

В. И. Осипенко, Д. О. Ступак, С. В. Поздеев

Академия пожарной безопасности им. героев Чернобыля, Черкассы

ПРОБОЙ ЖИДКОСТИ СЕРИЕЙ ИСКРОВЫХ РАЗРЯДОВ ПРИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОМ ВЫРЕЗАНИИ

Рассмотрен процесс пробоя межэлектродного промежутка при электроэрозионном вырезании. Определены основные факторы, влияющие на величину напряжения пробоя межэлектродного промежутка. Проведены исследования по определению зависимости величины напряжения пробоя межэлектродного промежутка серией импульсов от рассмотренных факторов.

Ключевые слова: электроэрозионная обработка, межэлектродный промежуток, проволочный электрод, математическая модель, напряжение

Введение

В процессе исследования электрической эрозии при электроэрозионной вырезной обработке (ЭЭВО) уделено мало внимания изучению процессов, связанных с пробоем рабочей жидкости, как правило, дистиллированной или технической воды. В большинстве известных исследований [1-8] основное внимание уделено процессам, которые происходят в жидкости и на электродах после образования канала разряда. Хотя именно исследования непосредственно процесса пробоя и определяющих его параметров при ЭЭВО крайне важны как с точки зрения повышения производительности и точности обработки, так и обоснования научных рекомендаций, необходимых при разработке и модернизации генераторов, регуляторов межэлектродного промежутка (МЭП) и алгоритмов их работы.

При ЭЭВО специфическими факторами, влияющими на процесс образования и развития пробоя, могут быть: геометрические размеры МЭП, амплитудное значение напряжения генератора, геометрия и шероховатость взаимодействующих поверхностей электродов, электропроводность и степень загрязнения рабочей жидкости продуктами эрозии электродов, давление и скорость принудительной прокачки рабочей жидкости непосредственно в зоне образования пробоя, локальное изменение электрической прочности МЭП под воздействие предыдущих разрядов.

Исходя из этого, была поставлена задача экспериментально исследовать влияние данных факторов и их комбинаций на процессы образования канала разряда при действии серии искровых разрядов. Исследовали специально разработанный стенд, конструкция которого приведена в работе [9]. Опыты проводились с использованием модифицированного генератора технологического тока МГКИ 1, обеспечивающего крутизну переднего фронта напряжения до 800 В за 0,5 мкс, тем самым гарантированно обеспечивая пробой промежутка при любом возможном для ЭЭВО состоянии МЭП.

Основная часть

Для проведения комплекса экспериментальных исследований была изготовлена партия пар электродов, у которых поверхность анода была выполнена плоской, катода – сферической с радиусом 0,25 мм. Взаимодействующие поверхности электродов были изготовлены с контролируемой шероховатостью от $R_a 0,2$ до $R_a 4,5$, что соответствует всем возможным параметрам шероховатости, которые возможны при ЭЭВО (от суперфинишных до черновых режимов обработки), причем поверхность анода предварительно была изготовлена на электроэрозионном вырезном станке, а поверхность катода была получена методами оптикокоординатного шлифования.

Используемые методики позволили определить влияние на пробивные характеристики рабочей жидкости как минимального геометрического расстояния между взаимодействующими поверхностями электродов, так и шероховатости данных поверхностей. В качестве рабочей жидкости использовали дистиллированную воду с удельным сопротивлением 60 кОм · см (электропроводность -16 S). Результаты исследований приведены в табл. 1 и на рис. 1, 2.

