

Л.Ф. Головка¹, д-р техн. наук, В.І. Носуленко², д-р техн. наук, О.С. Чумаченко², канд.техн.наук

1-НТУ України „Київський політехнічний інститут”, м.Київ, Україна;

2-Кіровоградський національний технічний університет, м.Кіровоград, Україна

ПРО ЯКІСНІ ТА КІЛЬКІСНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЖЕРЕЛ ТЕПЛА ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ МЕТОДІВ РОЗМІРНОЇ ОБРОБКИ МЕТАЛІВ

Описаны качественные и количественные характеристики источников тепла электрофизических методов размерной обработки металлов и на этой основе определены области их рационального применения

High-quality and quantitative descriptions of sources of heat of electrophysics methods of size treatment of metals are described and on this basis their rational application domains are certain

Електрофізичні методи розмірної обробки металів (ЕФ), що засновані на використанні для локального руйнування металу висококонцентрованих джерел тепла, отримали широке застосування і продовжують розвиватись все більш інтенсивно. Вони включають в себе лазерну обробку (ЛО), електроннопроменевою обробку (ЕП) та процеси електророзрядної обробки (ЕРО), до яких відносять [1] електроіскрову (електроімпульсну) обробку (ЕІ), електромеханічну обробку (ЕМ) та наближену до неї анодно-механічну обробку (АМ), розмірну обробку електричною дугою (РОД), а також плазмову обробку (ПО). Технологічні можливості зазначених процесів визначаються якісними та кількісними характеристиками їх джерел тепла, що, в кінцевому підсумку, визначає області раціонального застосування цих процесів. В цьому зв'язку опишемо якісні та кількісні характеристики джерел тепла в умовах зазначених процесів в їх порівнянні і на цій основі опишемо технологічні можливості та області їх раціонального застосування. Зазначимо, що для реалізації процесу руйнування металу необхідні концентрації енергії в таких джерелах тепла мають бути близькими до енергії зв'язку структури твердого тіла – для металів це $10^3 \dots 10^6$ Вт/см² [2, с. 78].

Лазерна обробка, при якій носієм енергії є електромагнітна хвиля, та якщо виходить з поверхневої густини потоку енергії (до 10^9 Вт/см²), можливостей керування лазерним променем і можливостей реалізації процесу в найрізноманітніших умовах, отримала і надалі буде отримувати все більш широке застосування для розмірної обробки металів.

Електроннопроменевою обробка, коли носієм енергії є заряджені частки і коли густина потоку енергії досягає $5 \cdot 10^8$ Вт/см² [3, с. 5], забезпечує достатньо широкі технологічні можливості в умовах розмірної обробки металів. Проте цей процес не отримав помітного практичного застосування [2, с. 3...4]. Пояснюється це високою вартістю обладнання, високою кваліфікацією обслуговуючого персоналу, складністю засобів безпеки. Окрім того застосування лазера дозволяє вирішити аналогічні технологічні задачі не в вакуумі, що значно спрощує процес.

Процеси ЕРО, що включають ЕІ, ЕМ, РОД та ПО, реалізують електричні розряди, що мають єдину фізичну природу – це те, що називають електричним дуговим

розрядом або, інакше і що те ж, електричною дугою [1]. Саме це об'єднує ці процеси, робить їх схожими і дозволяє розглядати їх в єдності, взаємозв'язку і взаємозалежності, зокрема, як альтернативу традиційним процесам обробки металів різанням і тиском. В цьому зв'язку покажемо, що нестационарні електричні розряди мають із стаціонарною дугою єдину фізичну природу – це те, що прийнято називати електричним дуговим розрядом. Щоб впевнитись в цьому достатньо звернутись до численних, але несистематизованих літературних даних.

