

Микроэрозионная обработка в сильных электрических полях при использовании нанопульсов напряжения и стримерном формировании каналов пробоя

*В. В. Любимов, В. М. Волгин, И. В. Гнидина

Тулский государственный университет,
г. Тула, 300012, Россия, *e-mail: lvv@tsu.tula.ru

Поступила 26.12.2018

После доработки 01.02.2019

Принята к публикации 01.02.2019

Исследован процесс микроэрозионной обработки при электрическом пробое диэлектрических жидкостей. Рассмотрено формирование канала пробоя при использовании нано- и микросекундных импульсов. Приведены варианты неполного и кратковременного пробоя промежутка. Выполнены тепловые расчеты нагрева электродов при нагреве электродов до температур плавления и испарения материалов электродов.

Ключевые слова: электроэрозионная обработка, микрообработка, генератор импульсов, источник питания.

УДК 621.9.048

DOI: 10.5281/zenodo.3369693

ВВЕДЕНИЕ

Электроэрозионная обработка (ЭЭО) является одним из эффективных методов обработки в современном машиностроительном производстве [1–3]. Этот метод обеспечивает возможность получения сложных поверхностей с высокой точностью копирования при обеспечении хорошего качества поверхности [4].

В современном машино- и приборостроении появилась необходимость получения микроэлементов (микроотверстий, микропазов, микрощелей, микрорельефов поверхностей и др.) при обеспечении минимальной дефектности поверхностного слоя [5]. Такие требования обуславливают необходимость сведения к минимуму или устранению основного недостатка метода ЭЭО – износа электрода-инструмента [6].

Износ электрода-инструмента определяется в основном параметрами импульсов напряжения и типом материала [7]. Поэтому возможность снижения износа электрода-инструмента и дефектности поверхностного слоя обрабатываемой детали связана с радикальным уменьшением длительности импульсов напряжения. Такая возможность открывается при осуществлении режима микроэрозионной обработки (МЭЭО) с наносекундными импульсами напряжения [8, 9].

Совершенствование электронной техники открыло перспективу создания транзисторных генераторов требуемой мощности для МЭЭО при длительности импульсов напряжения $t_{имп}$ до нескольких наносекунд [10, 11]. При использовании таких генераторов достигается меньшая производительность процесса по сравнению с процессом ЭЭО, но открывается перспектива

радикального снижения износа электрода-инструмента и повышения качества поверхности заготовки.

АНАЛИЗ МИКРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ

При использовании современных транзисторных генераторов импульсов напряжения, в том числе обеспечивающих формирование наносекундных импульсов напряжения, возможны три режима формирования канала пробоя:

1) режим несформированного канала пробоя (рис. 1а);

2) режим полного перемикаания межэлектродного зазора (МЭЗ) при $t_{имп} = t_{кас}$ (рис. 1б);

3) режим передержки канала пробоя при $t_{имп} = t_{кас} + t_{нагр}$ (рис. 1в), где $t_{кас}$ – длительность импульса напряжения до касания головкой стримера противоположного электрода; $t_{нагр}$ – время от момента касания до нагрева поверхностного слоя противоположного электрода, до температуры плавления или испарения.

На рис. 2 приведены качественные зависимости плотности тока, температуры поверхности электрода и скорости съема материала от времени для различных режимов формирования канала пробоя.

Из приведенных зависимостей следует, что при определенных параметрах импульсов напряжения и на основании данных работ [12, 13] можно ожидать отсутствия плазменных процессов на катоде-заготовке при недостаточной неоднородности электрического поля (см. температуру плавления для первого импульса напряжения). При полном переми-

