

Акустическая диагностика процесса электроэрозионной обработки материалов

© И.Б. Ставицкий

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований акустических волн, возникающих при электроэрозионной обработке материалов, выделены и рассмотрены источники их возникновения. Установлено, что все источники являются функцией разрядного электрического тока (энергии импульса), длительности импульса электрического тока и физических свойств обрабатываемого материала. Показано, что амплитуда акустических сигналов, возникающих при электроэрозионной обработке материалов, пропорциональна частоте рабочих импульсов и их энергии, следовательно, производительности процесса электроэрозионной обработки, и может считаться информативным параметром для его диагностики в реальном времени. Результаты проведенных экспериментальных исследований показали, что амплитуда акустических сигналов однозначно связана с выходными параметрами электроэрозионной обработки. Метод акустической диагностики позволяет осуществить диагностику процесса электроэрозионной обработки в реальном времени в целях повышения эффективности управления им и повышения его производительности.

Ключевые слова: электроэрозионная обработка, акустические волны, параметры импульсов электроэрозионной обработки, амплитуда акустических сигналов, диагностика процесса электроэрозионной обработки, управление процессом электроэрозионной обработки

Введение. В современном производстве ракетно-космической техники (РКТ) необходимо широкое применение прогрессивных технологий, основанных на использовании электрофизических методов обработки. Создание и внедрение новых материалов, труднообрабатываемых традиционными механическими способами, усложнение конструкций деталей, сжатые сроки производства обуславливают высокую эффективность этих методов, иногда единственно применимых при изготовлении деталей РКТ, поскольку обработка многих из них традиционными механическими методами часто затруднена или невозможна.

В настоящее время одним из наиболее широко применяемых электрофизических методов при производстве РКТ для изготовления деталей топливной арматуры, двигателей, приборов и инструментальной оснастки является электроэрозионная обработка (ЭЭО). Особые сложности возникают при изготовлении отверстий малого диаметра (в том числе глубоких глухих) полостей с небольшим поперечным сечением сложной конфигурации, при профилировании де-

талей без заусенцев, образующихся после механической обработки. Однако, несмотря на все более широкое применение этого метода как при производстве РКТ, так и в других отраслях промышленности, его возможности реализуются не полностью. Во многом это вызвано недостаточной организацией управления процессом обработки, что приводит к значительному снижению ее стабильности и производительности. Таким образом, решение задачи повышения эффективности управления процессом ЭЭО для увеличения производительности весьма актуально.

Требуемый уровень технологических показателей ЭЭО предусматривает прежде всего назначение оптимальных параметров — скорости подачи электрода-инструмента в зону обработки и режимов обработки, а также и их оперативную корректировку. Важно учитывать, что процесс ЭЭО в значительной степени носит случайный характер в связи с постоянно изменяющимися условиями в межэлектродном промежутке (МЭП) и сопровождается короткими замыканиями электродов, холостым ходом генератора импульсов и др. Поэтому необходимо иметь объективную информацию о процессе ЭЭО, получаемую в реальном времени.

Для достижения наилучших показателей ЭЭО в электроэрозионном оборудовании применяют системы, основанные на различных способах управления:

1) поддержание единственного параметра процесса (например, расстояния между электродами) с помощью простой автономной замкнутой цепи управления (параметры цепи устанавливают автоматически или вручную);

2) по специальной программе, составленной с использованием эмпирически или теоретически установленных параметров обработки, но не учитывающей случайных колебаний значений параметров, возникающих в процессе обработки;

3) по непрерывной комплексной оценке процесса и установке параметров посредством логической системы — адаптивного управления.

Иногда используют различные комбинации перечисленных способов.

В подавляющем большинстве случаев для управления процессом ЭЭО применяют пропорциональные или пропорционально-интегральные регуляторы. Как обратную связь используют отклонение одного из сигналов, связанных с длиной МЭП, от заданного оператором значения. В системе управления применяют принцип сравнения сигнала, снимаемого с МЭП после соответствующей фильтрации и усиления, с задаваемым пороговым значением. В результате сравнения вырабатывается сигнал на сближение или удаление электродов. Скорость обработки существенно зависит от выбора пороговых значений

и параметров аналоговой части регулятора. Как показывает практика, процедура настройки регулятора на оптимальную скорость обработки сравнительно сложная, поскольку оценка состояния МЭП не всегда отражает его реально и позволяет судить о нем только косвенно.

В системах автоматической настройки на оптимальную скорость обработки, как правило, используют экстремальный характер зависимости скорости съема материала от длины МЭП, а также известные принципы реализации экстремальных самонастраивающихся систем. Есть системы управления, в которых в качестве критерия оценки состояния МЭП используют относительное количество импульсов холостого хода и коротких замыканий, вычисляемое по заданному количеству импульсов. Система ищет максимум коэффициента использования импульсов с помощью градиентного метода либо метода проб и ошибок на основе директив оператора. Данный подход к оценке состояния МЭП не дает точного представления о происходящих в нем процессах, так как позволяет судить о нем лишь косвенно.

Следовательно, одним из перспективных путей повышения эффективности ЭЭО служит непрерывный контроль состояния МЭП. Функции контроля следует осуществлять в рамках системы управления процессом ЭЭО на основе использования информации о его протекании непосредственно в зоне обработки. Поиск информативных признаков, характеризующих состояние МЭП, приводит к созданию новых методов диагностики, разработке математических, физических и других моделей, предназначенных для анализа процесса ЭЭО непосредственно в зоне формообразования.

Одним из них является акустический метод. Однако в настоящее время его применение для диагностики процесса ЭЭО сдерживается вследствие недостаточной изученности.