Всі відомі різновиди ЕРО реалізують тривалість електричних розрядів $t_i > 10^{-7}$ с [4, с. 25]. “З даних, що маємо, видно, що після 1 мкс і більш іскра стає квазістабільною і отримує багато рис, характерних для сталого дугового розряду” [5, с. 104]. “Іскру можна представити як нестационарну електричну дугу, яка гасне через відносно короткий час лише внаслідок того, що джерело живлення не в змозі живити дугу струмом достатньо тривалий час” [6, с. 17]. “Можна вважати, що після $10^{-5} \dots 10^{-4}$ с від початку розряду між електродами його параметри за інших рівних умов набувають значень, характерних для дуги, що горить скільки завгодно довго” [7, с. 10]. “М. Н. Соболев показав, що напруга розряду стає типово дуговою і сталою після 10^{-6} с після його початку” [7, с. 9-10]. Нагадаємо, що “типово дуговий розряд” характеризується силою струму більше ~ 1 А і сумарним значенням катодного і анодного падінь напруги $U_{k+a} \approx 10 \dots 20$ В. Саме це є необхідною і достатньою умовою, щоб вважати електричний розряд “типово дуговим”. Але саме цими параметрами характеризуються нестационарні електричні розряди в умовах ЕРО [8, с. 12-15, 10]. Це, зокрема, означає, що основні закономірності протікання стаціонарної дуги, певною мірою, справедливі і для нестационарної дуги.

Відміни електричних розрядів в умовах реалізації різноманітних процесів ЕРО – це лише різні форми динамічної (механічної) взаємодії дуги з поперечним до стовпа дуги потоком середовища-діелектрика, динамічний тиск P_d якого на стовп дуги і визначає енергетичну структуру дугового розряду. При РОД дуга протікає в поперечному потоці середовища-діелектрика в умовах однобічного динамічного тиску потоку на стовп дуги. При ЕМО однобічний поперечний до стовпа дуги потік середовища-діелектрика створюється рухомими електродами, які звичайно обертаються. При ЕІ і при реалізації нестационарних електричних розрядів, взагалі, динамічна взаємодія дуги з поперечним потоком середовища-діелектрика досягається в умовах змінного в часі всебічного і рівномірного стиснення стовпа дуги при розширенні каналу розряду, коли останній “набігає” на нерухоме середовище-діелектрик, стискаючи його. В плазмотронах ефект всебічної, постійної, рівномірної, поперечної до стовпа дуги динамічної дії потоку середовища-діелектрика досягається за рахунок обмеження площі поперечного перерізу каналу розряду соплом плазмотрона із додатковою динамічною дією потоку на стовп дуги за рахунок прокачування через сопло середовища-діелектрика.

Зазначимо, що, згідно викладеного, в умовах реалізації різних процесів ЕРО при заданому P_d енергетична структура розрядів повинна співпадати і такі джерела тепла

для ЕРО можуть розглядатися як рівноцінні. І дійсно, якщо порівняти, наприклад, енергетичні характеристики дуги в умовах РОД [9] і енергетичні характеристики нестационарного розряду в умовах відомих способів ЕІО [10, с. 12-15], то виявляється, що це саме так. Проте, існують і відмінності. Відрізняються і технологічні можливості цих джерел тепла. Дійсно, при протіканні нестационарного електричного розряду його енергетичні характеристики змінюються в широких межах (наприклад, напруженість електричного поля в стовпі розряду може змінюватися від 4 до 0,1 кВ/см), тоді як енергетичні характеристики стаціонарного електричного розряду в умовах РОД досить стабільні (так, наприклад, незалежно від сили струму напруженість електричного поля в стовпі дуги становитиме близько 3 кВ/см). Однак з погляду фізичної суті явища – це одне і те ж, це – електричний дуговий розряд відповідних енергетичних характеристик. Можна, наприклад, сказати, що електрична іскра – це дуга з енергетичними характеристиками, що змінюються в часі, а можна, навпаки, сказати, що дуга в умовах РОД – це тривала іскра.

