УДК 621.9.048.4

В.М. Боков, проф., канд. техн. наук, І.А. Гросул, інж.
Кіровоградський національний технічний університет

Механізм збудження дуги в потоці рідини

Наведено результати експериментальних досліджень фізичного механізму збудження електричної дуги в умовах процесу РОД.
електрична дуга, гідродинамічний потік, міжелектродний зазор, електроерозійний слід, фоторееєстратор СФР

Електрична дуга в поперечному гідродинамічному потоці робочої рідини використовується в промисловості як інструмент для реалізації високопродуктивного способу РОД (РОД - розмірна обробка дугою) деталей переважно із важкооброблюваних матеріалів [1, 2].

Спосіб РОД, разом зі способами електроіскрової та електроімпульсної обробки, відноситься до способів електроерозійної обробки. Прогнозування кінцевого результату останніх двох способів обробки стало можливим завдяки ретельному вивченню фізичного механізму електричної ерозії як феномена руйнування металу [3, 4], зокрема початкової фази процесу – механізму збудження електричних розрядів в міжелектродному зазорі. В той же час початкова фаза способу РОД не була об'єктом дослідження.

В роботі [5] стверджується, що збудження розрядів в міжелектродному зазорі при електроімпульсній обробці здійснюється за рахунок електричного пробою рідкого діелектрика. При цьому основними рисами явища пробою є статистичний характер та електронна природа процесів порушення електричної міцності рідини-діелектрика та формування струмопровідного каналу. Крім того, в цій роботі показано, що із підвищенням забрудненості робочої рідини довжина пробивного проміжку збільшується. Останнє пояснюється зменшенням електричної міцності між-електродного зазору при наявності в рідині дрібних електропровідних часток продуктів ерозії електродів.

Умови збудження електричних розрядів при реалізації процесу РОД суттєво відрізняються від умов електроімпульної обробки:

- по-перше, при РОД крізь міжелектродний зазор прокачується потужний гідродинамічний потік робочої рідини (швидкість потоку 0,5…50 м/с [1, 6]), який можна розглядати як електричний опір, що постійно оновлюється. При цьому статичний тиск робочої рідини на вході в міжелектродний зазор складає 0,4…4 МПа. При електроімпульній обробці робоча рідина крізь міжелектродний зазор в загальному випадку не прокачується або прокачується із незначною швидкістю [4]. При цьому статичний тиск робочої рідини на вході в міжелектродний зазор не перевищує 0,2 МПа;

- по-друге, при РОД застосовується дугова форма електричного розряду, тобто дуга, яка горить від джерела постійного струму з крутопадаючою вольт-амперною характеристикою (при постійній напрузі) постійно в часі (без пауз), але дискретно в просторі, в той же час при електроімпульсній обробці – імпульсна форма, тобто імпульс, який формується штучно з використанням імпульсного джерела живлення та супроводжується обов'язковими паузами.

Вказані вище фізичні відмінності передбачають певні особливості збудження дуги в умовах процесу РОД та обґрунтовують необхідність їх дослідження. Важливість

© В.М. Боков, І.А. Гросул. 2006

вивчення цієї фази процесу РОД пояснюється тим, що наприклад при електроімпульсній обробці «…всі характеристики процесу обробки задаються першою фазою електричного розряду, а саме фазою пробою. Значення напруги імпульсу визначає величину міжелектродного проміжку, а отже умови видалення продуктів ерозії, продуктивність, точність та якість обробки» [7].

Методика експериментального дослідження особливостей фізичного механізму збудження електричної дуги в умовах процесу РОД базувалася на необхідності:

- вивчення фізичної можливості пробою міжелектродного проміжку критично малих розмірів в умовах інтенсивного прокачування робочої рідини (суміші гасу та масла И-20 у співвідношенні 1:1). З цією метою спроектовано експериментальний пристрій до електроерозійного верстата «Дуга-8Г», який дозволяв прокачувати робочу рідину змінних гідродинамічних параметрів крізь торцевий міжелектродний зазор, що дискретно регулюється;

- виявлення механізму видалення продуктів ерозії із торцевого міжелектродного зазору при прямому прокачуванні забрудненої технічної води шляхом вивчення слідів на електроді-заготовці в початкові фазі процесу РОД. З цією метою торцеві поверхні електродів перед обробкою шліфували;

- виявлення механізму збудження електричної дуги безпосередньо в процесі обробки шляхом вивчення слідів від її горіння на торцевій поверхні графітового електрода-інструмента в умовах усталеного зносу;

- вивчення форми дуги в поперечному потоці робочої рідини з парогазовою порожниною за допомогою надшвидкісного фотореєстратора СФР (частота зйомки – 6400…9600 к/с).

