

В.І. Осипенко, д.т.н., проф.**Д.О. Ступак, к.т.н., доц.****С.В. Поздєєв, к.т.н., доц.***Академія пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля*

ФІЗИКО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ЗАКОНОМІРНОСТІ ПРОБОЮ РІДИНИ СЕРІЄЮ ІСКРОВИХ РОЗРЯДІВ

В статті розглянуто процес пробою міжелектродного проміжку при електроерозійній обробці. Встановлено основні фактори, що впливають на величину напруги пробою міжелектродного проміжку. Проведені дослідження по встановленню залежності величини напруги пробою серією імпульсів від розглянутих факторів.

Вступ. При дослідженнях електричної ерозії за умов, характерних для електроерозійного дротяного вирізання (ЕЕДВ), до теперішнього часу вкрай мало уваги приділялося дослідженням, пов'язаним з процесами пробою робочої рідини, якою є дистильована чи технічна вода. В більшості відомих досліджень [1–8], основна увага приділялася процесам, що відбуваються в рідині та на електродах вже після утворення каналу розряду. Разом з тим дослідження безпосередньо процесу пробою та параметрів, що його визначають за умов, характерних для ЕЕДВ, вкрай важливо як з точки зору поліпшення продуктивності і точності самого методу, так і з точки зору отримання науково обгрунтованих рекомендацій, необхідних при створенні і модернізації генераторів, регуляторів міжелектродного проміжку (МЕП) та алгоритмів їх роботи.

За умов ЕЕДВ специфічними факторами, що впливають на процес утворення та розвитку пробою, можуть бути: геометричний розмір МЕП, амплітудне значення напруги генератора, геометрія та шорсткість взаємодіючих поверхонь електродів, електропровідність та ступінь забрудненості робочої рідини продуктами ерозії електродів, тиск та швидкість примусового прокачування робочої рідини безпосередньо в зоні утворення пробою, локальна зміна електричної міцності МЕП через вплив попередніх розрядів.

Виходячи з цього, була поставлена задача експериментально дослідити вплив даних факторів та їх комбінацій на процеси утворення каналу розряду при серії іскрових розрядів. Дослідження проводилися на спеціально розробленому стенді, конструкція якого наведена статті [9]. Досліди виконувались з використанням модифікованого генератора

технологічного струму МГКІ 1, що забезпечує крутизну переднього фронту напруги до 800 В за 0,5 мкс, тим самим гарантовано забезпечуючи пробиття проміжку при будь-якому можливому для ЕЕДВ стані МЕР.

Основна частина. Для проведення комплексу експериментальних досліджень була виготовлена партія пар електродів, у яких поверхня анода виконувалася плоскою, катода – сферичною з радіусом 0,25 мм. Взаємодіючі поверхні електродів виготовлялися з контрольованою шорсткістю від $R_a0,2$ до $R_a4,5$, що перекриває весь можливий діапазон параметрів шорсткості, характерних для ЕЕДВ (від суперфінішних до чорнових режимів обробки), причому поверхня анода попередньо оброблялася на електроерозійному вирізному верстаті, а поверхня катода отримувалася методами оптико-координатного шліфування.

Методики, що використовувалися, дозволяли визначати вплив на пробивні характеристики робочої рідини як мінімальної геометричної відстані між взаємодіючими поверхнями електродів, так і шорсткості даних поверхонь. В якості робочої рідини використовувалася дистильована вода з питомим опором 60 кОм*см (електропровідність 16 μ S). Результати досліджень наведені табл. 1 та на рис. 1, 2.

Відомо, що специфічною особливістю будь-якого процесу електроерозійної обробки є забруднення МЕР продуктами ерозії електродів, випаровування та піролізу робочої рідини. Оскільки вода при розкладанні практично не утворює будь-яких твердих часток, основу забруднення МЕР становлять продукти ерозії електродів та газопарова суміш, що складається з продуктів випаровування та пролізу води. У зв'язку з цим при дослідженнях впливу забруднень на пробивні характеристики МЕР використовувався осад, отриманий при обробці сталі 45 латунним ДЕІ. Наявність у МЕР газопарових бульбашок імітували за допомогою попереднього насичення води повітряними бульбашками. Насичення робочої рідини газовими бульбашками проводилось при прокачуванні її через пряму пористу трубку. Діаметр пор трубки (22 мкм) та режими прокачування обиралися так, щоб варіювати об'ємну концентрацію від 1 до 3 %, а розміри бульбашок становили 5 – 15 мкм. В дослідженій області зміни концентрацій газових бульбашок та величин МЕР (тобто при відсутності повного перекривання проміжку газовим пухирцем) отримані результати не виявили впливу наявності повітряних бульбашок на пробивні характеристики рідини.