Цель данной работы — теоретическое и экспериментальное обоснование возможности применения акустического метода для диагностики процесса ЭЭО в реальном времени в целях повышения эффективности его управления и повышения его производительности.

Акустическая диагностика процесса электроэрозионной обработки. Акустическую диагностику успешно применяют при неразрушающем контроле материалов, исследовании разнообразных динамических процессов, таких, как движение дислокаций, фазовые переходы, зарождение и рост микротрещин и др. Получение полезной информации, содержащейся в акустических сигналах, осуществляется различными методами [1–8]. Число возможных регистрируемых параметров акустических волн может быть достаточно большим, поэтому важно сделать выбор наиболее информативных параметров.

Частотный спектр акустических волн несет важную информацию о физической природе излучения — по нему можно судить об энер-

гетических и временных параметрах источников акустического излучения [9–12]. Однако из всех регистрируемых параметров частотный спектр претерпевает наибольшие искажения в процессе распространения и приема. Приводимые в литературе результаты исследований этого параметра [1–16] противоречивы, нет единого мнения о форме спектра акустического излучения и его связях с параметрами источников излучения.

Достаточно распространен метод обработки акустических сигналов, с помощью которого регистрируют число превышений акустическими импульсами установленного уровня дискриминации (ограничения) за интервал наблюдения. Отношение числа данных превышений к интервалу времени наблюдений называют интенсивностью акустической эмиссии, а их общее количество — суммарной акустической эмиссией. Недостатком этого метода является одинаковое оценивание импульсов различной амплитуды. В то же время известно [1, 12], что амплитуда акустической эмиссии зависит от энергии излучения.

При использовании в качестве информативного параметра амплитуды акустических сигналов применяют различные способы его обработки, в том числе интегральный способ обработки с помощью детектирования по максимальной амплитуде, усреднения сигналов и измерения среднего квадратического значения сигнала, а также анализ распределения амплитуд. Амплитудное распределение получают, откладывая по оси абсцисс значения амплитуды, по оси ординат — количество таких амплитуд за определенный интервал времени Δt .

Высокая чувствительность и простота акустического метода определяют его использование при диагностике процесса ЭЭО. Метод технически прост, не изменяет конструкции электроэрозионного оборудования, обладает необходимой чувствительностью и быстродействием.

В связи с вышеизложенным нами были проведены работы, направленные на научное обоснование применения акустической эмиссии для управления процессом ЭЭО:

- исследован механизм генерирования акустических волн при ЭЭО;
- выполнен теоретический анализ энергоемкости процессов, происходящих при ЭЭО, позволяющий связать параметры акустических волн с характеристиками процессов, происходящих при ЭЭО;
- экспериментально проверена адекватность полученных теоретических положений.

Механизм генерирования акустических волн при электроэрозионной обработке. Для выявления причин возникновения акустических волн при ЭЭО рассмотрим механизм электрической эрозии в жидкой диэлектрической среде. Наиболее полно данный механизм описан в работе [17].

Известно, что первопричиной электрической эрозии материала является выделение энергии на электродах. Следовательно, необходимо рассмотреть распределение энергии между электродами и процессы, обуславливающие это выделение. Для этого МЭП при прохождении через него электрического тока представляют состоящим из трех частей: анода, катода и столба разряда. Столб разряда характеризуют как газовый проводник, обеспечивающий создание достаточного количества свободных электронов, которые аналогично случаю металлического проводника являются главными носителями электрического тока.

Энергия (W_c), выделяющаяся за время $t_{и}$ существования импульса, определяется выражением

$$W_c = \int_0^{t_{и}} u(t)I(t)dt, \quad (1)$$

где $u(t)$ — напряжение на МЭП; $I(t)$ — сила тока разряда.

Потери энергии $W_{и}$ в МЭП складываются из потерь в столбе разряда и потерь на электродах, т. е.

$$W_{и} = W_c + W_s, \quad (2)$$

где W_c — энергия, выделяющаяся в столбе разряда; W_s — энергия, передаваемая электродам.

Энергия, выделяющаяся в канале разряда, расходуется на ионизацию, нагрев газа, излучение и образование ударной волны, которая и порождает акустические волны. Таким образом, ударная волна — один из источников, который вызывает появление акустических волн.

Энергия, передаваемая электродам, выделяется на аноде (W_a) и катоде (W_k).

Для выявления причин возникновения акустических волн при ЭЭО наибольший интерес вызывает рассмотрение процессов, происходящих непосредственно на электродах, поверхность которых подвергается эрозионному разрушению вследствие выделения на них энергии W_a и W_k .

При возникновении единичной лунки, а также образовании новой поверхности, которая представляет собой результат многократного наложения единичных лунок, близлежащие слои металла подвергаются термическому воздействию. Высокая интенсивность и короткое время действия (около 1 мкс...100 мс) тепловых источников, созданных разрядом, обеспечивают чрезвычайно высокую скорость повышения температуры — $10^6...10^3$ град/с в поверхностных слоях электродов. Градиенты температуры в слоях, лежащих непосредственно

под лункой, имеют значения $10^7 \dots 10^8$ град/см [17]. Наличие рабочей жидкости обеспечивает после окончания разряда весьма высокие скорости охлаждения — около $10^4 \dots 10^6$ град/с [17].

Совокупное действие этих факторов приводит к тому, что в поверхностных слоях материалов, подвергшихся электроэрозионному разрушению, наблюдается комплекс физико-химических превращений, которые приводят к существенному изменению свойств поверхностных слоев и появлению дефектов.