Таким чином, за своїми енергетичними характеристиками, а також за своїм ефектом теплової дії на метал, наприклад по величині зони термічного впливу, стаціонарна дуга в умовах РОД відповідає нестационарному (іскровому, імпульсному) електричному розряду в умовах ЕІ. Але, що ж до останнього, має важливу перевагу – вона забезпечує стабільні енергетичні характеристики, які легко регулюються незалежно від сили струму, а значить забезпечують як якісну, так і кількісну сторону процесу обробки в значно ширшому діапазоні режимів, починаючи від грубого розмірного плавлення і до найтоншого розмірного випаровування, зокрема, дозволяє реалізувати високопродуктивну обробку (десятки тисяч мм³/хв) на великій силі струму (сотні і тисячі ампер) при високій якості обробки і глибині зони термічного впливу в межах сотих доль міліметра або навіть практично при її відсутності.

Опишемо кількісні та якісні характеристики електричної дуги як джерела тепла для ЕРО.

Дугу, як відомо [1], розглядають як суму трьох джерел тепла (рис. 1), що діють, в катодній області, анодній області і стовпі дуги при напрузі дуги U_d та її довжині L_d . Схема трьох джерел тепла в дузі дає можливість представити дугу таким чином: одне джерело тепла потужністю P_k розташовано в плоскому шарі товщиною L_k на поверхні катода при падінні напруги U_k , друге потужністю P_a – в плоскому шарі товщиною L_a на поверхні анода при падінні напруги U_a , і третє потужністю P_c розташоване по об'єму стовпа дуги на довжині L_c при падінні напруги U_c . Таким чином схема трьох джерел тепла в дузі дозволяє розглядати і досліджувати дугу як єдність трьох зовсім різних за енергетичними характеристиками джерел тепла – катодного, анодного і стовпа дуги, кожне з яких в межах своєї області визначається достатньо однорідними енергетичними характеристиками.

Для оцінки дуги як джерела тепла скористаємося такою характеристикою як об'ємна густина теплової потужності на ділянках кожного з трьох зазначених джерел тепла, яка може бути визначена за формулою:

$$K = Ej, \quad (1)$$

де K – об'ємна густина теплової потужності, Вт/см³; E – напруженість електричного поля, В/см; j – густина сили струму, А/см².

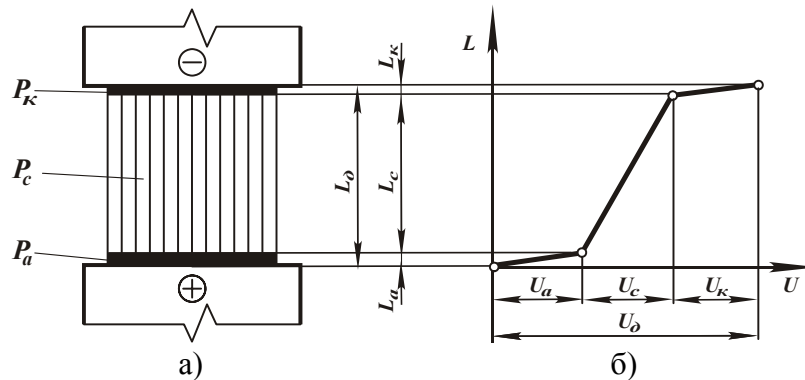


Рис. 1. Принципова схема електричної дуги як джерела тепла

Відповідно до рівняння (1) приелектродні області (катодна і анодна) внаслідок дуже високої напруженості електричного поля є потужними концентрованими плоскими джерелами тепла, тоді як стовп дуги є значно менш концентрованим об'ємним джерелом тепла.

При цьому якісні характеристики (якість) джерела тепла на катоді визначає можливість і якісну сторону процесу ерозії (обробки) катода, а якісні характеристики (якість) джерела тепла на аноді – можливість і якісну сторону процесу ерозії (обробки) анода. Порівняльна кількісна і якісна оцінки джерел тепла на катоді і аноді, у свою чергу, дозволяють встановити доцільну полярність електричної ерозії, оскільки, як відомо, ефект електричної ерозії полярний.

