

Физическая модель процесса объёмной электроэрозионной обработки  
д.т.н. Пулатов Ш.Й., Зокиров Р.С., Хусанов С.Й., Озодова Ш.О.

Ташкентский государственный технический университет, им. Ислама  
Каримова, г. Ташкент, Узбекистан

В этой статье были приведены комплексные способы решения проблем объёмной электроэрозионной обработки. Представлены данные по результатам исследовательских работ ученых ТаиГТУ.

Ключевые слова: электроэрозионной обработки, обратная связь, анод, катод, модель производительности

Электрический разряд в жидкой диэлектрической среде, заполняющей рабочую зону, вызывает ряд явлений на электродах и в жидкости [1]. Первичные явления, или взаимодействия  $V_{31}$ ,  $V_{32}$ ,  $V_{34}$ ,  $V_{35}$  и  $V_{54}$  (рис. 1) изучаются преимущественно теорией электрической эрозии в импульсном разряде, на которой базируются представления об исходных физических явлениях. Вторичные взаимодействия  $S_{47}$ ,  $V_{46}$ ,  $V_{57}$ ,  $V_{14}$ ,  $V_{24}$ ,  $V_{81}$ ,  $V_{82}$  (рис. 2) наряду с первичными составляют предмет собственно теории электроэрозионной обработки (ЭЭО). Хотя вторичные взаимодействия возникают и при единичном разряде, их влияние на исходный разряд существенно меньше, чем на интегральные характеристики процесса обработки.

Переход от воздействия единичного разряда к массовому воздействию носит не только количественный, но и качественный характер. Сильная концентрация разрядов (от сотен до миллионов импульсов в секунду) при наличии после разрядных явлений, время существования которых больше, чем пауза между импульсами, обуславливает зависимость последующих разрядов от предыдущих, тем большую, чем меньше пауза между импульсами или скважность  $q$  (отношение периода к длительности импульса).

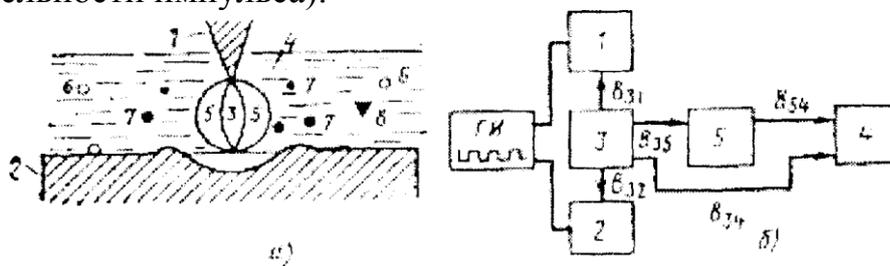


Рис. 1. Схема открытой рабочей зоны (а) и взаимодействия (б) при единичном разряде: 1 и 2 — электроды (1 анод, 2 катод), 3 канал разряда; 4 рабочая среда; 5 газовый пузырь; 6 — пузырек пара или газа; 7 — твердая частица; 8 — продукты пиролиза; ГИ — генератор импульсов

Внимание привлекают именно случаи работы с малым  $q$  так как важной тенденцией, в значительной мере определившей достигнутый за последние десятилетия прогресс в области ЭЭО, является уменьшение скважности

генерируемых импульсов от десятков до значений, близких к единице. Это объясняется тем, что уменьшение скважности при независимом генерировании позволяет увеличивать энергию, вводимую в рабочую зону, и, следовательно, производительность: одновременное со снижением скважности уменьшение отношения амплитуды импульса к его длительности позволяет также резко снизить износ анода- инструмента.