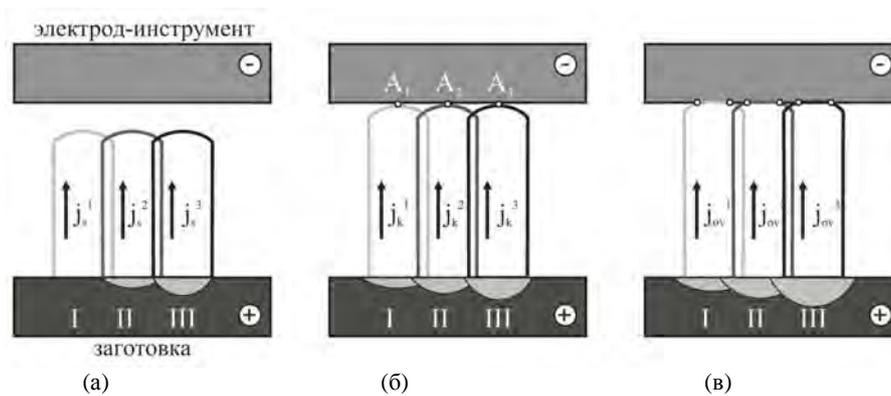


Рис. 1. Варианты процессов электроэрозионной микрообработки: (а) – режим несформированного канала пробоя; (б) – режим полного перемирания МЭЭ; (в) – режим передержки канала пробоя; j_s^i – ток стримера; j_k^i – ток после касания; j_{ov}^i – ток передержки; A_i – точки касания стримера; I–III – импульсы.

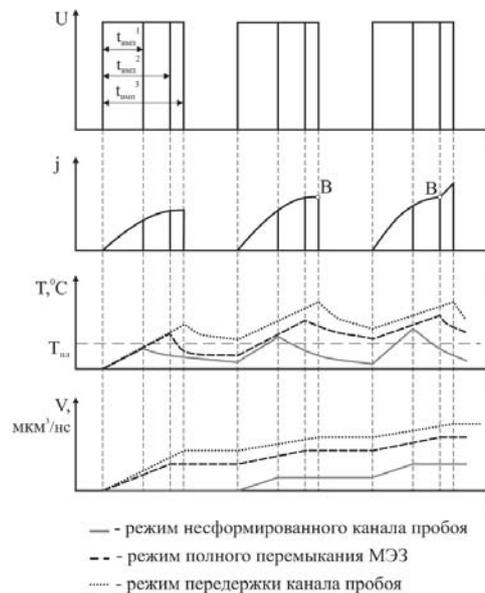


Рис. 2. Качественные зависимости плотности тока j , температуры поверхности электрода-заготовки T и скорости съема материала V от времени для различных режимов формирования канала пробоя ($T_{пл}$ – температура плавления материала электрода-заготовки).

кании межэлектродного зазора (рис. 2, точка В) происходит существенное увеличение электропроводности канала пробоя.

Возникновение и развитие ЭЭО в основном связаны с применением RC генераторов при невысокой напряженности электрического поля в межэлектродном промежутке и его тепловом пробое [14]. Такой режим ЭЭО является режимом полного перемирания межэлектродного зазора с передержкой. В этом случае происходит пробой межэлектродного промежутка и длительность импульсов напряжения составляет $t_{имп} = 10^{-7} - 10^{-2}$ с при $f = 0,1 - 800$ кГц [15, 16]. Для такого процесса характерен достаточно большой диаметр канала пробоя [15] при его интенсивном расширении по диаметру и образовании воздушного пузыря [17]. Это является причиной формирования достаточно больших лунок (глубина лунок – 4–50 мкм, радиус 21–245 мкм) [17].

Первый и второй режимы осуществления МЭЭО являются принципиально новыми (рис. 1). Осуществление МЭЭО в рассматриваемых режимах открывает перспективу безыносной обработки.

Названные режимы могут быть реализованы при большой напряженности электрического поля в межэлектродном промежутке ($E > 36$ кВ/см) [16] и его электрическом пробое и формировании стримера [18, 19]. Зарождение и распространение стримеров в конденсированных средах происходят из-за неоднородностей электрического поля, являющихся очагом инициирования разряда. На начальном этапе такая неоднородность при ЭЭО возникает из-за шероховатости поверхности электрода, а в дальнейшем из-за локального нагрева поверхности электрода в зоне формирования предыдущего стримера и канала пробоя. Происходит «гнездование» каналов разряда (на рис. 1

Таблица 1. Длительности импульса напряжения для различных режимов формирования канала пробоя

Межэлектродный зазор s , мкм	Длительность импульса, $t_{имп}$, нс					
	режим 1		режим 2		режим 3	
	при $V_{стр1}$	при $V_{стр2}$	при $V_{стр1}$	при $V_{стр2}$	при $V_{стр1}$	при $V_{стр2}$
1,0	5,0к	0,05к	5,0	0,05	$5,0+t^*$	$0,05+t^*$
5,0	25,0к	0,25к	25,0	0,25	$25,0+t^*$	$0,25+t^*$
10,0	50,0к	0,5к	50,0	0,5	$50,0+t^*$	$0,5+t^*$
20,0	100,0к	1,0к	100,0	1,0	$100,0+t^*$	$1,0+t^*$

В таблице: скорости распространения стримера $V_{стр1} = 2 \cdot 10^4$ см/с, $V_{стр2} = 2 \cdot 10^6$ см/с; t^* – время нагрева электрода-инструмента до температуры $T_{пл}$ или T_k .