Результати експериментальних досліджень щодо вивчення електричного пробою міжелектродного проміжку в умовах РОД показали, що в діапазоні швидкостей органічного середовища 0,5…10 м/с (цей діапазон відповідає діапазону статичних тисків робочої рідини на вході в міжелектродний проміжок 0,1…2 МПа) при значенні прикладеної напруги 1000 В (використовувався імпульсний підпалювач дуги промислового зварювального джерела живлення технологічним струмом) у системі електродів «площина-площина» пробою не зареєстровано при зазорі між електродами до 0,02 мм. Подальше зменшення зазору в експерименті не мало сенсу, оскільки відомо, що значення торцевого міжелектродного зазору при РОД є не меншим 0,05…0,.1 мм при напрузі 30 В [1, 6]. Простий перерахунок наведених значінь напруги та величини міжелектродного зазору в напруженість електричного поля E дають для обробки значення $E_o = 3 \cdot 10^5 ... 6 \cdot 10^5$ В/м, а для експерименту - $E_e = 5 \cdot 10^7$ В/м. Оскільки E_e >> E_o, є очевидним, що при РОД збудження дуги відбувається не за рахунок пробою міжелектродного зазору з органічною робочою рідиною, що інтенсивно рухається. Якщо зважити на те, що в експерименті застосовувалася робоча рідина не очищена від продуктів ерозії та продуктів високотемпературного розкладу графіту та органічної рідини (експеримент проводився на промисловому верстаті), для такої рідини слід було б очікувати значного зменшення критичної (пробійної) напруженості електричного поля. Так, є відомим, що подібні забруднення спроможні зменшити її в декілька разів [5, с. 11-21]. В той же час для очищеного гасу в нерухомому стані при зазорі 0,05 мм пробивна напруга становить близько 160 В. Таким чином, спосіб РОД відрізняється від способу електроімпульсної обробки механізмом ініціації (збудження) розряду. Пояснити це можна впливом двох факторів:

- статичного тиску робочої рідини в міжелектродному зазорі: є відомим, що при збільшенні статичного тиску в n разів для пробою того ж проміжку необхідно прикласти напругу в n^2 більшу [8];

- динамічного тиску робочої рідини в міжелектродному зазорі, що підтверджується фактом пробою міжелектродного проміжку в вище описаному експерименті при раптовому відключенні електродвигуна насосу прокачування робочої рідини. За даними роботи [5] відомо, що «…на величину пробивного проміжку суттєво впливає тривалість дії (час експозиції) електричного поля». Певно пробою передують процеси місцевого прогрівання міжелектродного проміжку енергією електричного поля, в результаті чого пробивна напруга зменшується. Але при РОД динамічний потік інтенсифікує процес відведення тепла із зазору і тим самим підвищує його пробивну міцність. Крім того, за даними роботи [9] вважається недостатньо вивченим вплив високих швидкостей робочої рідини на пробійні явища.

Слід відмітити, що в природі існують всього три способи ініціювання електричної дуги:

- безконтактний, що реалізується за рахунок електричного пробою між-електродного проміжку;

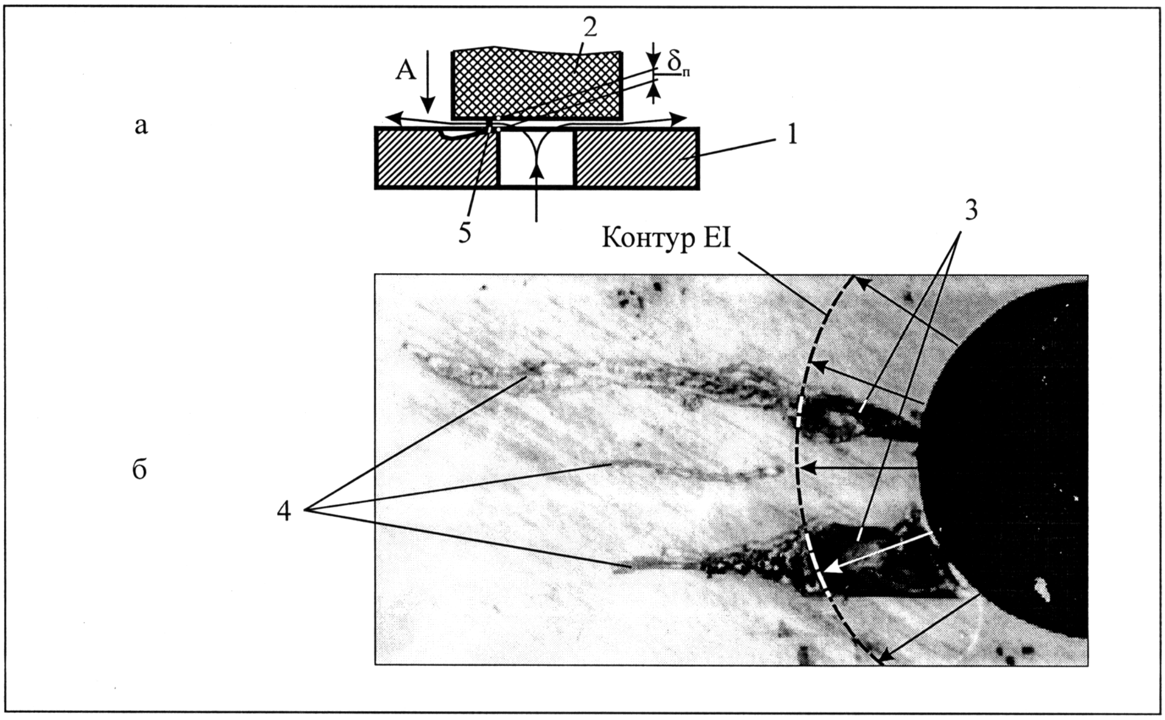
- контактний з подальшим розведенням електродів, що широко використовується при зварюванні;