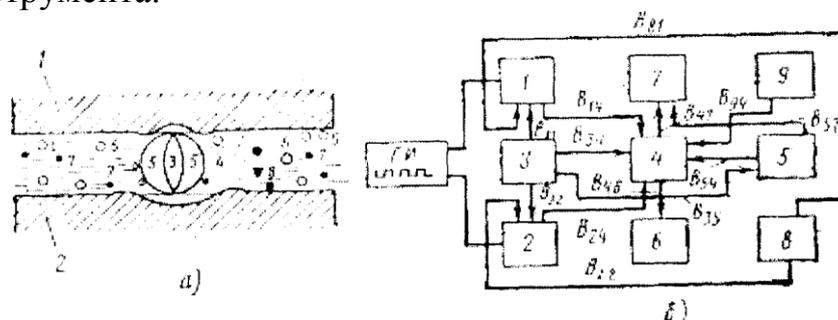


Рис. 2. Схема ограниченной рабочей зоны (а) и взаимодействия (б) при массовом воздействии разрядов с малой скважностью: 9 принудительная прокачка рабочей среды (насос); остальные обозначения те же, что на рис.1

Таким образом, становится ясной необходимость создания физической модели реального процесса объемной ЭЭО<sup>1</sup> характеризуемого массовым воздействием разрядов и осуществляемую именно при малой скважности импульсов. На основе такой модели возможно осуществление оптимального управления электрическим и гидромеханическим режимами, поскольку при уменьшении  $q$  и увеличении частоты импульсов снижается устойчивость процесса и возрастают требования к качеству работы всех систем станка. Эта модель необходима также для расчета технологических характеристик и режима обработки в зависимости от геометрических параметров изделия.

Для большей наглядности процессы, происходящие при объемной ЭЭО, целесообразно разделить на три группы, которым соответствуют три взаимосвязанные частные физические модели, условно названные «модель производительности», «модель стойкости» и «модель управления». Две первые, модели описывают соответственно процессы на электроде-заготовке и электроде-инструменте (ЭИ). последняя — управление этими процессами и их оптимизацию.

**Модель производительности.** Исходный элементарный процесс включает в себя взаимодействия  $V_{31}$  и  $V_{52}$ . Количество вынесенного из лунки металла определяется энергией, формой и другими параметрами импульса, а также теплофизическими характеристиками электродов и среды [2,3,4]. Этот элементарный процесс весьма сложен и состоит из двух частично совмещенных во времени и взаимосвязанных этапов: расплавления металла и его эвакуации из лунки путем испарения и выброса в виде капель. Точных аналитических методов расчета этого процесса нет; имеющиеся формулы и критерии позволяют только получить оценочные результаты и установить характер влияния тех или иных параметров.

Очевидно, что весь объем металла, поступающего в рабочую зону из лунок в единицу времени, должен быть из нее удален; в противном случае рабочая зона заполнится отходами и процесс обработки прекратится. Следовательно, в процессе

обработки должны действовать некоторые силы, обеспечивающие необходимую для устойчивой работы скорость эвакуации.

Исходя из этих общих соображений, можно представить следующую общую структурную схему процесса ЭЭО (рис. 3). Энергия  $W_s$ , вводимая в зону обработки, расходуется на «производство» частиц со скоростью  $M_n$  и на эвакуацию продуктов эрозии со скоростью  $M_э$ . Соотношение между  $M_n$  и  $M_э$  определяет результирующую производительность  $M_p$ , т.е. количество частиц, удаленных в единицу времени из зоны обработки: если  $M_n < M_э$ , то  $M_p = M_n$ ; если  $M_n > M_э$  то  $M_p \leq M_э$ . Это означает, что результирующая производительность не может превышать наименьшее из значений  $M_n$  и  $M_э$ .

Подобные соотношения [несмотря на различные физические механизмы «производства» и эвакуации отходов (стружки)] имеют место и при обработке резанием, однако они начинают проявляться только при ограниченной рабочей зоне (например, при глубоком сверлении и т. п.). Практически во всех случаях формообразования методом объемной ЭЭО рабочая зона ограничена и почти всегда  $M_э < M_n$ , а  $M_n > M_p$ .

Производство и эвакуация охвачены двумя внутренними отрицательными обратными связями  $ОСД$  и  $ОСГ$ , каждая из которых по-своему регулирует соотношение между  $M_n$  и  $M_э$ .  $ОСД$  проявляется, когда  $M_э$  падает из-за роста сопротивления на трассе эвакуации [например, вследствие увеличения площади и глубины обработки, уменьшения межэлектродного зазора (МЭЗ) и т. п.]. При этом в рабочей зоне, в первую очередь, в так называемых застойных областях накапливаются неэвакуированные частицы и местный МЭЗ уменьшается, вследствие чего в таких областях возбуждается наибольшее число разрядов.