Стовп дуги в процесі безпосередньої обробки суттєвої ролі не відіграє. Проте, енергетичні процеси в стовпі дуги визначають енергетичні процеси на електродах і, зокрема, об'ємну густина теплової потужності в катодному і анодному джерелах тепла, а отже можливість і якісну сторону процесу обробки. Тому енергетичні характеристики стовпа дуги, що характеризуються, в першу чергу, напруженістю електричного поля і густиною сили струму і які є функцією динамічного тиску потоку, є параметрами процесу, які визначають в кінцевому підсумку, можливість і якісну сторону процесу обробки.

Оцінимо енергетичний стан плазми в стовпі дуги, який визначається концентрацією елементарних часток, температурою і тиском. Скористаємося для цього встановленими співвідношеннями [11, с. 29].

Концентрація елементарних часток (їх кількість в одиниці об'єму) може бути представлена виразом, 1/м³:

$$n = C_1 j, \quad (2)$$

де C_1 – коефіцієнт розмірності.

Температура плазми в стовпі дуги, К:

$$T = C_2 E, \quad (3)$$

де C_2 – коефіцієнт розмірності; згідно оброблених статистичних даних $C_2=150\dots200$ K/(В/см).

Тис плазми в стовпі дуги, Па:

$$p = C_3 jE, \quad (4)$$

де C_3 – коефіцієнт розмірності.

Приведені співвідношення (2, 3, 4) є важливими. Вони дозволяють просто і надійно оцінити енергетичний стан плазми в стовпі дуги з точки зору простої суті такого складного фізичного явища, яким є дуга по густині сили струму і напруженості електричного поля, що легко визначити експериментально. Зазначимо також, що в умовах процесів ЕРО електричні розряди мають чіткі оптичні межі, що дозволяє надійно визначати їх геометричні параметри, а значить густину сили струму і напруженість електричного поля. Тому приведені вище співвідношення (1, 2, 3, 4) є досить точними для практичних розрахунків.

Якість катодного і анодного джерел тепла на електродах може бути охарактеризовано поверхневою густиною теплової потужності (добуток густини сили струму на падіння напруги відповідно в катодному і анодному джерелах тепла, Вт/см²), оскільки при протіканні дуги в поперечному потоці рідини сумарна товщина катодної і анодної областей в діапазоні досліджених режимів для сталевих електродів складає, за нашими даними, всього лише 0,3...0,6 мкм і тому такі джерела тепла можна розглядати як плоскі.