- контактний, що реалізується за допомогою відносно тонкого провідника, який попередньо замикає міжелектродний проміжок та вибухоподібно згорає в ньому за рахунок ленц-джоулевського тепла.

Оскільки вище експериментально доказано, що безконтактний спосіб ініціювання електричної дуги в умовах РОД неможливий, залишаються два контактних способи, причому, перший з них є єдиним способом збудження дуги у випадку використання чистої органічної робочої рідини, а другий проявляється при ініціюванні електричної дуги продуктами ерозії.

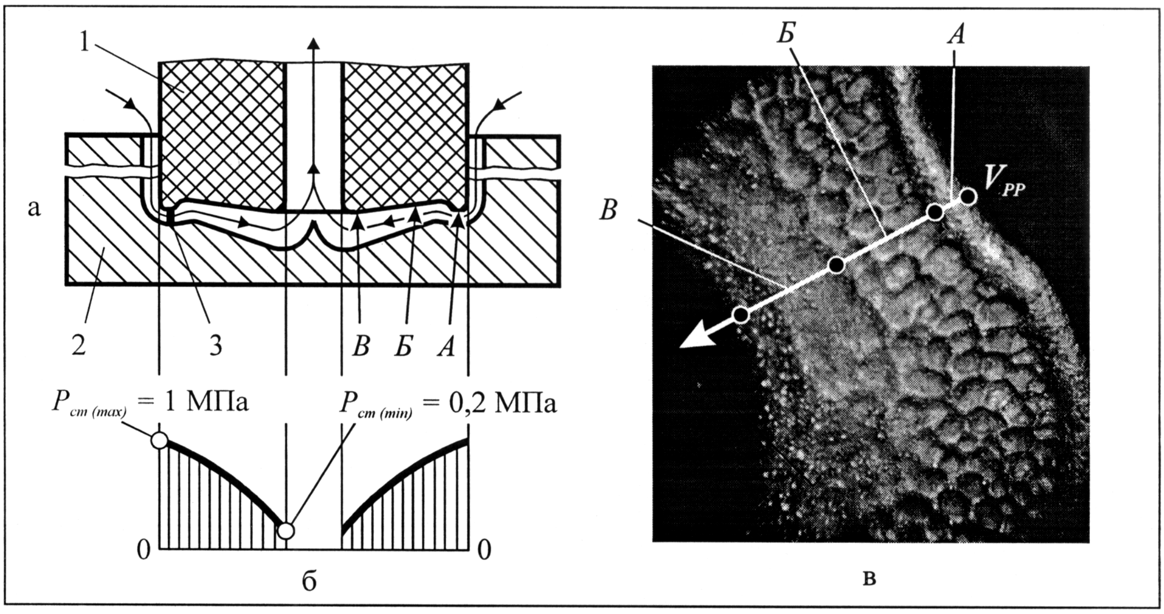
Для підтвердження останнього вивчали сліди, що отримані при ініціації дуги продуктами ерозії (розмір часток – до 0,2 мм), які надходили в торцевий міжелектродний проміжок з забрудненою технічною водою в початковій фазі процесу (рис. 1, а). Очевидно, що продукт ерозії, замкнувши міжелектродний проміжок, швидко прогрівається ленц-джоулевським теплом і, при недостатній силі технологічного струму, далі рухається в ньому в розплавленому краплеподібному стані в напрямку руху робочої рідини, продовжуючи замикати зазор. При цьому він збільшує власні розміри, проплавляючи поверхню і захоплюючи матеріал електрода-заготовки 1 за ефектом сніжного кому (рис. 1, б), про що свідчать сліди 3. З виходом за межі міжелектродного проміжку продукт ерозії продовжує рухатися з потоком робочої рідини і частково полишає своє тіло, утворюючи на електроді-заготовці наплавлений валик 4. Таким чином, продукти ерозії при РОД, що надходять в зазор, є каталізаторами процесу обробки, і при певних умовах можуть вилучатися із нього у крапельному стані.