Известно, что специфической особенностью любого процесса электроэрозионной обработки является загрязнение МЭП продуктами эрозии электродов, испарения и пиролиза рабочей жидкости. Исходя из того, что вода при разложении практически не образует каких бы то ни было твердых частиц, основу загрязнения МЭП составляют продукты эрозии электродов и газопаровая смесь, состоящая из продуктов испарения и пиролиза воды. В связи с этим при исследовании влияния загрязнений на пробойные характеристики МЭП использовали осадок, полученный при обработке стали 45 латунным проволочным электродом-инструментом (ПЭИ). Наличие в МЭП газопаровых пузырьков имитировали с помощью предварительного насыщения воды воздушными пузырьками. Рабочая жидкость насыщается газовыми пузырьками при прокачивании ее через прямую пористую

Таблица 1

Значение величин напряжения пробоя МЭП в зависимости от степени загрязненности рабочей жидкости продуктами эрозии (дистиллированная вода с удельным сопротивлением 60 кОм·см, шероховатость поверхности электродов $R_a = 3,5$ мкм)

Степень загрязненности рабочей жидкости, $C_3, \%$	Геометрический размер МЭП, $l_{\text{МЭП}}, \text{мкм}$						
	10	15	20	25	30	40	50
	напряжение пробоя МЭП, В						
Вода без загрязнений	66	102	131	170	185	250	303
Вода + 0,08 % продуктов эрозии	62	96	104	164	190	255	310
Вода + 0,56 % продуктов эрозии	45	71	88	172	180	230	320
Вода + 1,6 % продуктов эрозии	47	73	90	175	192	225	296

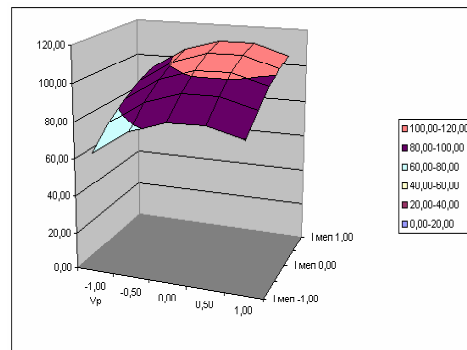
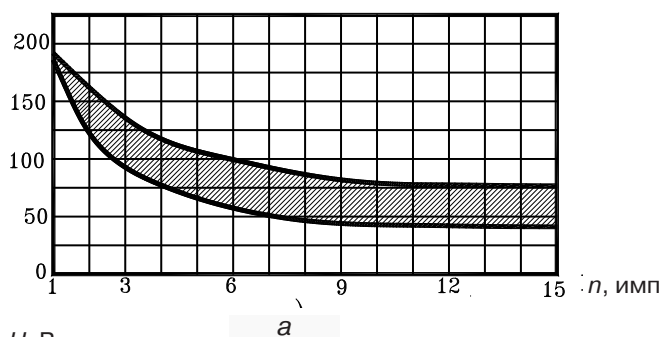


Рис. 2. Зависимость напряжения пробоя от двух наиболее весомых факторов - геометрической величины промежутка и скорости протекания рабочей жидкости в МЭП

ного осадка на пробивные характеристики рабочей жидкости приведены в табл. 1.

U, В



U, В

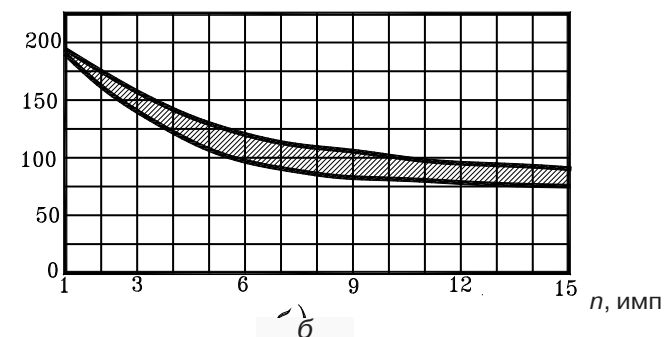


Рис. 1. Параметры разброса напряжения пробоя промежутка $l_{\text{МЭП}} = 30$ мкм, начальная шероховатость поверхности электродов $R_a = 3,5$ мкм при использовании серии из 15-ти последовательных импульсов частотой 88 кГц (заштрихованные зоны): а – без принудительного прокачивания рабочей жидкости через МЭП; б – при принудительном прокачивании рабочей жидкости через МЭП, $V_x = 6$ м/с

трубку. Диаметр пор трубки (22 мкм) и режимы прокачивания подбирали так, чтобы варьировать объемную концентрацию от 1 до 3 %, а размеры пузырьков составляли 5-15 мкм. В исследованной области смены концентраций газовых пузырьков и величин МЭП (то есть при отсутствии полного перекрытия промежутка газовым пузырем) полученные результаты не показали влияние наличия воздушных пузырьков на пробивные характеристики жидкости.

