

УДК. 621. 9. 048.4

**В.І. Носуленко, проф., д-р техн. наук, О.В. Шелепко, асп.**  
*Кіровоградський національний технічний університет*

## Розмірна обробка електричною дугою непрофільованим електродом-інструментом як альтернатива традиційним технологіям

Запропоновано розмірну обробкою дугою (РОД) непрофільованим електродом-інструментом (ЕІ) як високоефективну альтернативу традиційним технологіям обробки важкооброблюваних металів, таких як обробка різанням, описано особливості та принципові схеми формування РОД непрофільованим ЕІ.

**метали, обробка, різання, електрообробка, непрофільований електрод, РОД, формування, схеми**

Важкооброблювані матеріали, такі як високоміцні загартовані сталі, тверді сплави, жароміцні сталі і спеціальні сплави отримують все більш ширше застосування. За умов обробки різанням цих сплавів виникають проблеми стійкості ріжучого інструменту та забезпечення достатньої продуктивності [1]. Ці проблеми усувають електричні способи обробки, наприклад плазмова обробка [2]. Проте при цьому на обробленій поверхні утворюється оплавлений шар, а отже спостерігається велика зона термічного впливу. Застосування анодно-механічної обробки [3] також не усуває цих недоліків. Високу якість обробки забезпечує електроіскрова обробка. Проте такий процес відрізняється низькою продуктивністю. Достатньо високу продуктивність забезпечує обробка з використанням низьковольтної електричної дуги постійного струму (обробка короткою дугою) [4], яку використовують для високоефективної попередньої, напівчистої, а в цілому ряді випадків і чистої обробки. Впровадження такого процесу стримується шумовими ефектами та обмеженими технологічними можливостями.

Недоліки цих процесів можуть бути усунуті, при використанні процесу РОД [5] профільованим ЕІ по принципу прошивання з об'ємним копіюванням форми ЕІ. Проте при порівняно великих розмірах поверхні обробки зростають розміри ЕІ, збільшується витрати рідини, погіршується якість обробленої поверхні та зростають питомі витрати електроенергії, зростають також габарити, потужність та вартість обладнання та оснастки. Широке впровадження такого процесу стримується обмеженими можливостями однокоординатного руху ЕІ.

Зазначені проблеми можуть бути в відомих межах вирішені за умови використання процесу РОД непрофільованим ЕІ. При цьому забезпечується як кількісна, так і якісна сторона обробки, а параметри процесу не залежать від розмірів поверхні чи порожнини, що обробляється. Це дозволяє також забезпечити багатокординатні переміщення ЕІ. Проте такий процес вимагає вивчення фізико-технологічних особливостей, розробки та впровадження у виробництво конкретних технологій, верстатів і пристроїв.

В цьому зв'язку, перш за все, розглянемо технологічні схеми формування РОД непрофільованим ЕІ.

В умовах РОД енергетичні характеристики розряду (густина сили струму, напруженість електричного поля), а отже і технологічні характеристики процесу регулюються легко, плавно і в широкому діапазоні за рахунок зміни динамічного тиску потоку та струму обробки. При цьому фізична моделі процесу РОД описується простим співвідношенням (1):

$$y = kI^\alpha P_d^\beta, \quad (1)$$

де  $y$  – будь-який технологічний показник (характеристика) процесу, наприклад, продуктивність, шорсткість, глибина зони термічного впливу і інше;

$k$  – 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 1МПа і більше, визначає якісну обробку (шорсткість, глибину зони термічного впливу, точність) і таким чином, по суті, відображає якісну сторону процесу;

$\alpha$  і  $\beta$  – показники степені, різноманітні для різних технологічних характеристик:

Як наслідок, в умовах такого процесу, з однієї сторони можна ввести в зону обробки, практично, будь які потужності, від найменших до найбільших, а отже забезпечити будь-які потрібну продуктивність, а, з іншого боку, можливо реалізувати обробку в самому широкому діапазоні режимів, від розмірного плавлення до тонкого розмірного випаровування при відповідній зміні якості обробки – це незалежно від сили струму. І досягається це мобільно, в потрібний час, і потрібному місці простим регулюванням  $I$  і  $P_d$  при використанні дуже простого обладнання і при наявності простого і дешевого інструменту. Таким чином, динамічний тиск потоку робочої рідини та струм обробки в умовах РОД є основними параметрами процесу, що визначають можливість і якісну сторону процесу обробки. Для якісної обробки поверхні необхідно забезпечити динамічний тиск робочої рідини не менше 0,2...0,3 МПа. [5,6].