Для виявлення механізму ініціації електричних розрядів безпосередньо в процесі РОД була досліджена торцева поверхня електрода-інструмента (матеріал – графіт МПГ-7), яку отримано при наступних умовах: матеріал електрода-заготовки – сталь 5ХНМ; сумарна глибина прошивання отворів – 400 мм; сила технологічного струму – 300 А; робоча рідина – органічна (склад вказаний вище); спосіб прокачування – зворотний (рис. 2, а, б). Відносний лінійний знос електрода-інструмента – 1 %, але об'ємний знос – значно більший. Зношена поверхня являє собою слідограму впливу процесів в міжелектродному проміжку на матеріал електрода-інструмента (рис. 2, в). Її можна поділити на три характерних зони. Зона *А* являє собою периферію електрода-інструмента і має у перерізі вигляд невеликого (радіусом 0,1…0,5 мм) валика. Ініціація у цій зоні розрядів відбувається переважно за рахунок контактування між обмеженими площинами нерівностей на поверхнях електродів. В ході обробки ці нерівності мають



а - схема процесу; б - вид А на ЕЗ; 1 - ЕЗ (сталь У8А); 2 - ЕІ (графіт МПГ-7); 3 - одинична лунка; 4 - слід від руху розплавленої частки з матеріалу ЕЗ; 5 - дуга

Рисунок 1 - Початкова фаза процесу РОД (пряме помпування; РР - забруднена технічна вода; I = 100 А; U = 30 В; $P_{ст}$ = 1 МПа; зворотна полярність; величина початкового МЕЗ $\delta_п$ = 0,1 мм):



а - схема обробки; б - епюра статичного тиску в торцевому МЕП; в - фрагмент поверхні графітового ЕІ після РОД; 1 - ЕІ; 2 - ЕЗ; 3 - дуга

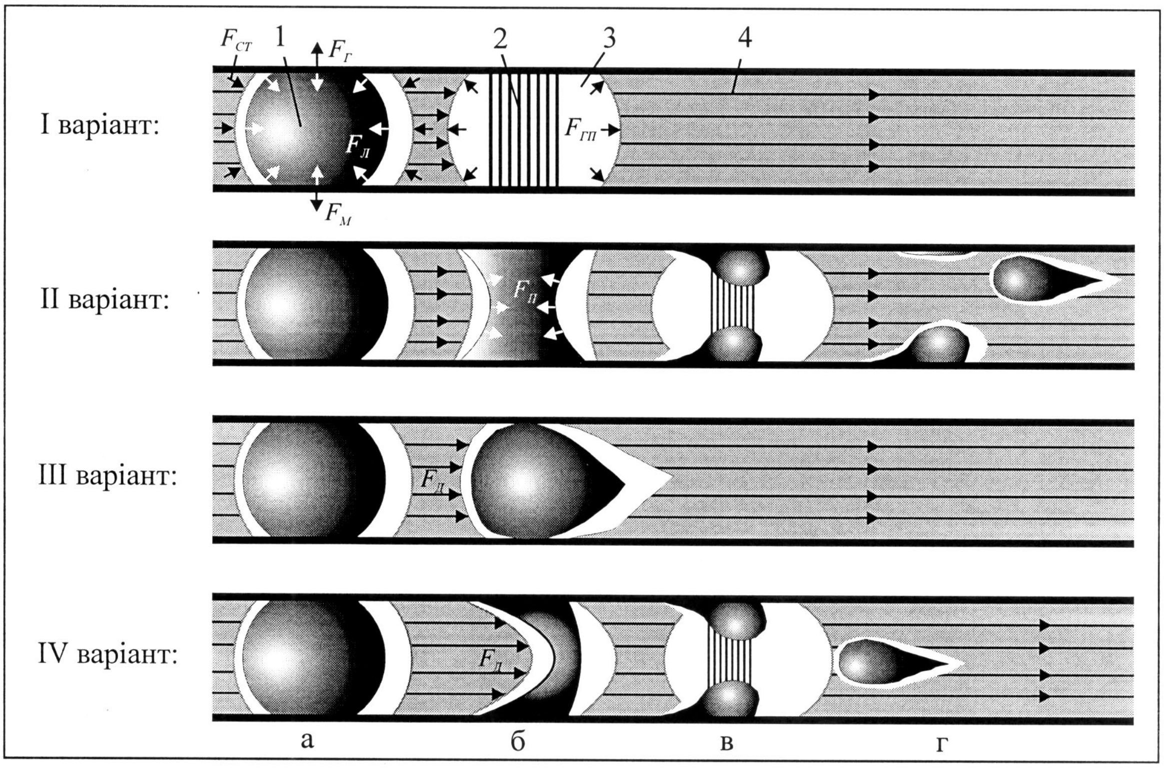
Рисунок 2 - До пояснення механізму ініціації електричних розрядів в процесі обробки:

досить визначений характер. В зоні *А* на електроді-заготовці це місце переходу від меншої шорсткості (одиниці мікронів) на бічній поверхні до більшої (десятки мікронів) на донній. Ці нерівності утворюються лунками. На електроді-інструменті в зоні *А* нерівності утворені продуктами ерозії, що осіли у розплавленому стані. Останнє підтверджується фрактографіями робочої поверхні графітового електрода-інструмента після РОД, які наводяться в роботі [6, с. 115]. Причому, якщо в зоні *А* їх розмір не перевищує сотих часток міліметру, то по мірі зменшення статичного тиску, або, що теж саме, по мірі руху робочої рідини від входу до виходу з МЕП, їх розміри збільшуються до десятих часток міліметру. Крім того, як показано в роботі [6], поверхні графітових електродів-інструментів вкриті й більш меншими частками матеріалу електрода-заготовки з розмірами на рівні 10^{-3} мм. Наявність контактних перемичок в зоні *А* дозволяє віднести принцип обробки в цій зоні до принципів контактно-дугових методів, при яких, як відомо, для формування електричних розрядів в між-електродному проміжку використовується кінематична особливість процесу. Як і у випадку електроконтактної обробки, такою кінематичною особливістю є рух електрода-інструмента. При РОД електрод-інструмент знаходиться в безперервному зворотно-поступальному русі, що дозволяє в залежності від режиму та площі обробки забезпечити необхідну швидкість його переміщення в напрямку руйнування металу і одночасно забезпечити ініціювання дуги у випадку переривання процесу.

Так як в зоні *А* має місце контактування, розглянемо механізм ерозії в цій зоні зважаючи на закономірності електроконтактної обробки та враховуючи особливості РОД. Важливо відмітити, що слід очікувати іншого механізму ерозії при РОД, ніж при електроімпульсній обробці: електродинамічний викид металу неможливий, оскільки при РОД відсутні круті задні фронти імпульсів струму; викид металу після скінчення імпульсу напруги теж неможливий, оскільки в умовах РОД напруга прикладена до між-електродного проміжку постійно. Можливі варіанти розвитку подій в зоні *А* після початку контактування, в залежності від початкових умов, показано на рис. 3. Для всіх варіантів з появою контактної перемички метал в ній за рахунок ленц-джоулевського тепла прогрівається до температури плавлення з утворенням краплини (рис. 3, а). З досягненням цієї температури слід розглянути баланс основних тисків та сил, що діють на краплину розплавленого металу, який продовжує нагріватися і знаходиться в газовій порожнині 3, утвореній з парів робочої рідини. До них відносяться: статичний тиск $P_{СТ}$; сила $F_Д$ від динамічного тиску $P_Д$ з боку потоку робочої рідини; лапласівський тиск $P_Л$; тиск від магнітного поля $P_П$ (пінч-ефект); $F_Г$, $F_М$ – сили молекулярної взаємодії по площі поверхонь, відповідно, металева крапля – графіт та металева крапля – метал. Оскільки час тривалості одиночних електроерозійних актів лежить в діапазоні 10^{-2}… 10^{-4} с [10], справедливо прийняти $P_Д$ = const, $F_Д$ = const. Лапласівський тиск $P_Л$ та сили $F_Г$ і $F_М$ від того моменту, коли краплина металу переходить в розплавлений стан, поступово зменшується, так як з наближенням до температури кипіння зменшується коефіцієнт поверхневого натягу α. Тиск $P_Л$ намагається зберегти найменшу площу поверхні краплини та попереджує змочування розплавленим металом краплини поверхні електродів. Сила стиснення металевої краплі власним магнітним полем струму, що протікає крізь неї, збільшується із зменшенням площі поперечного перерізу краплі. Отже, маємо:

$$P_{СТ} \approx 1\,\text{МПа} = \text{const (типове значення)}; \qquad F_Д = \frac{C_x \rho v^2 \pi R_к^2}{2} = \text{const};$$

$$P_Л = \frac{2\alpha}{R_к},\ \text{при}\ \alpha \to 0; \qquad P_П = \frac{I^2}{2\pi R_к};$$