Нестационарные температурные поля как на стадии нагрева при действии импульсного электрического тока, так и на стадии охлаждения после его окончания создают в поверхностных слоях крайне неравномерное распределение температуры. Поэтому одновременно с температурным полем в поверхностных слоях возникает сложное напряженное состояние. Возникающие термические напряжения могут превосходить не только предел текучести, но и временное сопротивление материала. В связи с этим в поверхностных слоях обработанного электроэрозионным способом материала возникают упругие и пластические деформации, а также могут образоваться микродефекты типа микротрещин, пор и т. п. Развитие микротрещин, как известно, вызывает акустическую эмиссию [1]. Таким образом, одним из источников акустических волн при ЭЭО служит образование и развитие микротрещин в поверхностных слоях обрабатываемого материала.

Глубина слоя расположения микротрещин растет с увеличением энергии импульса и может достигнуть 700...800 мкм [17]. Однако при коротких импульсах или малой их энергии микротрещины не образуются. Металлографические исследования показывают, что характер дефектов и склонность к их образованию сильно зависят от химического состава обрабатываемого материала. Наибольшую склонность к зарождению микротрещин при прочих равных условиях проявляют металло-керамические материалы и легированная сталь, которые содержат карбидообразующие примеси, очень чувствительны металлокерамические композиции, состоящие из различных по физическим свойствам компонентов. Типичным примером таких материалов могут служить твердые сплавы на основе карбидов вольфрама или титана.

Следовательно, акустическая эмиссия, вызываемая образованием микротрещин, носит нерегулярный характер и при определенном подборе режимов обработки не возникает. Поэтому данный источник акустических волн можно рассматривать как информативный для определения крайне нежелательного в ряде случаев явления трещинообразования в поверхностном слое обрабатываемой детали.

Следует отметить, что при наличии оплавленного слоя кроме напряжений чисто термического происхождения на напряженное состояние в значительной мере влияет сжатие, возникающее при кристаллизации расплавленного слоя, и образование новых фаз с иным,

чем исходный, объемом. Структурно-фазовые превращения являются источником акустической эмиссии [1]. В связи с этим можно заключить, что структурно-фазовые превращения являются источником акустических волн при ЭЭО.

Поскольку в момент возникновения электрического разряда скорость повышения температуры на поверхности электрода крайне высокая, на развивающееся под действием процесса распространения теплоты от поверхностных слоев квазистатическое напряженное состояние накладывает действие динамических эффектов, которые в значительной степени изменяют характер напряжений во времени и в пространстве. Как можно судить из решения динамических задач термоупругости, при кратковременных тепловых воздействиях от нагретой поверхности формируется и продвигается внутрь тела продольная волна упругих напряжений. В момент прихода этой волны в заданную точку тела напряжения изменяются скачкообразно и могут превосходить начальное значение в несколько раз. Иными словами, во время электрического разряда осуществляется тепловой удар. Согласно экспериментальным данным [17], значения термических напряжений как в динамическом, так и в квазистатическом режимах могут превосходить предел текучести материала. Следовательно, в действительности имеет место не чисто упругое, а упругопластическое напряженное состояние.

Приближенное решение задачи о термоупругих напряжениях, приведенное в работе [17], показывает, что термические напряжения растут с увеличением энергии импульса и пропорциональны в первом приближении коэффициенту термического расширения и модулю сдвига. Следует отметить, что время пребывания под нагрузкой поверхностного слоя материала составляет от единиц до десятков микросекунд.

Следовательно, еще одним источником возникновения акустических волн при ЭЭО является волна упругих напряжений (тепловой удар).

После прекращения тока разряда давление в расширяющемся по инерции газовом пузыре резко уменьшается и становится ниже атмосферного. В результате содержащийся в лунке расплавленный и перегретый металл вскипает и выбрасывается из нее в виде мелких капель и пара. Струя пара оказывает реактивное давление на дно лунки и частично выдавливает оставшийся расплавленный металл на ее периферию. Реактивное давление на дно лунки составляет, по данным работы [17], около 5 МПа и действует очень кратковременно. Таким образом, реактивное давление пара и мелких капель, выбрасываемых из лунки, также является источником акустических волн.

Иногда съем материала вследствие плавления и испарения не является доминирующим и тогда преобладает хрупкое разрушение ма-

териала. Происхождение сил, вызывающих удаление материала из зоны действия разряда, уже не связано с гидродинамическими процессами, а обусловлено термическими напряжениями, возникающими в слоях, которые прилегают к источнику теплоты. Эти напряжения в зависимости от условий обработки и свойств материала могут превышать его временное сопротивление. В связи с этим материалы с низким временным сопротивлением и малой пластичностью характеризуются хрупким разрушением и удалением частиц в твердом виде, т. е. материал, не претерпевая плавления и испарения, удаляется в твердой фазе (скалывается).

Очевидно, что такому механизму эрозионного разрушения поверхности присущи все вышеназванные источники акустических волн, однако вклад каждого из них в результирующий сигнал будет уже иным. Так, для механизма с преобладанием хрупкого разрушения материала доля сигнала акустической эмиссии, вызванная образованием и развитием микротрещин, будет существенно больше, чем при механизме с преобладанием материала в жидкой и парообразной фазе. Справедливость данного утверждения подтверждает тот факт, что количество образуемых микротрещин (и, следовательно, источников акустической эмиссии) в первом случае существенно больше, чем во втором.