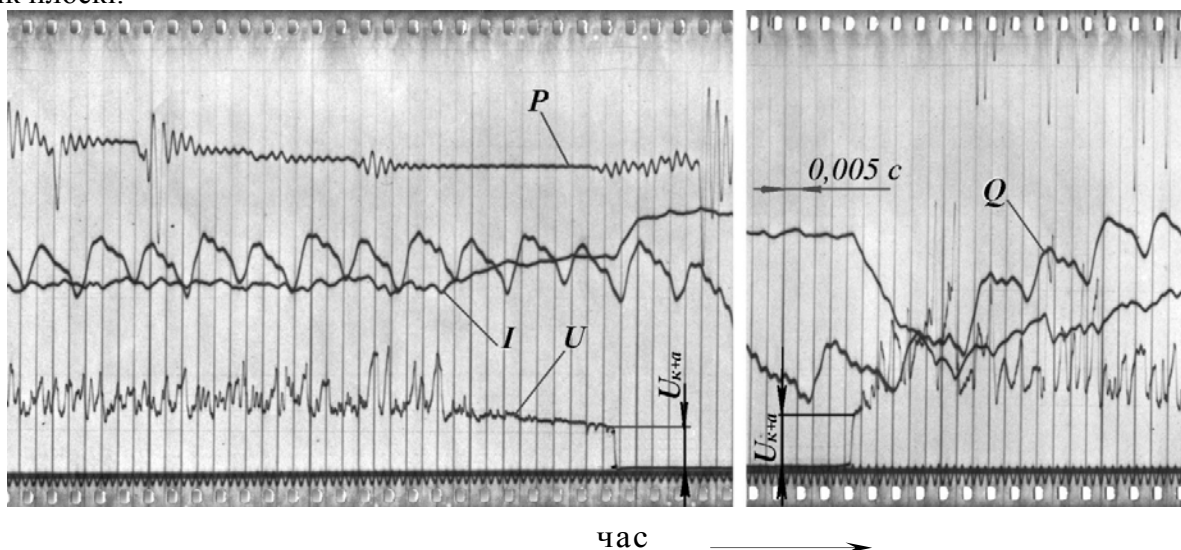


Рис. 2. Осциллограма процесу РОД: I – сила струму; U – напруга; P – статичний тиск робочої рідини; Q – розхід робочої рідини

Густина сили струму в описаних дугах визначалася в [11, рис. 6]. Вона є переважно функцією динамічного тиску потоку, в 5...10 разів перевищує густину сили струму у відкритих дугах на повітрі і збільшується (зменшується) зі збільшенням (зменшенням) динамічного тиску потоку рідини і досягає 40...50 кА/см². Сумарне значення катодного і анодного падіння напруги ($U_{к+а}$) коливається в межах 12...21 В [11].

Отже поверхнева густина теплової потужності катодного і анодного джерел тепла в діапазоні досліджених режимів досягає $5 \cdot 10^5$ Вт/см², що в десятки разів перевищує значення для відкритих дуг на повітрі. Нагадаємо також, що згідно закону Джоуля-Ленца кількість тепла, що виділяється в цих джерелах тепла, пропорційна квадрату густини сили струму. Все це підтверджує можливість реалізації процесу обробки в умовах РОД в найширшому діапазоні режимів.

Зазначимо, що якість катодного і анодного джерел тепла на електродах є функцією часу навіть в межах одного елементарного ерозійного акту, коли дуга практично нерухома. Щоб переконатись в цьому, звернемося до типової осцилограми напруги U і сили струму I (рис. 2), записаної на режимах “стійкий процес – зближення електродів до короткого замикання – розмикання електродів – стійкий процес”.

Осцилограма показує, що напруга і сила струму в часі постійно змінюються. Це зв'язано, передусім, із процесами, що відбуваються на електродах в області катодного і анодного джерел тепла, коли нестационарний процес поширення тепла від цих плоских джерел супроводжується нагрівом, плавленням і випаровуванням матеріалу електродів і, відповідно, збільшенням напруги в областях катодного і анодного джерел тепла на дузі, що, таким чином, перетворює ці плоскі джерела на об'ємні і, по суті, значно, в 1,5...2 рази і більше, збільшує їх теплову потужність, сприяючи більш інтенсивному протіканню процесу ерозії. Як наслідок глибину, структуру і твердість зони термічного впливу легко регулюють (рис. 3, а) за рахунок зміни динамічного тиску потоку робочого середовища [9] і при збільшенні останнього до відповідних значень