Расчет возможных концентраций продуктов эрозии в МЭП проводили, исходя из смены скоростей поперечного обтекания проволоки от 0,1 до 6 м/с. Данные о влиянии концентрации дан-

В исследованной области изменения величин МЭП и концентрации осадка пробивные напряженности электрического поля заметно снижаются при увеличении концентрации осадка до 0,56 % при геометрических размерах МЭП 10-20 мкм. При относительно больших МЭП (> 20 мкм) влияние увеличения концентрации продуктов эрозии на пробивные характеристики жидкости незначительно. При этом следует отметить, что наличие осадка значительно увеличивает вероятность так называемых пробоев “по примеси”, электрические и энергетические параметры которых значительно отличаются от пробоя чистой рабочей жидкости (уменьшается энерговыделение на электродах за счет потерь на разрушение примеси и наличие дополнительных низкоомных контактов).

С точки зрения стабильности напряжения пробоя при непрерывной подаче импульсов на промежуток (то есть при реальной ЭЭВО) наибольшее влияние на пробивные характеристики жидкости оказывают предыдущие разряды, поскольку многими исследователями установлено [8, 10, 11], что возникновение следующего разряда наиболее вероятно вблизи участка, поврежденного предыдущим разрядом, из-за наличия обрамляющих валиков, повышенной температуры в зонах остывающих эрозионных лунок и высокой локальной концентрации свободных носителей заряда. При этом следует ожидать, что давление и скорость течения рабочей жидкости должны иметь определенное воздействие на условия формирования пробоя промежутка.

Исследования влияния предыдущих разрядов на условия возникновения пробоя жидкости показали как резкое уменьшение средних напряжений пробоя (в 2,5-3,5 раза), так и существенное увеличение нестабильности процесса. Если разброс напряжений пробоя первого импульса по известным условиям в МЭП практически не выходил за пределы ± 7 %, последующие импульсы отличались уже резким увеличением разброса напряжений пробоя от 10 до 40 % [9].

Исходя из анализа результатов исследования влияния предыдущих разрядов на пробивную прочность среды, серию разрядов ограничили 15-ю импульсами, так как при незначительной площади взаимодействующих поверхностей электродов при таком количестве разрядов в МЭП устанавливалось определенное квазистационарное состояние без аномальных явлений, которые могут возникнуть в зоне пробоя из-за большой локальной концентрации продуктов эрозии и газопаровой смеси. Результаты экспериментов приведены в табл. 2 и на рис. 1. При этом в таблицах приведены средние значения напряжений пробоя 15-го импульса каждой серии. Величина давления рабочей жидкости в МЭП также практически не влияет на условия возникновения разряда после серии предыдущих разрядов.

С повышением скорости течения рабочей жидкости от 0 до 3 м/с выявили повышение напряжения пробоя после серии предыдущих разрядов на 20-30 %. Дальнейший рост скорости течения рабочей жидкости до 6 м/с не влияет существенно на пробивную прочность среды. При этом следует отметить, что с повышением скорости течения рабочей жидкости в МЭП на 20-50 % уменьшается разброс напряжений пробоя, то есть наблюдается стабилизация диэлектрической прочности среды. Если шероховатость взаимодействующих поверхностей электродов (до $R_a = 3,5$ мкм) оказывает существенное влияние на величину напряжения пробоя первого импульса, то после прохождения серии импульсов данное влияние практически нивелируется, то есть напряженность электрического поля определяется уже геометрией поверхности, образованной предыдущими разрядами.

Для оценки весомости влияния исследованных факторов и их комбинации на процессы образования канала разрядов воспользуемся методами математического планирования эксперимента.