Все перечисленные источники акустической эмиссии можно рассматривать действующими одновременно, так как рассогласование по времени между ними составляет около 1 мкс. В результате можно считать, что совокупность всех перечисленных источников акустических волн является волновой реакцией материала на электрический импульс, т. е.

$$W_{\Sigma} = W_{y.v} + W_p + W_{y.n} + W_{c.f} + W_t, \quad (3)$$

где W_{Σ} — суммарная энергия акустических волн; $W_{y.v}$ — энергия, вызванная ударной волной газового пузыря; W_p — энергия, обусловленная реактивным давлением пара; $W_{y.n}$ — энергия, вызванная упругими напряжениями; $W_{c.f}$ — энергия, вызванная структурно-фазовыми превращениями; W_t — энергия, возникающая вследствие образования и развития микротрещин.

Выделение при экспериментальном исследовании каждого фактора, очевидно, невозможно, поскольку все факторы взаимосвязаны и протекают, как было указано выше, практически одновременно. Целесообразно регистрировать их суммарное воздействие. Однако возникновение акустических волн при микрорастрескивании материала все же в дальнейшем следует рассмотреть особо. Интерес к этому ис-

точнику возникает прежде всего потому, что для многих случаев микрорастрескивание крайне нежелательно, а следовательно, его необходимо прогнозировать и исключать.

Такова модель механизма возникновения акустических волн от единичного импульса электрического тока. Эти же представления справедливы и для интегрального процесса эрозии под действием импульсов, следующих один за другим с некоторой частотой f .

Энергоемкость акустических волн при электроэрозионной обработке. В соответствии с моделью электрической эрозии в настоящей работе выделено и рассмотрено пять источников акустических волн, действующих при ЭЭО (рис. 1):

- 1) ударная волна;
- 2) реактивное давление;
- 3) структурно-фазовые превращения;
- 4) тепловой удар (нестационарные термоупругие напряжения);
- 5) возникновение и развитие микротрещин.

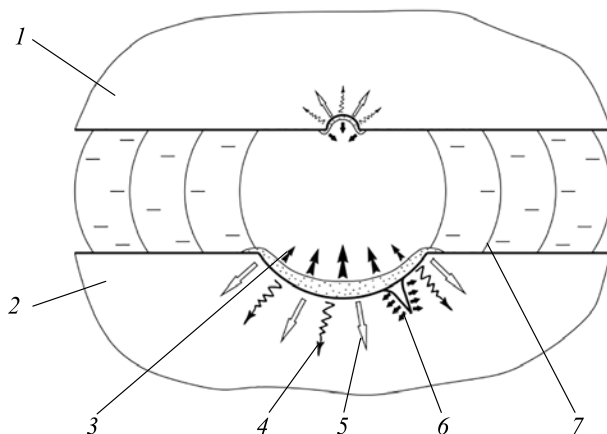


Рис. 1. Схема источников акустических волн, действующих на электроды при электроэрозионной обработке:

1 — электрод-инструмент; 2 — электрод-заготовка; 3 — реактивное давление выбрасываемого материала; 4 — нестационарные термоупругие напряжения; 5 — структурно-фазовые превращения; 6 — образование и развитие микротрещин; 7 — ударная волна

В результате совокупного действия этих источников на поверхности материала в точках приложения электрических разрядов возникают упругие волны. Распространяясь, они претерпевают значительные изменения вследствие рассеяния и отражения от поверхностей, ограничивающих объем тела, поэтому на входе приемного

преобразователя сигналы представляют собой случайный процесс. Следовательно, при обработке сигналов от акустических волн целесообразно использовать методы, позволяющие оценить их энергоемкость. Например, метод, основанный на измерении среднего квадратичного значения амплитуды сигнала акустических волн [18]:

$$A_{с.к} = \left[\int_0^T \frac{A^2(t)dt}{T} \right]^{0,5}, \quad (4)$$

где $A_{с.к}$ — среднее квадратичное значение амплитуды сигнала акустических волн; A — амплитуда сигнала акустических волн; T — период времени, в течение которого проводят измерения.

Следует отметить, что с помощью рассматриваемого метода обработки сигналов можно получить информацию об энергоемкости сигналов акустических волн не от каждого конкретного электрического импульса, а от их совокупного действия за устанавливаемое время T , т. е. интегральную величину.

Известно, что мощность сигнала пропорциональна квадрату его амплитуды:

$$W' = \frac{dW}{dt} \sim A^2. \quad (5)$$

Предполагая, что мощность сигналов от акустических волн, поступающих с обрабатываемого материала или электрода-инструмента (анода или катода), пропорциональна мощности происходящих при ЭЭО процессов, можно записать

$$A = k(W'_{у.в} + W'_p + W'_{у.н} + W'_{с.ф} + W'_T)^{0,5}, \quad (6)$$

где k — коэффициент пропорциональности; $W'_{у.в}$ — мощность ударной волны; W'_p — мощность реактивного давления; $W'_{у.н}$ — мощность упругих напряжений; $W'_{с.ф}$ — мощность структурно-фазовых превращений; W'_T — мощность микрорастрескивания.

Известно [17], что энергия W_c , выделяющаяся в столбе разряда, расходуется на ионизацию, нагрев газа и образование ударной волны, т. е.

$$W_c = l_{мэп} \int_0^{t_i} E(t)I(t)dt, \quad (7)$$

где $l_{мэп}$ — длина МЭП; t_i — длительность импульса; $E(t)$ — градиент потенциала в канале разряда; $I(t)$ — сила тока разряда.