1 - розплавлена краплина; 2 - дуга; 3 - газова порожнина; 4 - МЕЗ

Рисунок 3 - Модельне уявлення про морфологічні особливості ініціювання дуги від розплавленої краплини металу в МЕЗ в зоні *А* (див. рис. 2) та видалення металу

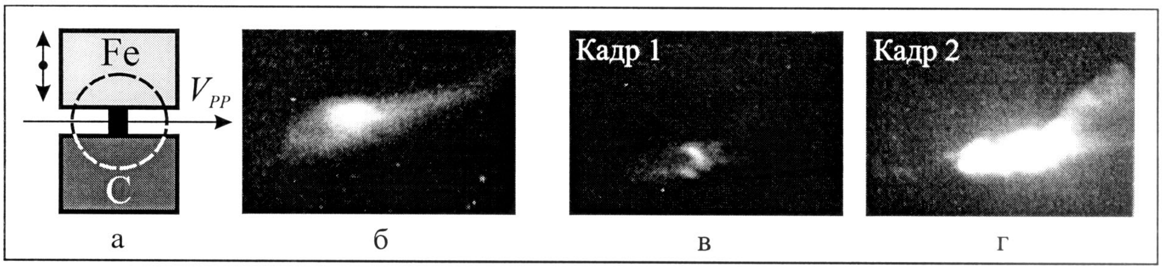
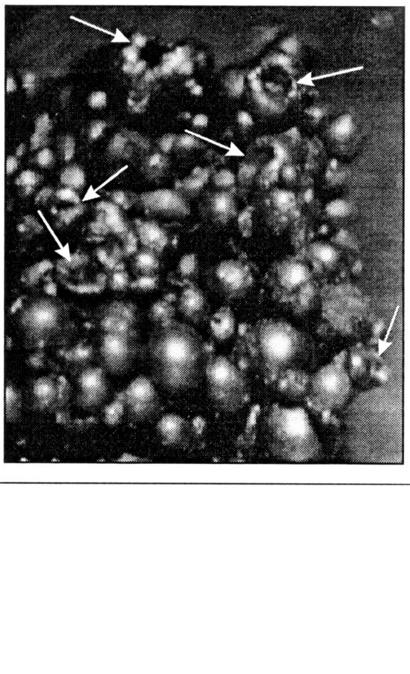


Рисунок 4 - Надшвидкісне фотореєстрування дуги в потоці органічної рідини

Рисунок 5 - Скупчення продуктів ерозії на виході із міжелектродного проміжку (стрілками показано продукти ерозії вулканоподібної форми)



$F_Г = 2R_к\Delta\alpha_1$; $F_М = 2R_к\Delta\alpha_2$,

де C_x – безрозмірний коефіцієнт, що залежить від форми тіла;

ρ – густина металу краплини;

ν – в'язкість рідини;

$R_к$ – радіус краплини металу;

I – сила струму через металеву краплину;

$\Delta\alpha_1$ - енергія відриву краплини по поверхні графіт - метал краплини;

$\Delta\alpha_2$ - енергія відриву краплини по поверхні метал краплини – метал електрода-заготовки.

Враховуючи неможливість кількісного визначення окремих змінних, покажемо можливі варіанти розвитку подій в залежності від співвідношення сил та тисків. Контактування можливе як через одну краплину металу, так і через кілька таких краплин. В цьому випадку при великій силі струму слід чекати миттєвого вибуху із утворенням рідкої та парової фаз (рис. 3, варіант I). На рис. 3, варіант II представлено випадок, коли сила $F_Д$ відносно мала та виконується нерівність