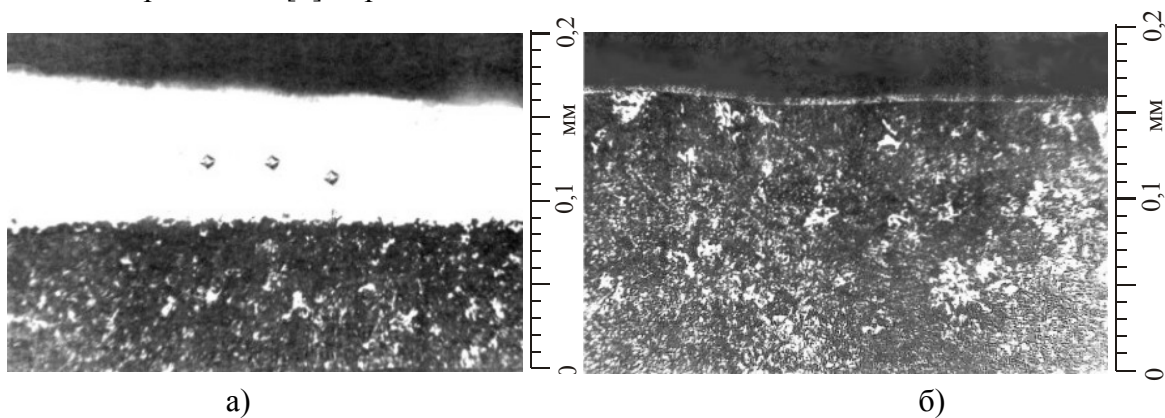


Рис. 3. Мікроструктури поверхні загартованих зразків зі сталі У8 після РОД

незалежно від сили струму ця зона може практично повністю бути відсутня (рис. 3, б).

З осцилограми видно також, що дещо відрізняються катодне і анодне джерела тепла для випадків замикання і розмикання електродів (оскільки різними є $U_{к+а}$).

Згідно викладеного на умовній схемі (рис. 4) наведемо енергетичні характеристики плазми в стовпі дуги (дугового розряду) в умовах зазначених процесів ЕРО.

Технологічні можливості електричних розрядів в умовах процесів ЕРО визначаються можливостями і діапазоном регулювання енергетичних характеристик дуги, а також можливостями реалізації різноманітних технологічних схем формування. Процеси ЕРО в своїй сукупності забезпечують регулювання енергетичних характеристик дуги в найширшому діапазоні технологічних режимів

(див. рис. 4). Реалізуються також і всі відомі технологічні схеми формоутворення при оптимальному поєднанні кількісних і якісних характеристик процесу. Але кожен із способів ЕРО має свої обмеження і свої технологічні можливості, а тому кожен з них має свою сферу раціонального застосування. Так, процеси ЕІ забезпечують високу точність розмірів і високу якість поверхні, але відрізняються низькою продуктивністю. Вони незамінні, коли неможливо застосувати прокачування робочої рідини, зокрема, при обробці малих отворів. Процеси ПО високоефективні при обробці листового металу як по зовнішньому, так і по внутрішньому контурах, якщо до одержуваних виробів не пред'являються підвищені вимоги відносно точності і якості різки. ЕМ можлива і доцільна при обробці виробів типу тіл обертання із важкооброблюваних матеріалів. РОД забезпечує оптимальне поєднання кількісних і якісних характеристик процесу (максимально високу продуктивність при високій якості обробки) і дозволяє високоефективно реалізувати всі відомі технологічні схеми формоутворення за винятком тих, коли неможливо забезпечити прокачування робочої рідини.

В умовах РОД геометричні і енергетичні характеристики дуги, а отже і технологічні характеристики процесу описуються в функції параметрів сили струму I і динамічного тиску P_d і можуть бути представлені простим співвідношенням:

$$y = kI^\alpha P_d^\beta, \quad (6)$$

де y – будь-який технологічний показник (характеристика) процесу, наприклад, продуктивність, шорсткість, глибина зони термічного впливу та інші; k – коефіцієнт розмірності; I – сила струму, А, приймається в межах від декількох ампер до декількох тисяч ампер, визначає продуктивність обробки і таким чином, по суті, відображає кількісну сторону процесу; P_d – динамічний тиск потоку, Па, вибирається в межах від 1...2 кПа до 1 МПа і більш, визначає якість обробки (шорсткість, глибину зони термічного впливу, точність) і таким чином, по суті, відображає якісну сторону процесу; α і β – показники степеню, різні для різних технологічних характеристик.