Поэтому для энергии ударной волны $W_{y.в}$ можно записать

$$W_{y.в} = k_{к.р} W_c = k_{к.р} l_{МЭП} \int_0^{t_{и}} E(t) I(t) dt, \quad (8)$$

где $k_{к.р}$ — коэффициент, который показывает, какая часть энергии, выделяющейся в канале разряда, расходуется на образование ударной волны. Тогда

$$W'_{y.в} = k_{к.р} l_{МЭП} \int_0^{t_{и}} \frac{E(t) I(t) dt}{T}. \quad (9)$$

Отсюда следует, что мощность ударной волны является функцией силы тока разряда, длины МЭП и градиента потенциала в канале разряда.

Согласно данным работы [17], мощность реактивного давления факелов зависит от скорости ввода энергии в область контакта канала разряда с поверхностью электрода, т. е. мощность W'_p тем выше, чем больше энергия импульса $W_{и}$ при постоянной его длительности ($t_{и} = \text{const}$). Кроме того, мощность W'_p возрастает с уменьшением длительности импульса $t_{и}$ и зависит от теплофизических характеристик обрабатываемого материала.

Точное математическое описание данной зависимости к настоящему времени еще не получено.

В первом приближении мощность структурно-фазовых превращений $W'_{с.ф}$ можно оценить по толщине измененного слоя материала. В работе [19] приводится следующая эмпирическая зависимость для толщины h измененного слоя:

$$h = k I^{0,5} t_{и}^{0,4} m^{0,33}, \quad (10)$$

здесь k — коэффициент пропорциональности; $I^{0,5}$ — сила тока разряда; m — физическая константа обрабатываемого материала, определяемая по формуле

$$m = \rho c T_{пл} \sigma^{-2}, \quad (11)$$

где ρ , c , $T_{пл}$, σ — соответственно плотность, удельная теплоемкость, температура плавления и удельное сопротивление обрабатываемого материала.

Очевидно, что мощность структурно-фазовых превращений $W'_{с.ф}$ зависит от энергии и длительности импульса и возрастает с их увеличением. В общем виде эту зависимость с учетом уравнений (10) и (11) можно представить в виде

$$W'_{с.ф} = k_{с.ф} W^{a_i} t_i^b, \quad (12)$$

где $k_{с.ф}$ — коэффициент, зависящий от физических свойств обрабатываемого материала.

Точное математическое описание данной зависимости к настоящему времени еще не получено.

В поверхностных слоях обрабатываемого материала под действием электрического разряда формируется очень сложное напряженное состояние, математическое описание которого представляет собой нестационарную нелинейную задачу термоупругости. Постановка такой задачи и метод ее решения — предмет отдельного специального исследования, выходящий далеко за рамки данной работы. Приведенное в работе [17] приближенное решение задачи о температурных напряжениях позволяет сделать вывод о том, что мощность $W'_{у.н}$ волны термоупругих напряжений растет с увеличением энергии импульса и пропорциональна коэффициенту термического расширения и модулю сдвига. Кроме того, она возрастает с увеличением длительности импульса тока, если мощность источника остается постоянной.

В настоящее время исследованию образования микротрещин и, соответственно, сигналов акустической эмиссии посвящено достаточно много работ (например [20, 21]). С феноменологических позиций это явление объясняется динамической разгрузкой части материала, примыкающего к сторонам образовавшейся трещины. При этом установлено, что амплитуда сигнала акустической системы связана с длиной образовавшейся трещины. Эту взаимосвязь описывает соотношение [21]

$$A = k_T \frac{l_{тр}}{2} \sigma_{и} \sqrt{\frac{2\pi a_{тр}}{E}}, \quad (13)$$

где k_T — коэффициент пропорциональности; $l_{тр}$ — длина образовавшейся трещины; $a_{тр}$ — ширина образовавшейся трещины; E — модуль Юнга.

Поскольку размеры образующихся при ЭЭО трещин зависят от энергии импульсов, их длительности, а также физических свойств обрабатываемого материала, то согласно формуле (13) амплитуда сигналов акустической эмиссии также зависит от этих параметров.

Из изложенного очевидно, что расчет каждой i -й составляющей W' крайне затруднителен, однако их качественная оценка показывает, что все они, в первую очередь, являются функцией силы тока разряда (энергии импульса), длительности импульса и физических свойств обрабатываемого материала. Поэтому нецелесообразно рассматривать каждую составляющую в отдельности, а необходимо

условно объединить их в один источник акустических волн. Единственным исключением иногда служит источник, вызванный микро-растрескиванием поверхности материала, мощность которого при необходимости можно рассматривать отдельно. Кроме того, данный источник действует только при некоторых параметрах импульсов при обработке определенных материалов и характеризует крайне нежелательное явление — образование микротрещин.

Таким образом, выражение (6) переписываем в виде

$$A = k_{аэ} \sqrt{W'_и}, \quad (14)$$

где $k_{аэ}$ — коэффициент пропорциональности; $W'_и$ — мощность импульса тока.

Из вышеизложенного следует, что амплитуда акустических сигналов пропорциональна энергии и длительности импульсов тока. Кроме того, она зависит от свойств обрабатываемого материала. Поэтому можно предположить, что амплитуда акустических сигналов однозначно связана с выходными параметрами ЭЭО: производительностью процесса обработки, износом электрода-инструмента и качеством обработанной поверхности.

Известно [22], что для наиболее широко используемого в ЭЭО диапазона значений характеристик импульсов объем материала, удаляемого с поверхности заготовки за один импульс, связан с энергией импульса линейной зависимостью

$$V_1 = k_1 W_и, \quad (15)$$

где V_1 — объем материала, удаляемого с поверхности заготовки за один импульс; k_1 — коэффициент удельной эрозии; $W_и$ — энергия импульса тока.

