

## ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

УДК 621.9.048.7

А. А. БАРЗОВ, А. Л. ГАЛИНОВСКИЙ

**ПОЛИФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ  
УЛЬТРАСТРУЙНОЙ ТЕХНОЛОГИИ  
ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ И ЖИДКОСТЕЙ**

В статье рассматриваются вопросы инверсии технологических понятий: режущий инструмент – обрабатываемый материал. Анализ функциональных возможностей ультразвуковых гидротехнологий показал, что в них присутствует своеобразный технологический дуализм, проявляющийся в двойном использовании высокоэнергетической жидкостной струи: в качестве режущего (формообразующего) инструмента и/или специфического обрабатываемого материала. *Инверсия понятий; ультразвуковые технологии; обработка материалов и жидкостей; энергетические превращения*

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.

Инновационно-значимую перспективу имеет ультразвуковая технология как практически не изученный метод целенаправленного изменения потребительских свойств самой жидкости, подвергнутой комбинированному высокоэнергетическому воздействию в процессе ультразвуковой обработки (УСО).

Под ультразвуковой технологией будем понимать 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.

**1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА**

Используя технологическую инверсию понятий «режущий инструмент–обрабатываемый материал», в МГТУ им. Н. Э. Баумана было по-

казано, 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]. Кроме того, было установлено, что ультразвуковая жидкости является универсальным контрольно-диагностическим инструментом, позволяющим получить оперативную информацию о параметрах состояния поверхностного слоя деталей (заявка на выдачу патента № 2009197370, приоритет от 03.03.2009).

**2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ**

Физико-техническую основу УСО составляет сжатие обрабатываемой жидкости до сверхвысоких давлений (до 150–500 МПа), продавливание ее через специально спрофилированное сопло малого диаметра (0,1–0,2 мм), удар и дальнейшее торможение сформированной сверхзвуковой (~800 м/с) компактной ультразвуковой жидкости о преграду (мишень) из эрозионностойкого материала – своеобразный инструмент. Это приводит к изменению свойств различных гидротехнологических сред (ГТС), т. е. к их активации. В качестве обрабатываемой ГТС, могут быть использованы любые жидкофазные среды: вода, растворы, эмульсии, пищевые жидкости 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 изуче-

ны, 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 ультразвукового воздействия на них. Тем не менее результаты проведенных исследований и их анализ показывают, что при УСО жидкостей на них оказывают влияние следующие физико-энергетические факторы, способные привести к изменению исходных свойств – активации [1]:

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 ультразвука, формируемой в специально спроектированном сопле.

2. Истечение обрабатываемой ГТС через профилированное сопло малого диаметра. В результате этого имеет место резкое нестационарное ускорение жидкости, ее взаимодействие со стенками сопла. Данный процесс характеризуется весьма интенсивными сдвиговыми деформациями в жидкости, генерированием в пограничном слое акустического и электромагнитного излучения, разогревом жидкости вследствие процессов внешнего и внутреннего трения.

3. Свободное, нестесненное движение жидкости на выходе из сопла. Этот этап ультразвукового технологического воздействия характеризуется определенным понижением температуры струи из-за расширения сжатой жидкости, небольшими тормозными перегрузками из-за трения гидроструи о воздух (газ) незначительным газонасыщением жидкостей из-за малого промежутка времени свободного движения струи (~ 1 мс) и ее частичным диспергированием.

4. Удар и торможение высокоскоростной ультразвука о мишень. При этом происходят сверхинтенсивные механо-физические ударные явления неравновесно-динамического типа. В частности, возникают сверхмощные колебательные и волновые процессы акустической и электромагнитной природы в широком диапазоне частот. Имеют место вторичные эффекты спроектирования. При этом реализуется пере-

ход исходной кинетической энергии ультразвука в другие виды энергии, в первую очередь тепловую, химическую и поверхностную, что также приводит к увеличению эффекта активации обработанной жидкости.

5. Свободное движение распыленной струи жидкости характеризуется изменением температуры из-за процессов остывания микрокапель, трения капель о воздух (газ) и частичного испарения жидкости. При этом происходит ее интенсивное газонасыщение в спроектированном состоянии.