Із цього співвідношення виходить, що в умовах РОД можливо, з одного боку, ввести в зону обробки, практично, будь-які потужності, від найменших до найбільших, а отже забезпечити будь-яку доцільну продуктивність, а, з іншого боку, можливо реалізувати обробку в найширшому діапазоні режимів, від розмірного плавлення до тонкого розмірного випаровування при відповідній зміні якості обробки – і це незалежно від сили струму. І досягається це мобільно, в потрібний час, в потрібному місці простим регулюванням I і P_d .

Згідно викладеного звернемось до переваг процесів ЕРО порівняно з обробкою різанням і тиском:

1. Вихідний енергоносій (електроенергія) не перетворюється на силову енергію (тобто не потрібний двигун і відповідні ланки кінематичного ланцюга верстата), а реалізується в зоні обробки безпосередньо, виконуючи відповідну операцію в потрібному місці, в потрібний час і з необхідними якістю, продуктивністю і точністю обробки; при цьому продуктивність і якість обробки, наприклад при РОД, можуть бути

змінені простим регулюванням сили струму і динамічного тиску потоку робочої рідини. В результаті верстат стає значно простим і дешевим, а процес стає мобільним.

2. Обробка здійснюється без помітних механічних зусиль на інструмент (силове різання відсутнє) і без силової дії на заготовку. Відповідно виключається необхідність передачі значних механічних зусиль через систему ВПД, що дозволяє помітно спростити і здешевити верстат в цілому.

3. Немає необхідності застосування спеціальних інструментів, твердіших, ніж оброблюваний метал. Інструмент (електрод) помітно простіший і дешевший, ніж інструменти, вживані при традиційних методах металообробки (різець, свердло, протяжка, штамп).

4. Продуктивність обробки не залежить від твердості і в'язкості оброблюваного металу, що дуже важливо в умовах все зростаючого застосування важкооброблюваних матеріалів.

5. Широкі можливості реалізації різноманітних технологічних схем формоутворення як непрофільованим, так і, особливо, профільованим електродом, зокрема, копіювання форми електрода на поверхню заготовки при простому поступальному русі електрода, що дозволяє отримати аналогічно процесу штампування різноманітні отвори, порожнини, стержні і інші вироби складної форми. При цьому для реалізації таких операцій потрібні порівняно прості і дешеві верстати і відносно дешеві електроди, на відміну від традиційних методів металообробки, коли для досягнення того ж результату потрібні металоємкі, достатньо дорогі, часто унікальні верстати і преси та порівняно дорогі інструменти.

6. Можливо виконувати ряд технологічних операцій, які не можуть бути виконані іншими методами обробки, наприклад різноманітні глибокі отвори у важкооброблюваних матеріалах.

Переваги технологій, простота реалізації, досягнутий рівень розробок роблять процеси ЕРО в своїй сукупності високоефективною альтернативою традиційним процесам обробки різанням і тиском як в інструментальному і інших елітних виробництвах, так і в основному виробництві для виготовлення серійних деталей.

Це означає, що металообробка отримала якісно новий, високоефективний, універсальний, з надзвичайно широкими технологічними можливостями „інструмент” обробки, що представляє джерело тепла у вигляді електричного дугового розряду найрізноманітніших форм його прояву, який дозволяє, по-перше, реалізувати практично всі можливі технологічні схеми формоутворення, по-друге, забезпечує оптимальне поєднання кількісних і якісних характеристик процесу обробки і, по-третє, все це порівняно з процесами обробки різанням і тиском, реалізується простішими засобами (технікою і інструментом). Це означає, що в металообробці на зміну “ери сили” приходять “ера тепла”. Означає це, скажемо і так, що прогрес металообробки переходить “з вістря різця” на “кромку електрода” і, таким чином, об'єктивно, ЕРО – це наступний етап розвитку металообробки.