Линейная зависимость (15) справедлива для длительностей импульса $t_и < 100$ мкс и энергий импульса $10^{-4} < W_и < 10^{-1}$ Дж.

В соответствии с принципом аддитивности эрозию в единицу времени (производительность ЭЭО) можно интегрально записать как

$$M = k_1 W_и f_p, \quad (16)$$

где f_p — частота рабочих импульсов.

Подставив в выражение (16) соотношение (1) и учитывая, что

$$f_p = \frac{1}{T_p}, \quad (17)$$

получим

$$M = k_1 \int_0^{t_n} \frac{u(t)I(t)dt}{T_p}, \quad (18)$$

где T_p — период следования рабочих импульсов.

Выражение (18) можно представить в виде

$$M = k_1 W'_и, \quad (19)$$

где

$$W'_и = \int_0^{t_n} \frac{u(t)I(t)dt}{T_p}. \quad (20)$$

Преобразовав выражение (14) с учетом (19), получим

$$A = k_2 \sqrt{M}, \quad (21)$$

где k_2 — коэффициент пропорциональности.

Из соотношения (21) следует, что амплитуда сигнала акустических волн пропорциональна производительности ЭЭО в степени 0,5.

Для того чтобы получить зависимость амплитуды сигнала акустических волн от энергии импульсов, выражение (14) перепишем в виде

$$A = k_{аэ} \sqrt{f_p W'_и}. \quad (22)$$

Поскольку удобнее пользоваться не частотой рабочих импульсов (импульсов тока), а частотой импульсов холостого хода (импульсов напряжения, подаваемых на МЭП генератором), то выражение (22) целесообразно представить как

$$A = k_{аэ} \sqrt{\eta f_{x.x} W'_и}, \quad (23)$$

где $\eta = \frac{f_p}{f_{x.x}}$ — коэффициент использования импульсов; $f_{x.x}$ — частота холостого хода генератора.

Таким образом, согласно выражениям (22), (23), амплитуда сигналов акустических волн при ЭЭО пропорциональна частоте рабочих импульсов и их энергии.

Приведенные выше результаты теоретических исследований показывают, что метод акустической диагностики позволяет осуществить диагностику процесса ЭЭО и повысить его эффективность.

Экспериментальные исследования метода акустической диагностики процесса ЭЭО проводились как на вырезных, так и на прошивочных электроэрозионных станках. На рис. 2 представлен типичный

результат регистрации амплитуды акустических сигналов при обработке заготовок на вырезном электроэрозионном станке. Видно, что амплитуда акустических сигналов зависит от скорости подачи электрода-инструмента и частоты рабочих импульсов. При уменьшении подачи электрода-инструмента частота рабочих импульсов снижается, что приводит к уменьшению амплитуды регистрируемых акустических сигналов. Аналогичное снижение амплитуды наблюдается при окончании разрезания заготовки и выходе электрода-инструмента. В этот момент происходит срезание заусенца, оставшегося после отделения отрезанной части заготовки.

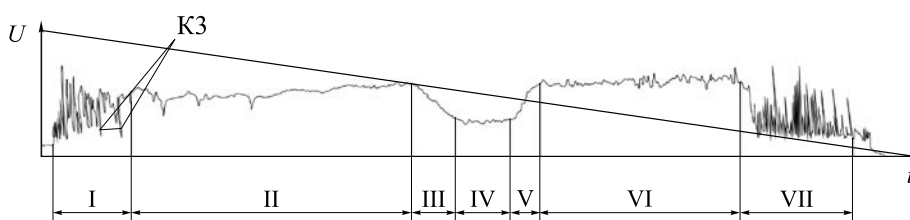


Рис. 2. Регистрация амплитуды акустических сигналов при обработке заготовок на вырезном электроэрозионном станке А207-87:

I — врезание; II — прорезание паза; III — уменьшение скорости подачи электрода-инструмента; IV — прорезание паза с уменьшенной скоростью подачи электрода-инструмента; V — увеличение скорости подачи электрода-инструмента; VI — прорезание паза; VII — срезание заусенца на выходе электрода-инструмента; КЗ — короткое замыкание

Экспериментальные исследования показали, что метод акустической диагностики позволяет осуществлять диагностику процесса ЭЭО в целях повышения ее производительности.

Заключение. В соответствии с моделью электрической эрозии выделены и рассмотрены пять источников акустических волн, действующих при ЭЭО: 1) реактивное давление паров и мелких капель, выбрасываемых с поверхности обрабатываемого материала; 2) ударная волна; 3) тепловой удар (нестационарные термоупругие напряжения); 4) структурно-фазовые превращения обрабатываемого материала; 5) возникновение и развитие микротрещин. Вследствие их совокупного действия на поверхности материала в точках приложения электрических разрядов возникают упругие волны. Можно считать, что все источники акустических волн действуют одновременно, а их совокупность является волновой реакцией материала на электрический импульс. Выделение при диагностировании процесса ЭЭО каждого источника не представляется возможным, так как они взаимосвязаны и протекают одновременно, поэтому целесообразно регистрировать их суммарное действие.

Качественная оценка перечисленных выше составляющих упругих волн показала, что все они являются функцией силы тока разряда

(энергии импульса), длительности импульса и физических свойств обрабатываемого материала.

При обработке акустических сигналов целесообразно использовать методы, позволяющие оценить их энергоемкость, например метод, основанный на измерении среднего квадратичного значения амплитуды сигнала.