Необходимо также отметить, что помимо вышерассмотренных факторов на степень активации обрабатываемой ГТС оказывает влияние характер перепада давлений в сопле, дисперсность распыленной жидкости, темп (динамика) цикла «разгон–торможение струи», уровень газонасыщения жидкости, наличие в ней микрочастиц сопла и в особенности материала мишени, а также явление экзотермической эмиссии в зоне ультразвукового взаимодействия. Схематично полифункциональные возможности УСТ как средства обработки материалов и жидкостей показаны на рис. 1.

### 3. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для прогнозирования результативности изучаемой операционной гидротехнологии, в частности, для активации ГТС путем их 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 вида

$$K_M = \frac{\dot{U}_{\text{ом}} \rho_{\text{ом}}}{\dot{U}_{\text{им}} \rho_{\text{им}}}, \quad (1)$$

где  $K_M$  – масс-энергетический критерий или параметр, характеризующий отношение масс и в скрытом (латентном) виде энергий основных элементов технологической системы «инструмент–деталь», участвующих в процессе структуро- и формообразования при выполнении различных технологических операций, например, точения, шлифования и др.;  $\dot{U}_{\text{ом}}$  и  $\dot{U}_{\text{им}}$  – соответственно удельные ( $dU / dt$ ) объемы обрабатываемого (ом) и инструментального (им) материалов, расходуемые и/или образующиеся при обработке ( $\text{м}^3/\text{с}$ );  $\rho_{\text{ом}}$  и  $\rho_{\text{им}}$  – соответственно плотности обрабатываемого и инструментального материала ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ).