$$P_{СТ} + P_П > P_Л. \quad (1)$$

Тиск $P_Л$ та сили $F_Г$ та $F_М$, по мірі подальшого нагрівання, зменшуються, розплавлена краплина стискується тисками $P_{СТ}$ та $P_П$ і одночасно починає розтікатися по поверхням електродів. На якомусь етапі вона перетворюється на циліндр і площа її поперечного перерізу зменшується. Одночасно збільшується тиск $P_П$. Зона найбільшого падіння напруги зміщується з приелектродних областей в центр металевого містка, провокуючи більший нагрів у цьому місці. Місток розривається, ініціюючи розряд. Метал видаляється з лунки та з поверхні графіту в рідкому стані за рахунок високого тиску в парогазовій порожнини та дії динамічного тиску потоку і рухається переважно в напрямку потоку. При недостатньому помпуванні виникає дуга подібна до звичайної зварювальної, а метал видаляється у всіх радіальних напрямках, ініціюючи розряди не тільки в напрямку руху робочої рідини і тому спостерігається не розмірна (груба) обробка. При помпуванні, достатньому для розмірній обробки, але недостатньому для належного видалення продуктів ерозії в напрямку помпування, при РОД виникає тип шорсткості, коли продукти ерозії осідають на бічній поверхні. Далі потік свіжої рідини, що набігає, діонізує міжелектродний проміжок і тим самим запобігає виникненню розряду на тому ж місці через іонізоване середовище.

У випадку виконання нерівності (1), але за умови превалюючої дії сили $F_Д$ та недостатньої сили струму для швидкого руйнування краплини, вона спроможна рухатися по між електродному проміжку в напрямку руху робочої рідини, продовжуючи електрично контактувати з електродами (рис. 3, варіант III). Аналогією є зішнурована з розплавом «краплини-дуга» при електроконтактній обробці, яка, за відсутністю потужного помпування робочої рідини, мігрує по міжелектродному проміжку [9]. За інших рівних умов, коли сила $F_Л$ має проміжне значення, можливий варіант IV (рис. 3).

Малий, по відношенню до зони *Б* (рис. 2, в), знос в зоні *А*, пов'язаний з відносно малими термічними навантаженнями в цій зоні на електрод-інструмент від тиску в парогазовій порожнини та малими термічними навантаженнями від дії розрядів. Це пов'язано із геометричним розташуванням зони *А* відносно бічної поверхні. Приблизно від моменту розплавлення металу краплини, навколо неї з подальшим нагріванням утворюється парогазова порожнина, яка спроможна відтісняти краплину від бічної поверхні. Розмір зони *А* в плані приблизно дорівнює розміру гексагональних лунок зони *Б*, тобто розміру газових порожнин. Цим пояснюється в кілька разів менша шорсткість на донній поверхні електрода-заготовки в зоні *А* у порівнянні з зонами *Б* та

В. А з теорії електроімпульної обробки відомо, що меншій тривалості імпульсів відповідає менша шорсткість.

Зона *Б* являє собою сукупність лунок майже правильної гексагональної форми, витягнутих у напрямку руху робочої рідини. При цьому, по мірі віддалення від периферії (від зони *А*), з незначним збільшенням розмірів в плані, глибина лунок зменшується до нуля, з їх повним виродженням в зоні *В*. Єдиними за розмірами об'єктами, спроможними залишити сліди з розмірами ≈ 1 мм, є газові порожнини, які оточують електричні розряди і які, за результатами надшвидкісної фотореєстрації, мають розміри одного порядку з лунками. За різними даними тиск в газових порожнинах може сягати сотень атмосфер [3]. Таким чином, виявлені лунки є результатом впливу імпульсного високого тиску в газових порожнинах та високої температури розрядів. Форма лунок в зоні *Б* пояснюється тим, що, з геометричної точки зору, шестигранник є найпростішою близькою до кола фігурою, яка забезпечує повне перекриття поверхні. Подовженість шестигранників в напрямку течії робочої рідини пояснюється впливом гідродинамічного тиску на газові порожнини.

На рис. 4, а показано схему робочої зони експериментального пристрою для надшвидкісної фотореєстрації дуги між двома плоскими (товщиною 2 мм) електродами в потоці робочої рідини, що регулюється за швидкістю, з застосуванням фоторeєстратора СФР. Верхній рухомий електрод – сталевий, а нижній нерухомий – графітовий. Передня та задня стінки пристрою виконані прозорі (з оргскла). На рис. 4, б (частота зйомки – 6400 к/с; сила струму – 20 А; робоча напругу – 30 В; статичний тиск робочої рідини на вході в міжелектродний проміжок – 1 МПа) видно форму розряду та подовженість газової порожнини в напрямку руху робочої рідини.

