударения) жидкости о мишень (преграду) условно делится на зону неравновесной энергетики, сопряженную с интенсивным выделением волновой энергии, и зону квазистабильности энергетических превращений. Схематично энергетические превращения в этих зонах можно представить в виде

$$E_{III} = E_{IV} = E_{кин}^{IV} \downarrow\downarrow\downarrow + E_{АИ,ЭМИ,ЭЭЭ} \uparrow\uparrow\uparrow + E_{н.п}^{IV} \uparrow\uparrow\uparrow + E_{Т}^{IV} \uparrow \rightarrow \\ \rightarrow E_{кин}^{IV} \downarrow + E_{АИ,ЭМИ(мало)} \downarrow + E_{н.п}^{IV} \uparrow + E_{Т}^{IV} \uparrow + E_{ГН}^{IV} \uparrow. \quad (8)$$

В пятой зоне завершается цепочка энергетических превращений:

$$E_{IV} \rightarrow E_V = E_{кин}^V \downarrow + E_{АИ,ЭМИ(мало)}^V \downarrow + E_{н.п}^V \downarrow\uparrow + E_{Т}^V \uparrow + E_{ГН}^V \uparrow\uparrow. \quad (9)$$

Все пять выделенных зон энергетических превращений содержат весьма различные, но взаимосвязанные виды энергий. Из предложенной цепочки энергетических превращений (см. рис. 4) следует, что обобщенное интегральное уравнение энергетического баланса имеет вид

$$E = E_{Т} + E_{н.п} + E_{с.ф} + E_{АИ} + E_{ЭМИ} + E_{ЭЭЭ} + E_y + E_{пр}, \quad (10)$$

где E — энергия, подводимая к технологической системе от внешних источников с учетом потерь. Эта работа затрачивается непосредственно на изменение энергоемкости обрабатываемой жидкости, в частности ее кинетической энергии движения и внутренней энергии покоя, например потенциальной, в случае проявления осязаемой сжимаемости жидкости при высоких давлениях $E_{Т}$ — тепловая энергия обработанной жидкости; $E_{н.п}$ и $E_{с.ф}$ — энергии, расходуемые на образование новых поверхностей, структурные и фазовые превращения. Например, при гидрорезании — на изменение поверхностной энергии частиц, образующихся при микроразрушении абразивных зерен обрабатываемой поверхности, ее наклепа, включая структурные изменения самой рабочей жидкости, в частности изменения степени ее эмульгированности для ряда СОЖ в первую очередь на масляной основе;

каплеобразование, парообразование и прочие. $E_{\text{АИ}}$ — энергия акустического излучения (волн упругой деформации (АЭ)); $E_{\text{ЭМИ}}$ — энергия электромагнитного излучения; $E_{\text{ЭЭЭ}}$ — энергия экзоэлектронов; $E_{\text{у}}$ — потенциальная энергия упругих деформаций элементов технологической системы неволновой природы, обусловленная действием статической и квазистатической составляющих полей механических напряжений; $E_{\text{пр}}$ — прочие виды энергии, которыми в первом приближении можно пренебречь, например вторичными акустическими и энергомагнитными излучениями. Заметим, что если энергетический вклад $E_{\text{пр}}$ невелик, то ее информационное значение требует специального анализа в рамках методологии эмиссионной технологической диагностики [5].

Качественный анализ уравнения (10) позволяет выделить следующие основные особенности энергетических превращений при реализации ультраструйных гидротехнологий и сделать промежуточные выводы.

1. В методическом плане уравнение (10) позволяет определить сами термины “ультраструя”, “ультраструйная технология” и “ультраструйная обработка”.

Действительно, если всеми слагаемыми уравнения (10) можно пренебречь, за исключением $E_{\text{т}} \gg E_i$ ($i = \text{н.п, сф, АИ, ЭМИ, ЭЭЭ, у, пр}$), то приставка “ультра” не имеет смысла. Несмотря на условность такой градации, она достаточно четко в зависимости от конкретных условий и решаемых задач позволяет классифицировать по энергетическому признаку все многообразие гидроструйных технологий. В частности, если $E_{\text{н.п}}$ и $E_{\text{с.ф}}$, остающиеся в материале мишени (заготовки), достаточно велики, то мы имеем дело с гидрорезанием или гидроструйной очисткой. Если их доля существенно меньше тех же видов энергии, остающихся в жидкости, то это классический вариант УСТ обработки жидкостей в целях их активации.

2. Анализируя уравнение (10), выявили наличие достаточно устойчивых, не склонных к последующей трансформации видов энергии. В основном это $E_{\text{т}}$, $E_{\text{н.п}}$, $E_{\text{с.ф}}$, которые, конечно, имеют кинетическую (временную) компоненту, но могут в первом приближении рассматриваться как квазистационарные. Данные виды энергии, по сути, интегрально определяют энергетический облик, портрет конкретной гидротехнологии. Их величина и соотносительность между собой имеют важное физико-технологическое значение и являются основными объектами целенаправленного управления, ответственным за вторичные энергетические превращения.