условно приведены три последовательно сформированных стримера).

Важнейшей проблемой МЭЭО при использовании наносекундных импульсов напряжения (порядка нескольких наносекунд) является обоснование наличия эрозионного разрушения электрода-заготовки. При небольшой длительности импульса напряжения, малой энергии импульса, ограниченной электропроводности в стримере, коротком времени существования сильного поля на фронте стримера формируется слабоионизированный низкотемпературный канал [12, 13]. Такие параметры в зоне стримера могут явиться причиной отсутствия процесса плавления или испарения, то есть отсутствия сформированной лунки на поверхности электрода-заготовки (см. рис. 1а, первый канал разряда).

Для рассмотренных трех режимов осуществления МЭЭО длительность формирования канала пробоя зависит от величины межэлектродного зазора s и скорости распространения стримера $V_{стр}$. Процессы ЭЭО и МЭЭО осуществляются при $s = 1,0-20$ мкм. Из работы [16] известно, что в воде и других жидких диэлектриках $V_{стр} = 2 \cdot 10^4 - 2 \cdot 10^6$ см/с. Исходя из этого длительность импульсов напряжения может быть рассчитана:

– для режима несформированного канала пробоя (режим 1):

$$t_{имп} = k \cdot s / V_{стр}, \quad (1)$$

где k – коэффициент, определяющий степень сформированности канала пробоя. Коэффициент k устанавливает размеры эрозионной лунки на поверхности катода-заготовки, $k < 1,0$;

– для режима полного перемикания межэлектродного зазора (режим 2):

$$t_{имп} = s / V_{стр}; \quad (2)$$

– для режима передержки канала пробоя (режим 3):

$$t_{имп} = s / V_{стр} + t_{пл} \quad (3)$$

или

$$t_{имп} = s / V_{стр} + t_k, \quad (4)$$

где $t_{пл}$, t_k – время нагрева электрода-инструмента до температуры плавления или температуры кипения соответственно.

Расчетные величины $t_{имп}$ приведены в табл. 1.

Эффективность процесса МЭЭО определяется тепловыми процессами на электроде-заготовке и электроде-инструменте. Тепловые процессы на электроде-заготовке обуславливают интенсивность ее разрушения (формирование лунок) и качество поверхностного слоя. Эти процессы зависят от нагрева корневой зоны стримера. Для приближенного определения глубины лунки на заготовке может быть использовано следующее соотношение:

$$h_3 \approx 2 \sqrt{\frac{a_3 t_{имп}}{\pi} - \lambda_3 \frac{T_{пл,3} - T_0}{q_3}}, \quad (5)$$

где λ_3 – коэффициент теплопроводности материала заготовки; $a_3 = \lambda_3 / (c_3 \rho_3)$ – коэффициент температуропроводности заготовки; $T_{пл,3}$ – температура плавления материала заготовки; T_0 – температура окружающей среды; q_3 – плотность теплового потока на поверхности заготовки.

Получены приближенные зависимости $t_{пл}$ и t_k от параметров процесса:

$$t_{пл} = \frac{\pi}{a_{эи}} \left(\frac{\lambda_{эи} (T_{пл,эи} - T_0)}{2q_{эи}} \right)^2, \quad (6)$$

$$t_k = \frac{\pi}{a_{эи}} \left(\frac{\lambda_{эи} (T_{к,эи} - T_0)}{2q_{эи}} \right)^2,$$

где $\lambda_{эи}$ – коэффициент теплопроводности электрода-инструмента; $a_{эи} = \lambda_{эи} / (c_{эи} \rho_{эи})$ – коэффициент температуропроводности электрода-инструмента; $q_{эи}$ – плотность теплового потока на поверхности электрода-инструмента.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Тепловые расчеты для процессов на электроде-инструменте выполнены в целях