Принципова схема формоутворення РОД наведена на рис 1. Потік робочої рідини підводять до передньої формоутворюючої поверхні ЕІ, а відводять зі сторони задньої робочої поверхні ЕІ, що прилягає до менш чистої за умови виготовлення поверхні заготовки, звичайно, в сторону припуску на обробку, напуску (збільшеного припуску), чи відходу. Таке технічне рішення дозволяє оптимально використати стаціонарну електричну дугу в поперечному потоці рідини як джерело тепла для розмірної обробки металів, оскільки така дуга має несиметричну енергетичну структуру, а саме, зі сторони потоку який набігає на неї, її енергетичні характеристики вищі, її «ріжучі» властивості кращі, ніж із задньої сторони, де потік залишає ЕІ. Фізичний процес електричної ерозії в умовах РОД характеризується безперервним підводом енергії в зону обробки, безперервним горінням дуги і безперервним існуванням джерела тепла на електродах. Відповідно, безперервна теплова дія розряду на заготовку, отже, безперервно відбувається процес ерозії. При цьому фізична природа існування стаціонарної електричної дуги передбачає дискретний характер її переміщення по поверхні ЕІ [6].

Згідно зазначеного розроблено наступні принципові схеми формоутворення РОД непрофільованим ЕІ:

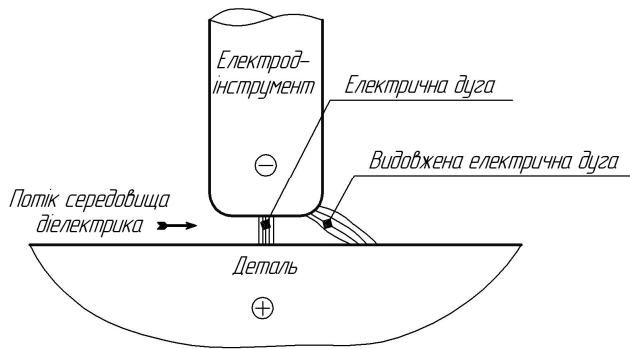


Рисунок 1 – Принципова схема формоутворення РОД

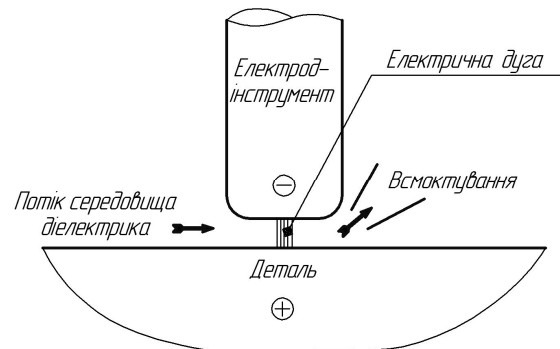


Рисунок 2 – Схема формоутворення при відведенні рідини через сопло

а) спосіб РОД, згідно якого для забезпечення якості обробленої поверхні зі сторони задньої робочої поверхні ЕІ встановлюють сопло для всмоктування потоку робочої рідини. Це дозволяє забезпечити необхідну швидкість потоку, що залишає ЕІ, а отже забезпечується висока якість обробленої поверхні (Рис.2)

б) спосіб РОД, згідно якого для підвищення якості обробленої поверхні, зменшення розбризкування робочої рідини, гасіння світлових і звукових ефектів на задню робочу поверхню ЕІ, окрім встановленого сопла для всмоктування, подають додатковий потік робочої рідини на зустріч потоку який виходить із міжелектродного зазору, чи перпендикулярно до нього (потоку), або на задню поверхню електрода, або на заготовку в зоні виходу потоку рідини з міжелектродного зазору (рис.3). Це дозволяє локалізувати зону обробки за рахунок її запирання робочою рідиною, в зв'язку з чим такий додатковий потік робочої рідини називають запираючим потоком.