Розрахунок можливих концентрацій продуктів ерозії в МЕР виконувався, виходячи зі зміни швидкості поперечного обтікання

дроту від 0,1 до 6 м/с. Дані про вплив концентрації даного осаду на пробивні характеристики робочої рідини наведено в таблиці 1.

В дослідженій області зміни величин МЕР та концентрацій осаду пробивні напруженості електричного поля помітно зменшуються при зростанні концентрації осаду до 0.56 % при геометричних розмірах МЕР 10 – 20 мкм. При відносно великих МЕР > 20 мкм, вплив зростання концентрації продуктів ерозії на пробивні характеристики рідини є незначним. При цьому варто зазначити, що наявність осаду значно збільшує вірогідність так званих пробоїв “по домішці”, електричні та енергетичні параметри яких помітно відрізняються від пробою чистої робочої рідини (зменшується енерговиділення на електродах за рахунок втрат на руйнування домішки та наявності додаткових низькоомних контактів).

З точки зору стабільності напруги пробою при безперервній подачі імпульсів на проміжок (тобто за умов реального ЕЕДВ) найбільш значний вплив на пробивні параметри рідини мають попередні розряди, оскільки багатьма дослідниками встановлено [8; 10; 11], що виникнення наступного розряду найбільше ймовірно поблизу ділянки, враженої попереднім розрядом, через наявність облямовуючих валиків, підвищеної температури в зонах остигаючих ерозійних лунок та високої локальної концентрації вільних носіїв заряду. При цьому варто очікувати, що тиск та швидкість течії робочої рідини повинні мати певний вплив на умови формування пробою проміжку.

Таблиця 1

Значення величин напруг пробою МЕР залежно від ступеня забрудненості робочої рідини продуктами ерозії (дистильована вода з питомим опором 60 кОм·см, шорсткість поверхні електродів $R_a = 3,5$ мкм)

Ступінь забрудненості робочої рідини, $C_z, \%$	Геометричний розмір МЕР, $l_{MER},$ мкм						
	10	15	20	25	30	40	50
	Напруга пробою МЕР, В						
Вода без забруднень	66	102	131	170	185	250	303
Вода + 0,08 % продуктів ерозії	62	96	104	164	190	255	310
Вода + 0,56 % продуктів ерозії	45	71	88	172	180	230	320
Вода + 1,6 % продуктів ерозії	47	73	90	175	192	225	296

Дослідження впливу попередніх розрядів на умови виникнення пробою рідини показали як різке зменшення середніх напруг пробою (в 2,5–3,5 раза) так і суттєве зростання нестабільності процесу. Якщо розкид напруг пробою першого імпульсу за відомих умов у МЕП практично не виходив за межі $\pm 7\%$, наступні імпульси відрізнялися вже різким зростанням розкиду напруг пробою від 10 до 40% [9].

Виходячи з аналізу результатів досліджень впливу попередніх розрядів на пробивну міцність середовища, серію розрядів обмежили 15 імпульсами, оскільки при незначній площі взаємодіючих поверхонь електродів при такій кількості розрядів у МЕП встановлювався певний квазістаціонарний стан без аномальних явищ, що можуть виникнути в зоні пробою через надмірну локальну концентрацію продуктів ерозії та газопарової суміші. Результати виконаної серії експериментів наведено в табл. 2 та на рис. 1. При цьому за виконання досліджень впливу попередніх розрядів на умови пробою в таблицях наведені середні значення напруг пробою 15-го імпульсу кожної серії. Величина тиску робочої рідини в МЕП також практично не впливає на умови виникнення розряду після серії попередніх розрядів.

Таблиця 2

Значення величин напруг пробою МЕП при впливі попередніх розрядів
(дистильована вода з питомим опором 60 кОм·см)

Умови виникнення пробою	Геометричний розмір МЕП, $l_{\text{МЕП}}$, мкм			
	20	30	40	50
	Напруга пробою МЕП, В			
Шорсткість поверхні електродів R_a 3,5 мкм				
Без примусового прокачування робочої рідини, $P_n = 0$ Па	54	65	76	89
Без примусового прокачування робочої рідини, $P_n = 5 \cdot 10^5$ Па	58	64	73	91
Прокачування рідини із $V_p = 1$ м/с, $P_n = 4,3 \cdot 10^5$ Па	64	73	84	97
Прокачування рідини із $V_p = 3$ м/с, $P_n = 3,4 \cdot 10^5$ Па	73	81	89	103
Прокачування рідини із $V_p = 6$ м/с, $P_n = 2,5 \cdot 10^5$ Па	75	80	91	105
Шорсткість поверхні електродів R_a 0.2 мкм				