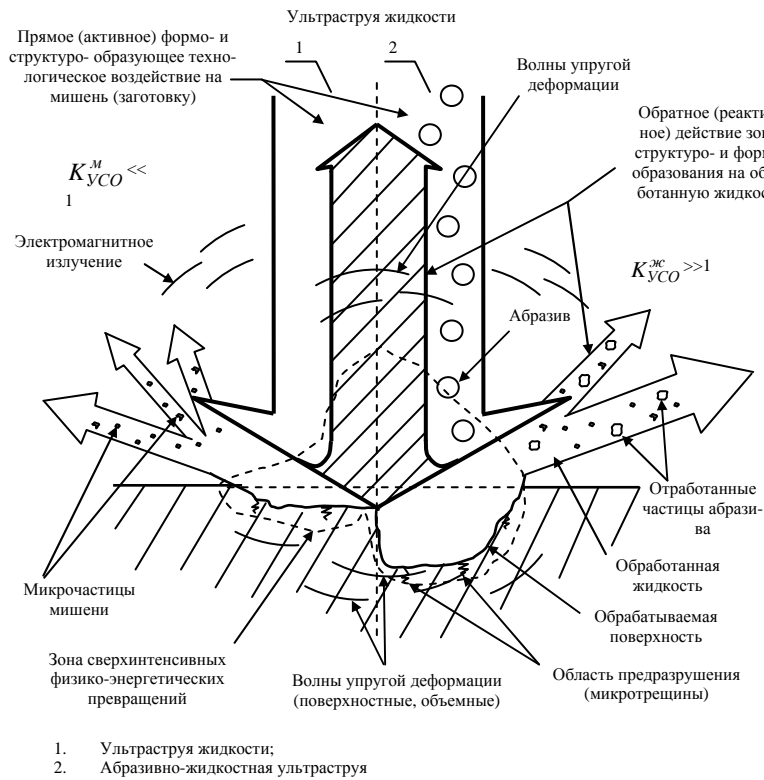


Рис. 1. Физическая картина ультразвуковой обработки материалов и жидкостей

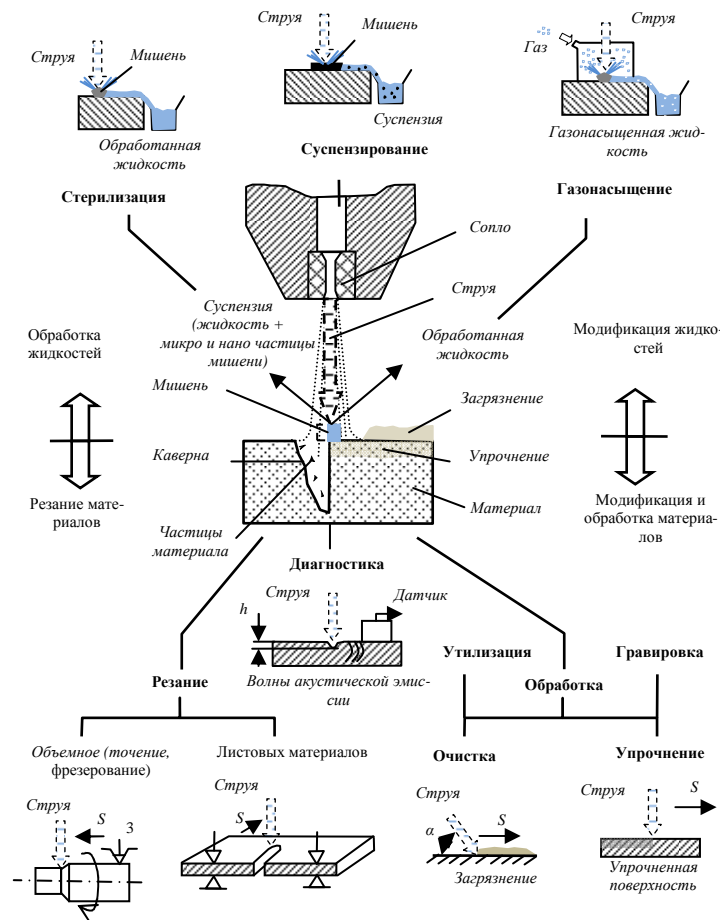


Рис. 2. Основные области реализации УСТ

Важно отметить, что при УСО энергетически латентная составляющая в (1) присутствует в виде удельного импульса струи ( $V_c \rho_{ж}$ ).

Действительно, применительно к УСО материалов  $K_M$  имеет вид

$$K_{УСО}^M = \frac{S_n h \rho_m}{V_c R_c \rho_{ж}} \quad (2)$$

где  $V_c$  и  $S_n$  – соответственно скорость струи и скорость подачи заготовки (м/с);  $h$ ,  $R_c$  – соответственно толщина разрезаемой заготовки и радиус струи (мм);  $\rho_m$  и  $\rho_{ж}$  – соответственно плотность обрабатываемого материала и рабочей жидкости без учета абразива (кг/м<sup>3</sup>).

Соотношение типа (2) может быть легко получено и для других известных способов физико-технической обработки материалов, например, электроэрозионной, ультразвуковой и др. Их анализ с логарифмической точностью позволяет утверждать, что операции механической обработки характеризуются максимальным значением  $K_M$ , а УСО материалов (резание) – минимальным (см. рис. 1). С этой точки зрения УСО материалов резанием является весьма несовершенным способом формообразования деталей по сравнению с другими методами обработки.

Таким образом, своеобразный масс-энергетический КПД ультразвукового резания весьма низок. Однако критериальное соотношение типа (1) позволяет методически полно охарактеризовать тот или иной вид УСО материалов и жидкостей. Если  $K_{УСО} \ll 1$ , то мы имеем дело с классическим вариантом гидрорезания и/или струйной очисткой. В случае  $K_{УСО} \gg 1$ , т. е. обрабатываемый материал практически не разрушается, то этот предельный случай УСО жидкостей, реализуемый при их ультразвуковой активации.

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

Подчеркнем еще раз методологическое отличие УСО жидкостей от традиционной УСО материалов резанием, согласно предлагаемому критериальному подходу. В (1) в числителе должен находиться параметр, масс-

энергетически характеризующий количество обработанной жидкости, а в знаменателе – величина удельной гидроэрозии материала мишени (инструмента). Тогда в результате технологической инверсии понятий обрабатываемый материал-инструмент (рис. 1) для УСО жидкостей  $K_M$  будет иметь вид

$$K_{УСО}^ж = \frac{\pi R_c^2 V_c \rho_{ж}}{V_m \rho_m}, \quad (3)$$

где  $V_m$  – удельное значение интенсивности процесса гидроэрозии материала мишени при УСО жидкостей (мм<sup>3</sup>/с);  $\rho_m$  – плотность материала мишени.