На основании анализа результатов комплекса проведенных исследований были отобраны четыре фактора, которые наиболее существенно влияют на начальную стадию искрового разряда (величина межэлектродного промежутка (X_1), мкм; шероховатость взаимодействующих поверхностей электродов (X_2), мкм; загрязненность промежутка продуктами эрозии (X_3), %; скорость протекания рабочей жидкости в МЭП (X_4), м/с). В общем случае зависимость напряжения пробоя от условий в межэлектродном промежутке можно представить в виде полиномиальной математической модели типа

$$Y = b_0 + \sum_i b_i X_i + \sum_i b_{ii} X_i^2 + \sum_{i,j} b_{ij} X_i X_j, \quad (1)$$

где b_0 – свободный коэффициент; b_i – коэффициенты от линейных влияний факторов; b_{ii} – коэффициенты от квадратичных влияний факторов; b_{ij} – коэффициенты от комплексного действия двух факторов.

Значения факторов на основном, верхнем и нижнем уровнях, а также интервалы варьирования приведены в табл. 3.

Для перехода от реальных координат к абстрактным применим преобразования

$$\begin{aligned} x_1 &= \log_2 0,1(X_1 - 1); x_2 = \frac{1}{1,6}(X_2 - 1,4); \\ x_3 &= 21(X_3 - 0,08); x_4 = \frac{1}{2}(X_4 - 3). \end{aligned} \quad (2)$$

Таблица 2

Значения величин напряжения пробоя МЭП с учетом предыдущих разрядов (дистиллированная вода с удельным сопротивлением 60 кОм · см)

Условия возникновения пробоя	Геометрический размер МЭП, $l_{\text{МЭП}}$, мкм			
	20	30	40	50
	напряжение пробоя МЭП, В			
Шероховатость поверхности электродов $R_a = 3,5$ мкм				
Без принудительного прокачивания рабочей жидкости, $P_n = 0$ Па	54	65	76	89
Без принудительного прокачивания рабочей жидкости, $P_n = 5 \cdot 10^5$ Па	58	64	73	91
Прокачивание жидкости с $V_{\text{ж}} = 1$ м/с, $P_n = 4,3 \cdot 10^5$ Па	64	73	84	97
Прокачивание жидкости с $V_{\text{ж}} = 3$ м/с, $P_n = 3,4 \cdot 10^5$ Па	73	81	89	103
Прокачивание жидкости с $V_{\text{ж}} = 6$ м/с, $P_n = 2,5 \cdot 10^5$ Па	75	80	91	105
Шероховатость поверхности электродов $R_a = 0,2$ мкм				
Без принудительного прокачивания рабочей жидкости, $P_n = 0$ Па	59	66	77	91
Без принудительного прокачивания рабочей жидкости, $P_n = 5 \cdot 10^5$ Па	54	67	78	93
Прокачивание жидкости с $V_{\text{ж}} = 1$ м/с, $P_n = 4,3 \cdot 10^5$ Па	68	72	85	97
Прокачивание жидкости с $V_{\text{ж}} = 3$ м/с, $P_n = 3,4 \cdot 10^5$ Па	76	83	88	104
Прокачивание жидкости с $V_{\text{ж}} = 6$ м/с, $P_n = 2,5 \cdot 10^5$ Па	79	85	93	109

Таблица 3 Начальная шероховатость взаимодействующих поверхностей электродов

Факторы, их верхний, нижний и нулевой уровни

Фактор		$I_{\text{мэп}}, \text{мкМ}$	$R_a, \text{мкМ}$	$C_3, \%$	$V_{\text{ж}}, \text{м/с}$
		X_1	X_2	X_3	X_4
Основной уровень	$X_i = 0$	20,00	1,60	0,08	3,00
Нижний уровень	$X_i = -1$	10,00	0,20	0,00	0,00
Верхний уровень	$X_i = 1$	40,00	3,20	0,56	6,00