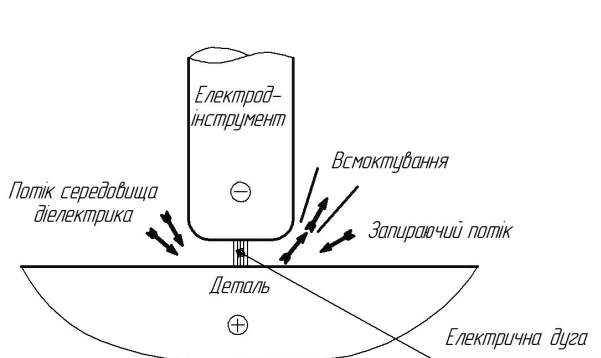


Рисунок 3 – Схема процесу при відведенні рідини через сопло і з використанням додаткового потоку затоплення

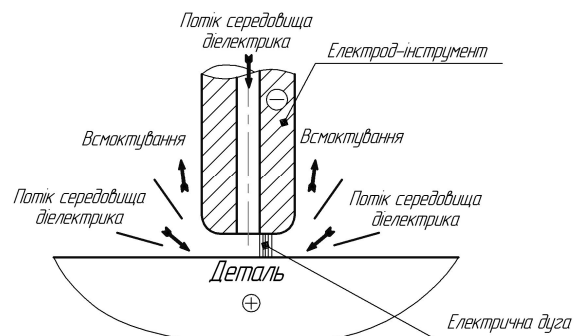


Рисунок 4 – Схема процесу при подачі рідини в порожнину ЕІ при відведенні рідини через сопло із використанням додаткового потоку затоплення

в) спосіб РОД, згідно якого використовують порожнистий ЕІ з отвором (рис.4), що є загальновідомим технічним рішенням для оптимального підведення робочої рідини високого тиску в зону обробки. Проте, при цьому існує необхідність в локалізації робочої зони обробки з метою забезпечення якості обробки, зменшення світлових і звукових ефектів від розряду, зменшення розбризкування і видалення робочої рідини разом з продуктами ерозії із зони обробки, щоб забезпечити належний рівень санітарно гігієнічних умов праці. Найбільш простим рішенням, є використання кільцевого сопла. З його допомогою, назустріч потоку робочої рідини, що виходить із міжелектродного зазору, переважно на заготовку, подають додатково потік (так званий потік запирання) регульованого тиску, а надалі, отриманий сумарний потік робочої

рідини, разом з продуктами ерозії, також за допомогою кільцевого сопла, спрямовують у напрямку зливної магістралі за рахунок само течії чи всмоктування.

г) спосіб РОД, згідно якого, як і у вищезазначеному способі, використовують порожнистий електрод з отвором, проте прокачування робочої рідини відбувається у зворотному напрямку (рис.5). Це означає, що робочу рідину поміж ЕІ і деталлю подають примусовим потоком через кільцеве сопло, а всмоктування відбувається через порожнину в ЕІ. Це дозволяє покращити якість периферії зони обробки, і уникнути явища видовжених дуг.