Таким образом, в результате комплексного анализа энергетических превращений при реализации ультраструйных технологий был выявлен поэтапный, параллельно-последовательный характер превращения кинетической энергии струи в другие виды энергии в зоне

ее взаимодействия с твердотельной мишенью. Выделено пять основных областей энергетических превращений в зоне обработки ГТС (см. рис. 4). Изучены особенности энергетических превращений и установлена роль ударно-волновой энергии в виде акустического излучения, как доминирующего фактора активации ГТС при их ультразвуковой обработке.

В заключение отметим, что применение ультразвуковой технологии для обработки питьевой воды и промышленных эмульсий позволило [10]: провести полную стерилизацию воды при температуре ($\sim 50 \dots 70^\circ\text{C}$) с сохранением эффекта стерильности в течение минимум одного года; осуществить обеззараживание бактериально-загрязненных промышленных эмульсий, обеспечить повышение их эксплуатационных характеристик (до $30 \dots 50\%$); снизить на $20 \dots 25\%$ концентрацию балластных веществ в настойках лекарственных трав, приготовленных на обработанной по ультразвуковой технологии воде; выявить положительное влияние ультразвуковой воды на развитие семян и рост растений, а также на митотическое деление клеток.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барзов А. А., Галиновский А. Л., Пузаков В. С. Экологические возможности и инновационный потенциал ультразвуковой технологии обработки жидкостей // Татищевские чтения. Актуальные проблемы науки и практики: Материалы Междунар. науч. конф. – Тольятти: Волжский университет им. В.Н.Татищева, 2005. – С. 8–4.
2. Барзов А. А., Галиновский А. Л., Пузаков В. С., Сидельников К. Е. Ультразвуковая технология активации жидкостей. – М.: Машиностроение-1, 2006. – 93 с.
3. Кобылкин И. Ф., Селиванов В. В., Соловьев В. С., Сыроев Н. Н. Ударные и детонационные волны. Методы исследования. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 376 с.
4. Ларичев О. И. Объективные модели и субъективные решения. – М.: Наука, 1987. – 144 с.
5. Барзов А. А. Эмиссионная технологическая диагностика. – М.: Машиностроение, 2005. – 384 с.
6. Акуличев В. А., Алексеев В. Н., Буланов В. А. Периодические фазовые превращения в жидкостях. – М.: Наука, 1986. – 280 с.
7. Бренер В. А., Жабин А. Б., Пушкарев А. Е., Щеголевский М. М. Гидроабразивное резание горных пород. – М.: Изд-во МГТУ, 2003. – 196 с.
8. Тихомиров Р. А. Гидрорезание судостроительных материалов. – Л.: Судостроение, 1987. – 164 с.
9. Цветков Ю. Н., Погодаев Л. И. Напряженное состояние металлов при изнашивающем воздействии абразива. Монография. – СПб.: СПбГУВК, 2004. – 94 с.
10. Барзов А. А., Галиновский А. Л., Сидельников К. Е. Ультразвуковая активация воды. – М.: РАДЭКОН, 2007. – 23 с.

Статья поступила в редакцию 5.05.2008

Александр Александрович Барзов родился в 1949 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1973 г. Д-р техн. наук, профессор кафедры “Технологии ракетно-космического машиностроения”. Автор более 200 научных работ в области технологии машиностроения, физико-технических методов обработки, контроля и диагностики.



A.A. Barzov (b. 1949) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1973. D. Sc. (Eng.), professor of “Technologies of Rocket and Space Mechanical Engineering” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 200 publications in the field of technology of mechanical engineering, inspection and diagnostics.

Андрей Леонидович Галиновский родился в 1974 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1998 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Технологии ракетно-космического машиностроения”. Автор более 100 научных работ в области технологии машиностроения, проектирования клеесборного режущего инструмента, совершенствования технологии гидроабразивного резания.



A.L. Galinovskii (b. 1974) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 1998. Ph. D. (Eng.), assoc. professor of “Technologies of Rocket and Space Mechanical Engineering” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 100 publications in the field of technology of mechanical engineering, design of glue-prefabricated cutting tool.

Вячеслав Сергеевич Пузаков родился в 1981 г., окончил Московский энергетический университет в 2003 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Технологии ракетно-космического машиностроения”. Автор более 30 научных работ в области технологии гидроструйной обработки материалов и жидкостей.



V.S. Puzakov (b. 1981) graduated from the Moscow Power Engineering Institute in 2003. Ph. D. (Eng.), assoc. professor of “Technologies of Rocket and Space Mechanical Engineering” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 30 publications in the field of hydrotechnological medium processing.