В результате получили экспериментальную статистическую зависимость напряжения пробоя МЭП после серии предыдущих разрядов от выбранных факторов процесса

$$Y = 102,05 + 13,28 \cdot x_1 + 0,11 \cdot x_2 - 2,22 \cdot x_3 + 6,78 \cdot x_4 - 4,56 \cdot x_1^2 + 4,06 \cdot x_2^2 - 8,06 \cdot x_3^2 - 12,06 \cdot x_4^2 + 2,38 \cdot x_1 \cdot x_2 + 2,50 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0,63 \cdot x_1 \cdot x_4 + 2,88 \cdot x_2 \cdot x_3 - 1,00 \cdot x_2 \cdot x_4 - 0,88 \cdot x_3 \cdot x_4.$$

Наибольшее влияние на напряжение пробоя имеют геометрическая величина промежутка и скорость протекания рабочей жидкости в МЭП.

практически теряет влияние на напряжение пробоя МЭП.

Исходя из результатов данной работы можно сделать следующие выводы.

- Доказано, что для серии импульсов на величину напряжения пробоя межэлектродного промежутка существенно влияют величина МЭП и скорость протекания рабочей жидкости. Шероховатость поверхности электродов и степень загрязненности МЭП имеют незначительное влияние на пробой промежутка.
- Выявлено, что в отличие от пробоя единичным искровым разрядом существует значительный разброс значений напряжений пробоя межэлектродного промежутка, связанный с нестабильностью диэлектрической прочности МЭП.
- Построена статистическая модель, получена экспериментальная статистическая зависимость величины напряжения пробоя межэлектродного промежутка от величины межэлектродного промежутка, шероховатости поверхностей, загрязненности МЭП и скорости протекания рабочей жидкости в МЭП.



ЛИТЕРАТУРА

1. Золотых Б. Н. Физические основы электрофизических и электрохимических методов обработки. – М.: МВИССО РСФСР, 1975. – 104 с.
2. Золотых Б. Н., Мельдер Р. Р. Физические основы электроэрозионной обработки. – М.: Машиностроение, 1977. – 41 с.
3. Золотых Б. Н., Поставногов В. Х., Батьков А. А. Электроэрозионная обработка – основа создания уникальных деталей летательных аппаратов // Электронная обработка материалов. – 2000. – № 5. – С. 4–16.
4. Коренблюм М. В., Полуянов В. С. Автоматизированные электроэрозионные станки // Итоги науки и техники. ВИНТИ. Сер. Резание металлов. Станки и инструменты. – 2000. – № 11. – 140 с.
5. Ставицкий Б. И., Безрук А. И. Влияние величины межэлектродного промежутка на эффект эрозии и распределение энергии между катодом и анодом // Электронная обработка материалов. – 1969. – № 5. – С. 7–14.
6. Ставицкий Б. И. Условия, обеспечивающие электроискровое прецизионное изготовление деталей в обычной воде // Там же. – 2002. – № 2. – С. 5–11.
7. Золотых Б. Н., Трофимова Н. Б. Экспериментальное исследование пробоя жидкостей в условиях электроискровой обработки // Там же. – 1969. – № 4. – С. 33–36.
8. Поляков С. П., Осипенко В. И., Калейников Г. Е. Основы электроэрозионной обработки (I стадия) // Вісник Черкаського державного-технологічного університету. – 2005. – № 2. – С. 103–108.
9. Ступак Д. О., Поздєєв С. В., Осипенко В. І. Фізико-технологічні закономірності пробоя рідини та балансу енергії одиничного іскрового розряду // Вісник НТУУ «Київський політехнічний інститут». Сер. Машинобудування. – Киев: НТУУ «КПІ», 2009. – С. 273–279.
10. Коренблюм М. В. О связи величины шероховатости поверхности с длительностью и амплитудой импульсов разрядного тока при электроэрозионной обработке // Физика и химия обработки материалов. – 1972. – № 4. – С. 135–138.
11. Отто М. Ш., Шестеркин В. А. К вопросу о расчете эрозионной стойкости электродов–инструментов при электроэрозионной обработке // Электронная обработка материалов. – 1986. – № 6. – С. 18–20.