Таблица 2. Результаты расчета времени нагрева поверхностного слоя электрода-инструмента

Металл	Температура плавления, °С	Температура кипения, °С	$q = 10^{10}$ Вт/м ²		$q = 10^{11}$ Вт/м ²		$q = 10^{12}$ Вт/м ²	
			$t_{пл}$, мкс	t_k , мкс	$t_{пл}$, нс	t_k , нс	$t_{пл}$, нс	t_k , нс
Алюминий	660	2447	1,78	24,45	17,8	244,5	0,18	2,45
Хром	1903	2642	7,90	15,22	79,0	152,2	0,80	1,52
Медь	1083	2595	11,36	65,22	113,6	652,2	1,14	6,52
Железо	1535	2900	4,89	17,47	48,9	174,7	0,49	1,75
Никель	1453	2800	5,27	19,56	52,7	195,6	0,53	1,96
Ванадий	1730	3300	2,25	8,18	22,5	81,8	0,23	0,82
Вольфрам	3380	5530	30,00	80,31	300,0	803,1	3,00	8,03

Таблица 3. Результаты расчета глубины лунки на заготовке

Металл	h_3 , мкм			
	режим 1	режим 2	режим 3	
			при $t_{пл}$	при t_k
$q = 10^{10}$ Вт/м ²				
Алюминий	–	–	0,19	37,45
Хром	–	–	0,05	6,32
Медь	–	–	0,09	58,95
Железо	–	–	0,06	10,19
Никель	–	–	0,06	11,21
Ванадий	–	–	0,06	4,90
Вольфрам	–	–	0,05	35,50
$q = 10^{11}$ Вт/м ²				
Алюминий	0,26	0,93	1,32	4,24
Хром	–	–	0,45	0,97
Медь	–	–	0,84	6,27
Железо	–	0,01	0,48	1,30
Никель	–	–	0,48	1,40
Ванадий	0,03	0,26	0,43	0,76
Вольфрам	–	–	0,45	3,83
$q = 10^{12}$ Вт/м ²				
Алюминий	1,50	2,18	2,18	2,23
Хром	0,75	1,13	1,14	1,14
Медь	1,56	2,38	2,41	2,55
Железо	0,70	1,04	1,05	1,06
Никель	0,71	1,05	1,06	1,08
Ванадий	0,51	0,75	0,75	0,75
Вольфрам	1,05	1,72	1,79	1,90

определения времени нагрева поверхностного слоя до температуры плавления или испарения (табл. 2) при плотности теплового потока на поверхности электрода-инструмента, равной 10^{10} Вт/м². Так как время нагрева зависит от плотности теплового потока квадратично, то при изменении теплового потока в 10 раз соответствующее время изменяются в 100 раз. Так, для медного электрода-инструмента при $q = 10^{11}$ Вт/м² получаем $t_{пл} = 113,6$ нс, $t_k = 652,2$ нс, а при увеличении плотности теплового потока до 10^{12} Вт/м² – $t_{пл} = 1,14$ нс, $t_k = 6,52$ нс.

Используя полученные значения $t_{пл}$ и t_k (табл. 2) для условий обработки, соответствующие данным табл. 1 при $V_{стр1} = 2 \cdot 10^4$ см/с, $s = 10$ мкм и $k = 0,5$, выполним расчеты глубины

лунки h_3 на обрабатываемой заготовке. Результаты расчетов приведены в табл. 3.

Эти расчеты позволяют составить прогноз максимальной длительности импульса напряжения (по времени нагрева поверхности электрода-инструмента до $T_{пл}$) при безыносном режиме МЭЭО, а также производительности обработки по параметрам формируемых лунок (табл. 3). При малой плотности теплового потока ($q = 10^{10}$ Вт/м²) за время формирования канала разряда заготовка не успевает нагреться до температуры плавления, и поэтому удаление материала с заготовки в режимах 1 и 2 не происходит. В режиме 3 при выборе длительности импульса из условия плавления электрода-инструмента согласно уравнению (3) на заготовке формируются весьма малые лунки, а при