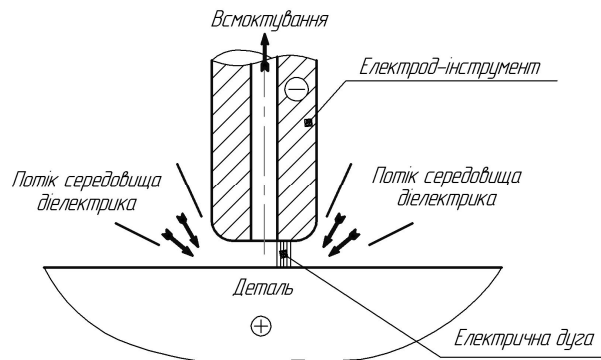


Рисунок 5 – Схема процесу при використанні зворотного прокачування

Наведені технологічні схеми формоутворення РОД непрофільованим ЕІ вимагають подальшої розробки та реалізації в умовах конкретних технологій, що передбачає розробку та впровадження у виробництво відповідних технічних рішень у вигляді так званих електроерозійних головок (ЕЕГ) і, в кінцевому підсумку, створення верстатів, що мають забезпечити відповідні рухи подачі ЕЕГ, а отже і електрода-інструмента (ЕІ). ЕЕГ мають забезпечити, по-перше, необхідні гідродинамічні характеристики робочої рідини в зоні обробки та на виході з міжелектродного зазору, де, щоб уникнути явища видовжених дуг, динамічний тиск робочої рідини має складати не менше 0,1...0,3 МПа.,. По-друге, необхідно створити передумови для видалення робочої рідини разом з продуктами ерозії із зони обробки в магістраль зливу. Для цього, передбачають додатковий потік рідини, що локалізує зону обробки, забезпечує збереження швидкості на виході з міжелектродного зазору та створює передумови за для подальшого руху робочої рідини в напрямку зливної магістралі, що, в цілому, і обумовлює конструктивні особливості ЕЕГ.

В цьому зв'язку необхідно виконати теоретичні дослідження гідравлічних течій робочої рідини як на окремих ділянках так і у відповідних перерізах в цілому по мережі, від насосу і до виходу робочої рідини з міжелектродного зазору. Для таких розрахунків використовують рівняння Бернуллі для потоку реальної рідини (2) [7], а саме:

$$\gamma z_1 + p_1 + \gamma \frac{a_1 v_1^2}{2g} = \gamma z_2 + p_2 + \gamma \frac{a_2 v_2^2}{2g} + \lambda \zeta_{\text{мережі}}, \quad (2)$$

де  $\gamma$  – вага рідини в одиниці об'єму;

$z$  – ордината визначаюча висоту положення центру вибраного перерізу над довільною горизонтальною площиною порівняння;

$p$  – статичний тиск потоку в даному перерізі;

$\gamma \frac{a_1 v_1^2}{2g}$  – динамічний тиск потоку в даному перерізі;

$\zeta_{мережі}$  – загальний коефіцієнт втрати повного тиску у мережі.

Однією із складових рівняння (2) є загальний коефіцієнт втрати повного тиску як в окремій ділянці так і по всій мережі в цілому, що рахують за формулою (3) [8]:

$$\zeta_{мережі} \equiv \frac{\Delta P_{мережі}}{\rho w^2 / 2} = \sum_{i=1}^n \zeta_i, \quad (3)$$

де  $\Delta P_{мережі}$  – загальні втрати повного тиску всієї мережі;

$\rho$  – густина компоненту, кг/м<sup>3</sup>;

$w$  – швидкість компоненту, м/с;

$\zeta_i = \frac{\Delta P_i}{\rho_i w_i^2 / 2}$  – коефіцієнт опору даного  $i$ -го елемента мережі приведений до

швидкості  $w_i$  в прийнятому перерізі мережі  $F_i$ , він також, як правило, включає в себе поправку на взаємний вплив близько розташованих елементів мережі;

$\Delta P_i$  – загальні втрати повного тиску в  $i$ -му перерізі.

Зважаючи на те, що мережа подачі робочої рідини складається з великої кількості змінних перерізів, які потребують розрахунку, останній значно ускладнюється. Зважаючи на це раціональним є використання ПК з встановленим на ньому спеціальним модулем для розрахунку гідродинамічних показників течії, що значно спрощує розрахунки. Для цього доцільно використовувати модуль COSMOSFLO works [9].

Запропоновано та описано технологічні схеми формоутворення РОД непрофільованим ЕІ, які відрізняються тим, що, по-перше, зі сторони задньої робочої поверхні ЕІ встановлюють сопло для всмоктування потоку робочої рідини; по-друге, подають додатковий потік назустріч потоку який виходить із міжелектродного зазору, перпендикулярно до нього (потоку), або на задню поверхню електроду, або на заготовку в зоні виходу потоку рідини із міжелектродного зазору; по-третє, робочу рідину подають через порожнистий електрод, а назустріч потоку робочої рідини, що виходить із міжелектродного зазору за допомогою кільцевого сопла, переважно на заготовку, подають додатково потік запирання; по-четверте, робочу рідину поміж ЕІ і деталлю подають примусово потоком через кільцеве сопло, а всмоктування відбувається через порожнину в електроді.