ОСИПЕНКО В. І., СТУПАК Д. О., ПОЗДЄЄВ С. В. Пробій рідини серією іскрових розрядів при електроерозійному вирізання

Розглянуто процес пробоя міжелектродного проміжку при електроерозійній обробці. Встановлено основні фактори, що впливають на величину напруги пробоя міжелектродного проміжку. Проведено дослідження по встановленню залежності величини напруги пробоя серією імпульсів від розглянутих факторів.

Ключові слова: електроерозійна обробка, міжелектродний проміжок, дротяний електрод, математична модель, напруга.

OSYPENKO V., STUPAK D., POZDEEV S. Break-down of liquid by a number of impulses in wire electrodischarge machining

This article is devoted to the process of break-down of interelectrode distance during the electrodischarge machining (EDM) cutting. Principle factors, which influence the break-down voltage quantity of interelectrode distance, are analyzed. The researches devoted to the describing of dependence of the break-down voltage quantity by a number of impulses of analysed factors are conducted.

Keywords: wire electrodischarge machining, interelectrode distance, wire electrode, mathematical model, voltage.

УДК 53.092+519

А. А. Мочалов, К. Д. Евфимко, А. А. Гайша

Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, Николаев

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПАРАМЕТРОВ ПОТЕНЦИАЛА МОРЗЕ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ И ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ МЕТАЛЛОВ

Исследовано влияние высокого давления на физические свойства металла, предложена методика расчета коэффициента при экспоненте потенциала Морзе, изучена зависимость данного коэффициента от внешнего давления с учетом физических свойств металла при его всестороннем адиабатическом сжатии.

Ключевые слова: коэффициент при экспоненте потенциала Морзе, деформация, адиабатическое сжатие, математическая модель.

В настоящее время используются технологии обработки металлов высокими давлениями при высоких температурах в термостатах и газостатах, что позволяет улучшить или изменить структуру и физические свойства данного материала. В свою очередь, физические свойства металлов существенно зависят от потенциала взаимодействия атомов между собой. Поэтому для создания новых материалов необходимо знать, как термодинамические параметры влияют на изменение потенциала Морзе. В существующих работах [3] предложены методики расчета основных физических свойств и термодинамических параметров веществ, допускающие, что коэффициент при экспоненте в потенциале Морзе, описывающий взаимодействие атомов металла, не зависит от степени сжатия вещества и является константой. На самом деле эта величина зависит от температуры и давления. Учитывая, что потенциал Морзе используется для определения свойств упругих материалов, необходимо знать, как изменяется коэффициент при экспоненте с изменением давления и температуры.

В данной работе поставлена задача исследовать влияние изменения давления и температуры на постоянную α в потенциале Морзе.

Потенциал Морзе имеет вид [1]

$$U = w((1 - e^{-\alpha\delta})^2 - 1), \quad (1)$$

где w – удельная энергия диссоциации (энергия разрыва связей) для данного материала; $\delta = (r - r_0)/r$ – относительное изменение межатомного расстояния; r_0 – межатомное расстояние при p_0, T_0 ; r – межатомное расстояние; α – константа.

Уравнение состояния для твердого тела имеет вид

$$v = v_0(1 + \beta(T - T_0) - k(p - p_0)), \quad (2)$$

где v_0 – удельный объем тела при $p = p_0, T = T_0$; β – коэффициент объемного расширения тела; k – коэффициент объемного сжатия тела; p – текущее давление; T – текущая температура тела.

Изменение относительного межатомного расстояния в потенциале Морзе представим через удельные объемы при соответствующих параметрах давления и температуры. При этом r_0 можно выразить через удельный объем следующим образом:

$$r_0 = \sqrt[3]{\frac{\mu}{N_A}} \sqrt[3]{v_0}. \quad (3)$$

Зависимость текущего значения межатомного расстояния твердого тела от параметров давления и температуры запишется по аналогии