выборе длительности импульса из условия испарения электрода-инструмента по соотношению (4) лунки достигают большой глубины из-за большой длительности импульса. Эти условия полнее соответствуют традиционной электроэрозионной обработке, так как длительность формирования канала разряда существенно меньше длительности импульса. При увеличении плотности теплового потока длительность импульса становится сопоставимой со временем формирования канала разряда, что приводит к образованию лунок приблизительно одинакового размера для 2-го и 3-го режимов, а размеры лунок для 1-го режима получаются лишь в полтора раза меньше. Полученные результаты свидетельствуют о возможности реализации малоизносной и безызносной электроэрозионной обработки с использованием наносекундных импульсов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнен анализ процесса микроэрозионной обработки в сильных электрических полях при формировании электрического, стримерного пробоя межэлектродного промежутка и применении наносекундных импульсов напряжения. Предложены три режима осуществления переключения межэлектродного промежутка каналом пробоя: несформированного канала, полного переключения, переключения с передержкой.

Предложены зависимости для расчета длительностей импульсов напряжения от скорости развития стримера, величины межэлектродного зазора, времени нагрева поверхности электрода-инструмента до температур плавления или кипения. Обоснованы возможные условия безызносной или малоизносной микроэрозионной обработки (режим обработки) для различных материалов электродов-инструментов.

Выполнены расчеты нагрева электродов и формирования лунок в зоне корня стримера (для электрода-заготовки) и точке касания головкой стримера противоположного электрода-инструмента. Приведены условия формирования лунок на поверхностях электродов. Показано, что для некоторых материалов в режиме $q = 10^{10}$ Вт/м² может отсутствовать процесс формирования лунок.

ЛИТЕРАТУРА

1. El-Hofy H.A.G. *Advanced machining processes: nontraditional and hybrid machining processes*. NY: McGraw Hill, 2005. 253 p.
2. Kibra G., Bhattacharyya B., Davim J.P. (eds) *Nontraditional Micromachining Processes: Fundamentals and Applications*. Berlin: Springer, 2017. 422 p.

3. Rajurkar K.P., Sundaram M.M., Malshe A.P. *Procedia CIRP*. 2013, **6**, 13–26.
4. Tosun N., Cogun C., Inan A. *Machining science and technology*. 2003, **7**(2), 209–219.
5. Fassi I., Shipley D. *Micro-Manufacturing Technologies and Their Applications*. Berlin: Springer, 2014. 296 p.
6. Tsaia Y.-Y., Masuzawa T. *Journal of Materials Processing Technology*. 2004, **149**(1–3), 304–309.
7. Амитан Г.Л., Байсупов И.А., Барон Ю.М. и др. *Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки*. Ленинград: Машиностроение, 1988. 719 с.
8. Asad A.B.M.A., Islam M.T., Masaki T., Rahman M., Wong Y.S. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2018, **20**, 36–50.
9. Starikovskiy A. *Plasma Sources Sci Technol*. 2013, **22**(1), 012001.
10. Masuzawa T., Sata T., Kinoshita N. *J JSEME*. 1971, **5**(9), 35–52.
11. Любимов В.В., Курочкин А.И., Волгин В.М., Садовников Р.В. *ЭОМ*. 2018, **54**(4), 59–64.
12. Кускова Н.И. *Журнал технической физики*. 2001, **71**(2), 51–54.
13. Косенков В.М., Кускова Н.И. *Журнал технической физики*. 1981, **57**(10), 2017–2020.
14. Артамонов Б.А., Волков Ю.С., Дрожалова В.И. *Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов*. М.: Высшая школа, 1983. 247 с.
15. Фотеев Н.К. *Технологии электроэрозионной обработки*. М.: Машиностроение, 1980. 184 с.
16. Наугольных К.А., Рой Н.А. *Электрические разряды в воде*. М.: Наука, 1971.
17. Золотых Б.Н., Мельдер Р.Р. *Физические основы электроэрозионной обработки*. М.: Машиностроение, 1977, 43 с.
18. Ушаков В.Я. *Импульсный электрический пробой жидкостей*. Томск: Изд-во ТГУ, 1975. 255 с.
19. Райзер Ю.П. *Физика газового разряда*. М.: Наука, 1987.

Summary

The work is devoted to the study of the electrical discharge micromachining in the electric breakdown of dielectric liquids. The formation of a breakdown channel using nano- and microsecond pulses is considered. The variants of incomplete and short-time breakdown of the gap are given. The thermal simulations of the electrodes heating until the temperatures of melting and evaporation of the electrodes materials are carried out.

Keywords: electrical discharge machining, micromachining, pulse generator, power supply.