Висновки

1. Технологічні можливості ЕФ визначаються якісними та кількісними характеристиками їх джерел тепла, які власне, є інструментом обробки і це саме те, що

в кінцевому підсумку, визначає області раціонального застосування зазначених процесів.

2. Лазер, коли носієм енергії є електромагнітна хвиля і коли густина потоку енергії досягає 10^9 Вт/см² при максимальній потужності лазера ~ 5 кВт, отримав і надалі буде отримувати все більш широке застосування.

3. Електронно-променева обробка, коли носієм енергії є заряджені частки і коли густина потоку енергії досягає $5 \cdot 10^8$ Вт/см² та за малих розмірів поперечного перерізу електронного променя, має застосовуватись перш за все, щоб отримати глухі та наскрізні отвори або ж заданий контур малих поперечних перерізів до $5 \dots 10$ мкм [2, с. 22].

4. Процеси ЕРО, що включають ЕІ, ЕМ, РОД та ПО і які засновані на використанні електричного дугового розряду, при густині потоку енергії до 10^6 Вт/см² забезпечують регулювання енергетичних характеристик дуги в найширшому діапазоні технологічних режимів. Реалізуються також і всі відомі технологічні схеми формоутворення при оптимальному поєднанні кількісних і якісних характеристик процесу. Але кожен із способів ЕРО має свої обмеження і свої технологічні можливості, а тому кожен з них має свою область раціонального застосування. Викладені переваги цих технологій, простота здійснення, досягнутий рівень розробок роблять процеси ЕРО високоефективною альтернативою традиційним процесам обробки різанням і тиском. Об'єктивно, ЕРО – це наступний етап розвитку металообробки, коли, скажемо так, на зміну „ери сили” приходить „ера тепла”. При цьому саме процес РОД став стрибком, якісно новим етапом в розвитку металообробки в цілому, оскільки викладені переваги процесів ЕРО виявилось можливим реалізувати повною мірою лише після появи РОД.

Список літератури

1. Носуленко В. И. О физической природе, общем, отличиях и технологических возможностях электрических разрядов и классификации способов электроразрядной обработки металлов // Электронная обработка материалов, Кишинев, 2006, № 1. – С. 8-18.
2. Подураев В. Н. Технология физико-химических методов обработки. – М.: Машиностроение, 1985. – 264 с. ил.
3. Артамонов Б. А., Волков Ю. С., Дрожалова В. И. и др. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов: Учеб. пособ.(в 2-х томах). Т. 2 Обработка материалов с использованием высококонцентрированных источников энергии / Под ред. Смоленцева. – М.: Высш. шк., 1983. – 208 с. ил.
4. Лившиц А. Л. и др. Электроимпульсная обработка металлов. М.: Машиностроение, 1967.
5. Сомервилл Дж. М. Электрическая дуга. Пер. с англ. “Госэнергоиздат”, 1962.
6. Финкельбург В., Меккер Г. Электрические дуги и термическая плазма. М.: Изд-во иностр. лит., 1962.
7. Лесков Г.И. Электрическая сварочная дуга. М.: Машиностроение, 1970.
8. Золотых Б. Н. Основные вопросы теории электрической эрозии в импульсном разряде в жидкой диэлектрической среде: Автореф. дис. докт. техн. наук/МИЭМ – М., 1968.
9. Носуленко В. И. Размерная обработка металлов электрической дугой // Электронная обработка материалов, 2005, № 1. – С. 8-17.
10. Золотых Б. Н. Основные вопросы теории электрической эрозии в импульсном разряде в жидкой диэлектрической среде: Автореф. дис. докт. техн. наук/МИЭМ – М., 1968.
11. Носуленко В. И. Электрическая дуга в поперечном потоке среды-диэлектрика как источник тепла для новых технологий // Электронная обработка материалов, 2005, № 2. – С. 26-33.