В этом смысле, согласно сравнению зависимостей (2) и (3), исследуемая УСО жидкостей подобна традиционной механической обработке, в частности, лезвийному резанию. Проведенную критериальную оценку можно расширить и детализировать, например путем рассмотрения  $K_{МО}$  для труднообрабатываемых резанием материалов и аналогичных им гидроэрозионностойких материалов мишени (инструмента) – керамик, алмазоподобных композиций и т. д.

Энергетически латентная составляющая в (3) 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, энергию вновь образованных поверхностей, общую работу (энергию) формообразования и т. д. Однако с методической точки зрения анализ таких критериев даст аналогичные результаты. Поэтому для более детального анализа энергетического подобия необходимо учитывать физическое 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. Справедливость данного положения была также полностью подтверждена результатами исследования физико-технологического подобия операций методом экспертного оценивания, в частности, с использованием метода взвешенной суммы [2].

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ особенностей информационно-диагностического обеспечения исследований на примере типовых способов формообразования показал достаточно близкое соответствие меж-

ду динамическими характеристиками ультразвукового и ультразвукового воздействия на обрабатываемый материал. Это позволит использовать имеющуюся методическую базу исследований для анализа и информационно-диагностического обеспечения УСО, в том числе и методом акустической эмиссии [3].

Кроме того, учитывая, что при УСО жидкостей ударно-динамическим способом происходят параллельно-последовательные и различные по интенсивности превращения энергии, представляется необходимым осуществить полномасштабный анализ энергетики доминирующих физических процессов данных операционных гидротехнологий, провести интегральные и дифференциальные оценки слагаемых энергетического баланса в зоне ультразвукового взаимодействия. С общих позиций фазово-энергетические превращения в жидкостях рассматривались в работе [4], а феноменологические особенности энергетических превращений при ультразвуковой активации жидкостей проанализированы в [5]. В качестве иллюстрации полифункциональных возможностей УСТ на рис. 2. представлена структурная схема, отражающая существующие и перспективные направления развития данной гидротехнологии.

### ВЫВОДЫ

Отметим, что перспективная область применения УСТ, помимо обработки и очистки материалов, связана с развитием гидротехнологий активации, модификации и реновации различных жидкостей, а также с созданием аппарата ультразвуковой диагностики и контроля качества изделий на всех этапах их жизненного цикла изделий. В этом заключаются полифункциональные возможности операционных ультразвуковых гидротехнологий, определяющие их инновационный потенциал.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Барзов, А. А.** Ультразвуковая технология активации жидкостей / А. А. Барзов, А. Л. Галиновский, В. С. Пузаков, К. Е. Сидельников. М.: Машиностроение-1, 2006. 93 с.
2. **Хвастунов, Р. М.** Экспертные оценки в квалитметрии машиностроения / Р. М. Хвастунов, О. И. Ягелло, В. М. Корнеева, М. П. Поликарпов. М.: АНО «Технонефтегаз», 2002. 142 с.
3. **Барзов, А. А.** Эмиссионная технологическая диагностика / А. А. Барзов. М.: Машиностроение, 2005. 384 с.
4. **Акуличев, В. А.** Периодические фазовые превращения в жидкостях / В. А. Акуличев, В. Н. Алексеев, В. А. Буланов. М.: Наука, 1986. 280 с.
5. **Барзов, А. А.** Физико-технологические возможности ультразвуковой обработки материалов и жидкостей. Физическая гидродинамика / А. А. Барзов, В. С. Пузаков, С. К. Сальников, Н. Н. Сысоев. Препринт. 2004. № 6. Физический факультет. МГУ им. М. В. Ломоносова, 25 с.

### ОБ АВТОРАХ



**Барзов Александр Александрович**, проф. Д-р техн. наук по технологии машиностроения (МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1991). Иссл. в обл. ультразвуковых 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. жидкостной и абразивно-жидкостной резки.