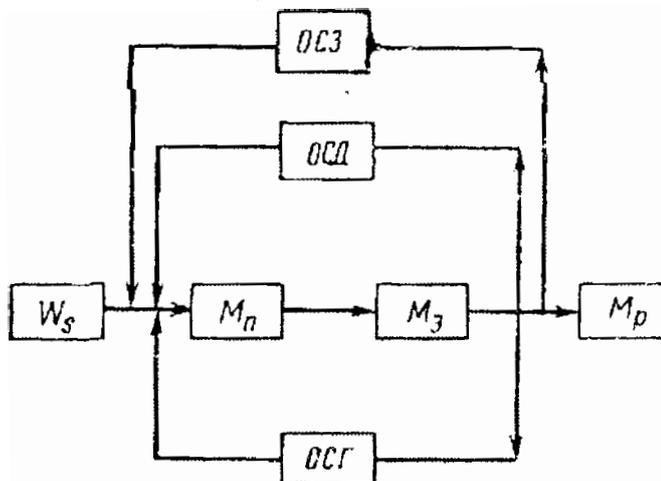


Рис. 3. Структурная схема модели производительности:  $W_s$  введенная энергия;  $M_n$  - скорость «производства» частиц;  $M_э$  скорость эвакуации;  $M_p$  — результирующая скорость съема;  $ОСД$  — внутренняя обратная связь через повторно диспергируемые частицы;  $ОСГ$  — внутренняя обратная связь через фиктивные импульсы в газовой среде;  $ОСЗ$  — внешняя обратная связь через межэлектродный зазор

Это приводит к повторному диспергированию частиц, которые затем удаляются с большей скоростью. Одновременно сокращается производство новых частиц, так как часть энергии расходуется на повторное плавление и испарение металла.

Равновесие между  $M_{п}$  и  $M_{э}$  устанавливается при их новых, сниженных значениях; соответственно уменьшается и  $M_{р}$ .

Обратная связь  $ОСГ$  влияет на  $M_{п}$  и  $M_{э}$  через изменение соотношения между жидкой и парогазовой фазами в рабочей зоне. Например, при уменьшении (по отношению к оптимальному значению) площади или глубины обработки при неизменном токе (т. е. при определенном температурном режиме) растет объем рабочей зоны, занятый парогазовой фазой; соответственно растет вероятность возбуждения разряда. Однако такие разряды (называемые фиктивными) практически не производят новых частиц, т. е.  $M_{п}$  падает, и система приходит в устойчивое состояние при сниженных значениях  $M_{п}$ ,  $M_{э}$ , и  $M_{р}$ .

При уменьшении МЭЗ газопаровые пузырьки сплющиваются и занимают большую площадь; поэтому  $ОСГ$  действует в том же направлении, что и  $ОСД$ , а именно, снижает значение  $M_{я}$ , приводя его в соответствие со значением  $M_{я}$  при уменьшении МЭЗ. Таким образом,  $ОСД$  проявляется при увеличении (по сравнению с оптимальными для данного режима) площади или глубины обработки, а  $ОСГ$  - при их уменьшении. При уменьшении зазора обе обратные связи действуют согласованно.

Эвакуация продуктов эрозии определяется движением жидкости в рабочей зоне, которое обусловлено разрядом (естественная эвакуация) или совместным действием разряда и внешней специальной источника — насоса, осуществляющего прокачку рабочей жидкости через межэлектродный промежуток (МЭП) (искусственная эвакуация).

При естественной эвакуации движение жидкости возникает в результате действия следующих факторов: 1) ударной волны при первоначальном расширении канала разряда [9]; 2) последующего расширения газового пузыря [3]; 3) образования паровых пузырьков на нагретых частях электродов и в жидкости (при пролете горячих частиц) [8]. Учитывая малую сжимаемость жидкости, обычно полагают, что объем вытесненной из полости жидкости равен объему газового пузыря. Последний действует, как поршень, перемещая в МЭП жидкость, создавая в ней конвективные течения, а также способствуя обновлению ее состава и увеличению количества взвешенных частиц.