Наведені технологічні схеми формоутворення РОД непрофільованим ЕІ вимагають подальшої конструкторської розробки та реалізації в умовах конкретних технологій, що передбачає розробку та впровадження у виробництво відповідних технологічних рішень у вигляді так званих електроерозійних головок (ЕЕГ) і, в кінцевому підсумку, створення верстатів. Також в наведених схемах формоутворення існує проблема локалізації зони обробки з одночасним забезпеченням необхідних динамічних тисків робочої рідини на виході з міжелектродного зазору. Тому є необхідним виконати математичні розрахунки течій робочої рідини як на окремих ділянках, так і загалом в мережі.

Запропоновані технологічні схеми формоутворення дозволяють забезпечити необхідну якість обробленої поверхні, звести до мінімуму звукові і шумові ефекти від розряду, забезпечити належний рівень санітарно гігієнічних умов праці. В подальшому є необхідним розробка конструкції ЕЕГ і оптимізації її у відповідності з необхідними

гідродинамічними характеристиками робочої рідини з одночасним забезпеченням відповідних рухів ЕІ під час обробки. Для досягнення поставленої мети необхідно виконати розрахунки гідравлічних потоків робочої рідини в мережі як з використанням математичних формул так і (для спрощення розрахунку) спеціального розрахункового модуля COSMOSFLO works.

## Список літератури

1. Подураев В.Н. Резание труднообрабатываемых материалов: [Учеб. Пособие для вузов.]/В.Н. Подураев. – М.: Высш. школа, 1974.-587 с.
2. Потапов В.А. Опыт эксплуатации лазерных и плазменных установок для резки на заводах./В.А.Потапов// Сварщик.-2000.-№6.-С.32-36.
3. Рябов И.В. Станок с ЧПУ для электроэрозионной обработки короткой дугой./ И.В.Рябов, Б.М. Левченко, А.М. Донцов, А.В. Климов, В.Н. Минаков// Электроэрозионная обработка материалов. – 1988. – С. – 70.
4. Артамонов Б.А. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов. / Б.А. Артамонов, Ю.С. Волков, В.И. Дрожалова и др.// Обработка материалов с применением инструмента. – 1983. – Т.2, №2. – С. 247.
5. Носуленко В.И. Электрическая дуга в поперечном потоке среды – диэлектрика как источник тепла для новых технологий /В.И. Носуленко// Электронная обработка материалов, – 2005. – № 2. – С. 26-32
6. Носуленко В.И. Размерная обработка металлов электрической дугой / В.И. Носуленко // Электронная обработка материалов, – 2005. – № 1. – С.8-17
7. Вильмер Я.М. Справочное пособие по гидравлике, гидромашинам и гидроприводам/ Я.М. Вильмер, Я.Т. Ковалев, Б.Б. Некрасов.; Под ред. Б.Б. Некрасова. – Минск: Высшей школы, 1976
8. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И.Е. Идельчик.; Под ред. М.О. Штейнберга.–3-е., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.
9. SolidWorks Flow simulation [Электронный ресурс] // Официальный сайт разработчика – Режим доступа к ресурсу: <https://www.solidworks.com/sw/products/cfd-flow-analysis-software.htm>

*В. Носуленко, А. Шелепко*

**Размерная обработка электрической дугой непрофилированным электродом-инструментом как альтернатива традиционным технологиям**

Предложено размерную обработку дугой (РОД) непрофилированным электродом-инструментом (ЭИ) как высокоэффективную альтернативу традиционным технологиям обработки тяжелообрабатываемых металлов, таких как обработка резаньем, описаны особенности и принципиальные схемы формообразования РОД непрофилированным ЭИ.

*V.Nosylenko, A.Shelepko*

**Size treatment a voltaic arc by the unprofiled electrode-instrument as an alternative to traditional technologies**

It is offered size treatment an arc (STA) by the unprofiled electrode-instrument (EI) as a highly technological alternative to traditional technologies of treatment of heavy treatment metals, such as treatment cutting, described features and fundamental charts of receipt form with a help STA by the unprofiled electrode-instrument

Одержано 22.02.11