При достатньому гідродинамічному режимі потоку продукти ерозії, що утворилися в зоні *А*, переважно надходять в зону *Б*. Вони являють собою краплі розплавленого металу. Але, так як вони нагрівалися до температури плавлення при зовнішньому тиску, що дорівнює тиску на вході в міжелектродний проміжок, то по мірі руху в напрямку прокачування робочої рідини, а отже і в напрямку зменшення зовнішнього статичного тиску (рис. 2, б), для його нового значення вони виявляються перегрітими. Це означає, що така метастабільна металева краплина спроможна вибухнути в просторі міжелектродного проміжку (так званий фазовий вибух) за рахунок утворення в її тілі осередків бурного кипіння. Вірогідність такого явища при РОД підтверджується рис. 5, де стрілками показано продукти ерозії вулканоподібної форми з отворами, що свідчать про викид металу з їх середини в розплавленому та пароподібному станах. На рис. 4, в, г наведені результати фотореєстрації дуги з частотою зйомки 9600 к/с, де на першому кадрі показано вибух такої частки в зоні *Б*, а на другому – виникнення дугового розряду на місці вибуху. Таким чином, ініціація розрядів в зоні *Б* відбувається переважно за рахунок фазових вибухів перегрітих продуктів ерозії. Такий механізм ініціації стає можливим при використанні зворотного способу прокачування робочої рідини крізь торцевий міжелектродний зазор завдяки великому градієнту статичного тичку від входу до виходу з між електродного проміжку, який відсутній при електроімпульсній та електроконтактній обробках.

В зоні *В* (рис. 2) лунки, що характерні для зони *Б*, вироджуються у плоську поверхню. В цій зоні має місце найменший знос донної поверхні електрода-інструмента. Це означає, що тут, як і в зоні *А*, поверхня електрода-інструмента незначно термічно навантажена від розрядів та імпульсного навантаження від парогазових порожнин. Ця зона являє собою зону коагуляції розплавлених продуктів ерозії, що надходять із зони *Б*. Тобто, поверхня електрода-інструмента контактує тут переважно з краплинами розплавленого металу, сумарний поперечний переріз яких надто великий, для того, щоб їх спроможна була зруйнувати прикладена сила струму.

Те, що напруга обробки не падає нижче 20 В пояснюється значним (у 10 разів і більшим) зростанням питомого опору металів при плавленні і тим, що краплини металу в цій зоні мають багато порожнин. Останнє також сприяє підвищенню електричного опору. Відсутність фазових вибухів пояснюється значно меншим градієнтом тисків в зоні *В*, ніж в зоні *Б*, так як величина міжелектродного проміжку тут збільшується в кілька разів.

Виконані експериментальні дослідження розширюють теоретичне уявлення про фізичні особливості ініціювання електричних розрядів при РОД та пояснюють їх відмінність від відомих способів електроерозійної обробки.

Список літератури

1. Носуленко В. І. Розмірна обробка металів електричною дугою: Дисс… д-ра техн. наук: 05.03.07. – Кіровоград, 1998. – 389 с.
2. Боков В. М. Розмірна обробка електричною дугою титанового сплаву ВТ3-1 // Збірник наукових праць Кіровоградського державного технічного університету / техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація / - Вип. 13. – Кіровоград: КДТУ, 2003. – С. 191-196.
3. Золотых Б. Н. О физической природе электроискровой обработки металлов. – В кн.: Электроискровая обработка металлов. Вып. 1. – М.: Изд-во АН СССР, 1957.
4. Размерная электрическая обработка металлов: Учеб. пособие для студентов вузов / Б. А. Артомонов, А. Л. Вишницкий, Ю. С. Волков, А. В. Глазков. Под ред. А. В. Глазкова. – М.: Высш. школа, 1978. – 336 с., ил.
5. Электроэрозионная обработка металлов / М. К. Мицкевич, А. И. Бушик, И. А. Бакуто и др.; Под ред. И. Г. Некрашевича. – Мн.: Наука и техника, 1988. – 216 с.
6. Боков В. М. Розмірне формоутворення поверхонь електричною дугою. – Кіровоград: Поліграфічно-видавничий центр ТОВ «Імекс ЛТД», 2002. – 300 с.
7. Электрофизическая и электрохимическая обработка материалов: Справочник – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1982. – 400 с., ил.
8. Малюшевский П. П., Городенко Г. Г. Исследование влияния внешнего давления и магнитных полей на электрический разряд в жидкости // Электронная обработка материалов. – 1987. № 4. – С. 33-38.
9. Семёнов В. Н., Фотеев Н. К. Воздействие электромагнитного поля на процесс электроконтактной резки // Электронная обработка материалов. – 1983. № 3. – С.5-10.
10. Боков В. М., Гросул І. А. Електрична дуга в умовах гідродинамічного впливу як інструмент для точних технологій. – Машиностроение и техносфера XXI века // Сборник трудов международной научно-технической конференции в г. Севастополе 13-18 сентября 2004 г. В 4-х томах. – Донецк: ДонГТУ. Т. 1 – 281 с.

Приведены результаты экспериментальных исследований физического механизма возбуждения электрической дуги в условиях процесса РОД.

The article presents the results of experimental research of physical mechanism of electric arc excitation under ADM process.