Паровые пузырьки образуются при соприкосновении жидкости с участками электродов, где температура  $100^{\circ}\text{C} < \theta < 400^{\circ}\text{C}$  (низкотемпературная зона), и наличии циркуляции жидкости. При перемещении этих участков по поверхности электродов (в соответствии с изменением температурного поля последних) образуются гнезда пузырьков пара, причем летящие в жидкости частицы оставляют паровой след. Более 90% площади обработки имеет  $\theta < 400^{\circ}\text{C}$ .

Частицы выносятся из рабочей зоны движущимся потоком жидкости; они могут также захватываться стенкой расширяющегося газового пузыря либо движущегося парового пузырька. Скорость эвакуации продуктов эрозии из рабочей зоны зависит от скорости потока жидкости в зазоре и степени  $\varepsilon$  захвата частицы потоком:  $\varepsilon = v/u$ , где  $v$  - скорость частицы;  $u$  - скорость потока относительно поверхности электрода. Если  $v = u$ , то  $\varepsilon = 1$ . т. е. степень захвата и скорость движения частицы максимальны. Очевидно, что для газовых пузырьков и взвешенных частиц  $v = u$ , то  $\varepsilon = 1$ . В самом общем виде скорость эвакуации можно представить как произведение двух функций:  $M_{э} = Kf_1(u) f_2(\varepsilon)$ . Это выражение позволяет произвести качественный

анализ влияния различных факторов на эвакуацию продуктов эрозии из МЭП [9] и установить условия возникновения экстремальных состояний.

На сферическую частицу радиусом  $r$ , находящуюся в потоке жидкости с плотностью  $\rho$  и кинематической вязкостью  $\nu$ , движущемся со скоростью  $v$ , действуют силы, обусловленные давлением потока на частицу, подъемная архимедова сила и др. При некотором критическом значении скорости потока  $u_{кр}$  эвакуируемая частица «зависнет» в движущемся потоке, т. е. ее вес будет компенсирован действующими силами. Для частицы из стали при обработке в керосине  $u_{кр} \approx 150 \sqrt{r/C}$ , где  $C$  - коэффициент сопротивления для шара (при  $10^2 < Re < 10^6$   $0,1 < C < 1,0$ ). Эти данные полезны при выборе величины расхода жидкости.

Частица может перемещаться также и в том случае, когда на нее набегают стенка расширяющегося газового пузыря. Если жидкость хорошо смачивает частицу, то граница раздела между жидкостью и газом оказывается непроницаемой для частицы, скорость которой относительно стенки газового пузыря невелика. Захват частицы происходит, если энергия, необходимая для деформации стенки пузыря, больше, чем кинетическая энергия частицы в момент ее встречи со стенкой. При соблюдении этого условия на внешней стороне стенок пузыря оказываются собранными твердые продукты эрозии. По-видимому, захват частиц стенкой пузыря, особенно значительно проявляющийся на заключительной стадии его расширения, влияет на локализацию последующего разряда.

Весьма вероятен в ряде случаев механизм удаления мелких частиц нулем флотации посредством паровых и газовых пузырьков. При естественной эвакуации один и тот же источник энергии — электрический разряд — определяет движение потока, а также количество и размеры частиц, которые должны быть эвакуированы. Если энергия импульса увеличивается, то возрастают число частиц большего размера и максимальный диаметр частицы. Поскольку увеличение энергии приводит также к повышению скорости потока жидкости, то малые частицы уносятся потоком с большей скоростью, чем при импульсах меньшей энергии. Следовательно, число крупных частиц в зазоре относительно возрастает.

Перевод электроэрозионных станков на адаптивное и программное управление позволяет перейти к многостаночному обслуживанию и централизованному управлению участками таких станков.

#### Библиографический список

1. Лившиц А. Л. Механизм процесса электроэрозионной обработки металлов — «Станки и инструмент», 1967. № 9.
2. Гуткин Б. Г. О роли джоулева тепла при электроискровой обработке металлов. Доклад на 1-й Всесоюзной конференции по электрической обработке металлов. Л., ЛОНТОМашпром, 1947.
3. Золотых Б. Н. Физические основы электроискровой обработки металлов. М., ГИТТЛ, 1953.
4. Зингерман А. С. Физические основы технологии электроэрозионной обработки металлов. — В кн.: Новые методы электрической обработки металлов. М., Мапниз, 1956.