Показано, что амплитуда акустических сигналов при ЭЭО пропорциональна частоте рабочих импульсов (коэффициенту использования импульсов) и их энергии, а следовательно, производительности процесса ЭЭО. Таким образом, методом акустической диагностики можно диагностировать процесс ЭЭО в реальном времени и тем самым повысить эффективность управления этим процессом и его производительность.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Грешников В.А., Дробот Ю.В. *Акустическая эмиссия. Применение для испытаний материалов и изделий*. Москва, Изд-во стандартов, 1976, 276 с.
- [2] Авдеенко А.М. Акустическая эмиссия и предсказание условий макроразрушения сплошных сред. *Физическая мезомеханика*, 2014, т. 17, № 1, с. 83–88.
- [3] Мозговой Н.И., Мозговая Я.Г., Пашкова Е.А. Применение акустического метода контроля для деталей из композиционных материалов. *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*, 2015, № 3 (68), с. 42–48.
- [4] Тютин М.Р., Ботвина Л.Р., Левин В.П., Ефимов Г.А., Кузелев Н.Р. Исследование механических свойств конструкционных сталей акустическими и магнитными методами. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*, 2017, т. 83, № 7, с. 44–48.
- [5] Хаттон П., Орд Р. *Методы неразрушающих испытаний*. Москва, Мир, 1972.
- [6] Артюхов В.И., Вакар К.Б., Макаров В.И. и др. *Акустическая эмиссия и ее применение для неразрушающего контроля в ядерной энергетике*. Вакар К.Б., ред. Москва, Атомиздат, 1980, 216 с.
- [7] Алешин Н.П., Белый В.Е., Вopilкин А.Х. и др. *Методы акустического контроля металлов*. Алешин Н.П., ред. Москва, Машиностроение, 1989, 456 с.
- [8] Горкунов Э.С., Ефимов А.Г., Шубочкин А.Е. Мировые достижения в магнитном, вихревом и акустико-эмиссионном методах неразрушающего контроля. *Контроль, диагностика*, 2016, № 9, с. 16–26.
- [9] Тверской В.С. К инженерному расчету энергетического спектра акустической эмиссии. *Дефектоскопия*, 1981, № 4, с. 62–67.
- [10] Овчарук В.Н., Чье Ен Ун. Особенности построения систем регистрации и анализа сигналов акустической эмиссии. *Приборы*, 2014, № 1, с. 37–43.
- [11] Ченцов В.П. *Акустическая эмиссия при упругопластическом деформировании конструкционных материалов и опыт ее применения в неразрушающем контроле*. Хабаровск, Томск, Изд-во Томского политехн. ун-та, 2014, 267 с.
- [12] Грешников В.А., Брагинский А.П. Об анализе сигналов акустической эмиссии. *Дефектоскопия*, 1980, № 5, с. 101–106.

- [13] Кайно Г. *Акустические волны. Устройства, визуализация и аналоговая обработка сигналов*. Москва, Мир, 1990, 656 с.
- [14] Muto K., Shiota Y., Futamura S. Study on observation of EDM processing and monitoring of discharging point with acoustic emission. *Proc. of Int. Symp. for Electromachining (ISEM – 9)*. Nagoya, 1989, pp. 301–304.
- [15] Smith C., Koshy P. Applications of acoustic mapping in electrical discharge machining. *CIRP Annals — Manufacturing Technology*, 2013, vol. 62, no. 1, pp. 171–174.
- [16] Козочкин М.П., Порватов А.Н., Хотеев К.Е., Токбергенов М.Ж. Возможности акустического мониторинга процессов электроэрозионной обработки. *Вестник МГТУ «Станкин»*, 2016, № 1 (36), с. 46–52.
- [17] Золотых Б.Н. *Основные вопросы теории электрической эрозии в импульсном разряде в жидкой диэлектрической среде: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук*. Москва, 1968, 52 с.
- [18] Бендат Дж., Пирсол А. *Применение корреляционного и спектрального анализа*. Москва, Мир, 1983, 300 с.
- [19] Inoue K. *Wire-Cut Electrical Discharge Machining*. Tokio, Japan, 1978, 171 p.
- [20] Рассказов Н.Н. *Повышение эффективности механической обработки на основе непрерывного контроля износа и разрушения режущего инструмента методом акустической эмиссии: Автореф. дис. ... канд. техн. наук*. Москва, 1987, 55 с.
- [21] Рассказов Н.Н., Диваев А.В. Исследования повреждения режущего инструмента методом акустической эмиссии. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 1987, № 11, с. 150–153.
- [22] Ставицкий Б.И. *Электроискровая прецизионная обработка материалов. Научные основы особо точных методов формообразования поверхностей. Электронная обработка материалов*, 2002, № 1, с. 5–33.

Статья поступила в редакцию 16.04.2018

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Ставицкий И.Б. Акустическая диагностика процесса электроэрозионной обработки материалов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2018, вып. 8. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-8-1793>

Ставицкий Иван Борисович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Инструментальная техника и технологии» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 20 научных работ в области электрофизических методов обработки материалов.
e-mail: vats59@mail.ru

Acoustic diagnostics in the process of electrical discharge machining

© I.B. Stavitskiy

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The paper presents theoretical and experimental investigation results concerning acoustic waves generated during electrical discharge machining; we determine and study their sources. We establish that all sources are a function of the discharge current (pulse energy), electric current pulse duration and physical properties of the material being machined. We show that the amplitude of acoustic signals generated during electrical discharge machining is proportional to the working pulse frequency and energy, as well as linked to the output parameters of the machining process. Electrical discharge machining performance may be considered an informative parameter suitable for real-time process diagnostics in order to improve process quality and control efficiency.