Без примусового прокачування робочої рідини, $P_n = 0$ Па	59	66	77	91
Без примусового прокачування робочої рідини, $P_n = 5 \cdot 10^5$ Па	54	67	78	93
Прокачування рідини із $V_p = 1$ м/с, $P_n = 4,3 \cdot 10^5$ Па	68	72	85	97
Прокачування рідини із $V_p = 3$ м/с, $P_n = 3,4 \cdot 10^5$ Па	76	83	88	104
Прокачування рідини із $V_p = 6$ м/с, $P_n = 2,5 \cdot 10^5$ Па	79	85	93	109

Зі зростанням швидкості течії робочої рідини від 0 до 3 м/с встановлено зростання напруг пробою після серії попередніх розрядів на 20–30 %. Подальше зростання швидкості течії робочої рідини до 6 м/с вже несуттєво впливає на пробивну міцність середовища. При цьому варто відмітити, що зі зростанням швидкості течії робочої рідини в МЕР на 20–50 % зменшується розкид напруг пробою, тобто спостерігається стабілізація діелектричної міцності середовища. Якщо шорсткість взаємодіючих поверхонь електродів (до $R_a = 3,5$ мкм) має суттєвий вплив на величину напруги пробою першого імпульсу, то після проходження серії імпульсів даний вплив практично нівелюється, тобто напруженість електричного поля визначається вже геометрією поверхні, утвореної попередніми розрядами.

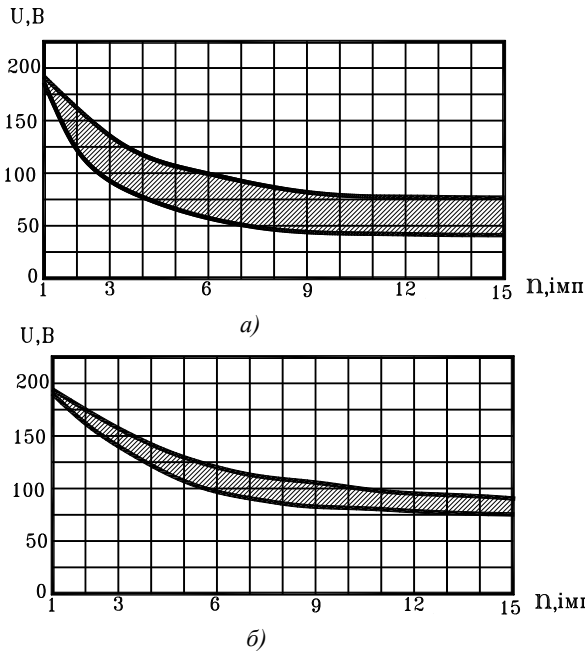


Рис. 1. Параметри розкиду напруг пробою проміжку $l_{\text{мен}} = 30$ мкм, початкова шорсткість поверхні електродів $R_a 3,5$ мкм, при використанні серії з 15 послідовних імпульсів частотою 88 кГц (заштриховані зони): а) без примусового прокачування робочої рідини через МЕП; б) при примусовому прокачуванні робочої рідини через МЕП, $V_p = 6$ м/с

Для оцінки вагомості впливу досліджених чинників та їх комбінацій на процеси утворення каналу розряду скористаємося методами математичного планування експерименту.

На підставі аналізу результатів комплексу проведених досліджень були відібрані чотири фактори, що найбільш суттєво впливають на початкову стадію іскрового розряду (величина міжелектродного проміжку (X_1), мкм; шорсткість взаємодіючих поверхонь електродів (X_2), мкм; забрудненість проміжку продуктами ерозії (X_3), %; швидкість протікання робочої рідини в МЕП (X_4), м/с). В загальному випадку залежність напруги пробою від умов в міжелектродному проміжку можна представити у вигляді поліноміальної математичної моделі типу:

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

де b_0 – вільний коефіцієнт; b_i – коефіцієнти від лінійних впливів факторів; b_{ii} – коефіцієнти від квадратичних впливів факторів; $b_{i,j}$ – коефіцієнти від комплексної дії двох факторів.

Значення факторів на основному, верхньому та нижньому рівнях, а також інтервали варіювання наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Фактори, їх верхній, нижній та нульовий рівні

Фактор		$l_{\text{менш}}$, мкм	R_a , мкм	C_3 , %	V_p , м/с
		X_1	X_2	X_3	X_4
Основний рівень	$X_1=0$	20,00	1,60	0,08	3,00
Нижній рівень	$X_1=-1$	10,00	0,20	0,00	0,00
Верхній рівень	$X_1=1$	40,00	3,20	0,56	6,00

Для переходу від реальних координат до абстрактних застосуємо перетворення:

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

В результаті отримано експериментальну статистичну залежність напруги пробою МЕР після серії попередніх розрядів від обраних факторів процесу:

$$\begin{aligned}
 Y &= 102,05 + 13,28 \cdot x_1 + 0,11 \cdot x_2 - 2,22 \cdot x_3 + 6,78 \cdot x_4 - \\
 &- 4,56 \cdot x_1^2 + 4,06 \cdot x_2^2 - 8,06 \cdot x_3^2 - 12,06 \cdot x_4^2 + \\
 &+ 2,38 \cdot x_1 \cdot x_2 + 2,50 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0,63 \cdot x_1 \cdot x_4 + \\
 &+ 2,88 \cdot x_2 \cdot x_3 - 1,00 \cdot x_2 \cdot x_4 - 0,88 \cdot x_3 \cdot x_4
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

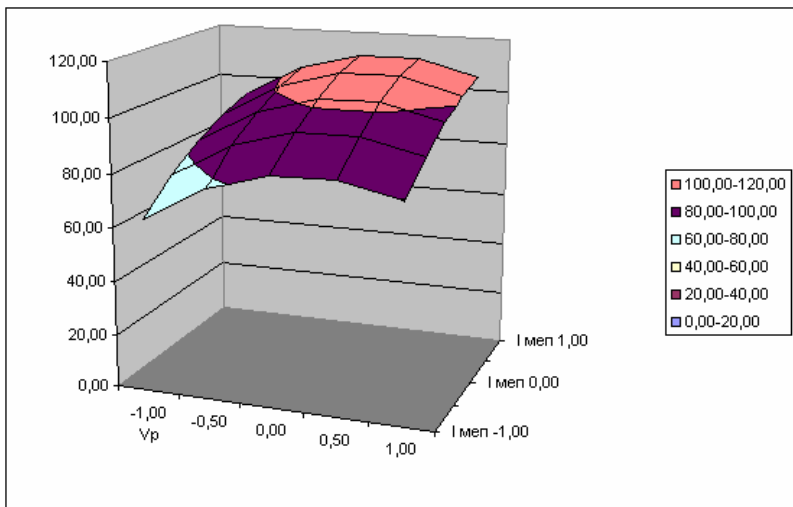


Рис. 2. Залежність напруги пробою від двох найбільш вагомих факторів, геометричної величини проміжку та швидкості протікання робочої рідини в МЕР

Найбільш вагомий вплив на напругу пробою мають геометрична величина проміжку та швидкість протікання робочої рідини в МЕР. Початкова шорсткість взаємодіючих поверхонь електродів практично втрачає вплив на напругу пробою МЕР.

Висновки. Отже, виходячи з результатів даної роботи, можна зробити такі висновки.

1. Доведено, що для серії імпульсів на величину напруги пробою міжелектродного проміжку суттєво впливає величина МЕР та швидкість протікання робочої рідини. Шорсткість поверхні електродів та ступінь забрудненості МЕР мають незначний вплив на пробой проміжку.

2. Виявлено, що на відміну від пробою одиничним іскровим розрядом існує великий розкид значень напруги пробою міжелектродного проміжку, що пов'язано зі нестабільністю діелектричної міцності міжелектродного проміжку

3. Побудовано статистичну модель, отримано експериментальну статистичну залежність величини напруги пробою міжелектродного проміжку від величини міжелектродного проміжку, шорсткості

поверхонь, забрудненості МЕП та швидкості протікання робочої рідини в МЕП.

ЛІТЕРАТУРА:

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., Постаногов 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 // *Электронная обработка материалов.* – 2002. – № 2. – С. 5–11.
7. *Золотых Б.Н., Трофимова Н.Б.* Экспериментальное исследование пробоя жидкостей в условиях электроискровой обработки // *Электронная обработка материалов.* – 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 пробую рідини та балансу енергії одиничного іскрового розряду // *Вісник НТУУ «Київський політехнічний інститут» / Серія: Машинобудування.* – К.: 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 Василь Іванович – доктор технічних наук, професор кафедри інженерного захисту населення та територій Академії пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля.

Наукові інтереси:

- процеси електроерозійної обробки;
- розробка конструкцій електроерозійних вирізних верстатів.

Тел.: (097)6439091.

E-mail: osip5906@ Rambler.ru

СТУПАК Денис Олегович – кандидат технічних наук, доцент кафедри інженерного захисту населення та територій Академії пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля.

Наукові інтереси:

- процеси електроерозійного дротяного вирізання.

Тел.: (0472)382993.

E-mail: stupak@uch.net

ПОЗДЄЄВ Сергій Валерійович – кандидат технічних наук, доцент, начальник кафедри інженерного захисту населення та територій Академії пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля.

Наукові інтереси:

- математичне моделювання теплових процесів.

Тел.: (0472)564939.

E-mail: svp_countrymen@mail.ru

Подано 06.09.2009