Keywords: *electrical discharge machining, acoustic waves, electrical discharge pulse parameters, acoustic signal amplitude, electrical discharge process diagnostics, electrical discharge process control*

REFERENCES

- [1] Greshnikov V.A., Drobot Yu.V. *Akusticheskaya emissiya. Primenenie dlya ispytaniy materialov i izdeliy* [Acoustic emission. Use in material and product testing]. Moscow, Standartinform Publ., 1976, 276 p.
- [2] Avdeenko A.M. *Fizicheskaya mezomekhanika — Physical Mesomechanics*, 2014, vol. 17, no. 1, pp. 83–88.
- [3] Mozgovoy N.I., Mozgovaya Ya.G., Pashkova E.A. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) — Metal Working and Material Science*, 2015, no. 3 (68), pp. 42–48.
- [4] Tyutin M.R., Botvina L.R., Levin V.P., Efimov G.A., Kuzelev N.R. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov — Industrial laboratory. Diagnostics of materials*, 2017, vol. 83, no. 7, pp. 44–48.
- [5] Hutton P.H., Ord R.N. Acoustic Emission. *Research Techniques in Nondestructive Testing*. Sharpe R.S., ed. Academic Press, 1970, 492 p. [In Russ.: Hutton P.H., Ord R.N. *Akusticheskaya emissiya. Metody nerazrushayushchikh ispytaniy*. Sharpe R.S., ed. Moscow, Mir Publ., 1972].
- [6] Artyukhov V.I., Vakar K.B., Makarov V.I. et al. *Akusticheskaya emissiya i ee primenenie dlya nerazrushayushchego kontrolya v yadernoy energetike* [Acoustic emission and its use for non-destructive testing in the nuclear power industry]. Vakar K.B., ed. Moscow, Atomizdat Publ., 1980, 216 p.
- [7] Aleshin N.P., Belyy V.E., Vopilkin A.Kh. et al. *Metody akusticheskogo kontrolya metallov* [Methods of acoustic monitoring for metals]. Aleshin N.P., ed. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989, 456 p.
- [8] Gorkunov E.S., Efimov A.G., Shubochkin A.E. *Kontrol, diagnostika — Testing. Diagnostics*, 2016, no. 9, pp. 16–26.
- [9] Tverskoy V.S. *Defektoskopiya — Russian Journal of Nondestructive Testing*, 1981, no. 4, pp. 62–67.
- [10] Ovcharuk V.N., Chye E. U. *Pribory — Instruments*, 2014, no. 1, pp. 37–43.
- [11] Chentsov V.P. *Akusticheskaya emissiya pri uprugoplasticheskom deformirovaniy konstruktsionnykh materialov i opyt ee primeneniya v nerazrushayushchem kontrole*

- [Acoustic emission during elasto-plastic deformation of structural materials and the experience of using it for non-destructive testing]. Khabarovsk, Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ., 2014, 267 p.
- [12] Greshnikov V.A., Braginskiy A.P. *Defektoskopiya — Russian Journal of Nondestructive Testing*, 1980, no. 5, pp. 101–106.
- [13] Kino G.S. *Acoustic waves: devices, imaging, and analog signal processing*. Prentice Hall PTR, 1987, 601 p. [In Russ.: Kino G.S. Akusticheskie volny. Ustroystva, vizualizatsiya i analogovaya obrabotka signalov. Moscow, Mir Publ., 1990, 656 p.].
- [14] Muto K., Shiota Y., Futamura S. Study on observation of EDM processing and monitoring of discharging point with acoustic emission. *Proc. of Int. Symp. for Electro Machining (ISEM – 9)*. Nagoya, 1989, pp. 301–304.
- [15] Smith C., Koshy P. *CIRP Annals — Manufacturing Technology*, 2013, vol. 62, no. 1, pp. 171–174.
- [16] Kozochkin M.P., Porvatov A.N., Khoteenkov K.E., Tokbergenov M.Zh. *Vestnik MGTU “Stankin” — Vestnik «MSTU «STANKIN»*, 2016, no. 1 (36), pp. 46–52.
- [17] Zolotykh B.N. *Osnovnye voprosy teorii elektricheskoy erozii v impulsnom razryade v zhidkoy dielektricheskoy srede*. Avtoref. dis. ... d-ra tekhn. nauk [Main issues of the theory of electric erosion in a pulse discharge in a liquid dielectric medium. Autoref. Dr. Eng. Sc. Diss.]. Moscow, 1968, 52 p.
- [18] Bendat J.S., Piersol A.G. *Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis*. New York, John Wiley and Sons, 1980, 315 p. [In Russ.: Bendat J.S., Piersol A.G. Primeneniya korrelyatsionnogo i spektralnogo analiza. Moscow, Mir Publ., 1983, 300 p.].
- [19] Inoue K. *Wire-Cut Electrical Discharge Machining*. Tokyo, Japan, 1978, 171 p.
- [20] Rasskazov N.N. *Povyshenie effektivnosti mekhanicheskoy obrabotki na osnove nepreryvnogo kontrolya iznosa i razrusheniya rezhushchego instrumenta metodom akusticheskoy emissii*. Avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [Increasing machining efficiency by continuous monitoring of cutting tool wear and failure via acoustic emission. Autoref. Cand. Eng. Sc. Diss.]. Moscow, 1987, 55 p.
- [21] Rasskazov N.N., Divaev A.V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie — Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 1987, no. 11, pp. 150–153.
- [22] Stavitskiy B.I. *Elektronnaya Obrabotka Materialov — Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2002, no. 1, pp. 5–33.

Stavitskiy I.B., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Tooling Equipment and Technologies, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 20 scientific publications in the field of electrophysical machining methods. e-mail: vats59@mail.ru