

**В.І. НОСУЛЕНКО**, д-р техн. наук, професор,

Кіровоградський національний технічний університет;

**О.С. ЧУМАЧЕНКО**, канд. техн. наук, докторант, НТУУ „КПІ”, Київ

## **ДИНАМІКА ЕЛЕКТРИЧНОГО РОЗРЯДУ ПРИ ВИХОДІ ПОТОКУ З МІЖЕЛЕКТРОДНОГО ЗАЗОРА**

Наведено результати досліджень динаміки електричних характеристик стаціонарного дугового розряду в поперечному потоці рідини при виконанні розділових операцій листового металу. При однаковій підведеній електричній потужності на різних ділянках зони обробки отримують розряди різних енергетичних характеристик. Запропоновано конструктивні елементи для збереження швидкості потоку при його виході із зони обробки і отримання якісних поверхонь.

Приведены результаты исследований динамики электрических характеристик стационарного дугового разряда в поперечном потоке жидкости при выполнении разделительных операций листового металла. При одинаковой подведенной электрической мощности на разных участках зоны обработки получают разряды разных энергетических характеристик. Предложены конструктивные элементы для сохранения скорости потока при его выходе из зоны обработки и получение качественных поверхностей.

The results of researches of dynamics of electric descriptions of stationary arc digit are resulted in the transversal stream of liquid at implementation of sheet-metal dividing operations. At the identical brought electric power on the different areas of area of treatment get the digits of different power descriptions. Structural elements are offered for the maintainance of flowrate on his leaving from the area of treatment and receipt of high-quality surfaces.

**Вступ.** В умовах розмірної обробки металу стаціонарною електричною дугою (РОД) [1] керування енергетичними характеристиками розряду (густина струму, напруженість електричного поля) і технологічними параметрами процесу обробки (продуктивність, якість) здійснюють шляхом регулювання сили струму  $I$  і динамічного тиску  $P_d$  потоку робочого середовища. Зазначені характеристики для визначених матеріалу, полярності електродів, складу робочої рідини, можуть бути розраховані за відомими степеневими залежностями [2]:

$$y = k \cdot I^a \cdot P_d^b, \quad (1)$$

де  $y$  – відповідний технологічний параметр (шорсткість, глибина зони термічного впливу та інше);  $k$  – коефіцієнт розмірності;  $I$  – технологічна сила струму обробки, А;  $a$  і  $b$  – показники степеню;  $P_d = \rho v^2 / 2$  – динамічний тиск потоку робочої рідини в зазорі, Па.

При виконанні розділових операцій листового металу (РОД отворів і зовнішніх контурів) звичайно застосовують технологічні схеми формоутворення прямого копіювання форми електрода-інструмента (ЕІ) на заготовку (ЕЗ) при прямому (рис. 1, а) і зворотному (рис. 1, б, в) прокачуванні

робочої рідини. Протікання розрядів відбувається переважно на ділянці II міжелектродного зазора (МЕЗ), тобто робочим є нижній торець ЕІ. Довжину і конфігурацію ділянки I проектують так, щоб забезпечити мінімальну втрату тиску при його переході із статичного  $P_{ст}$  в динамічний  $P_d$  [3]. Динамічний тиск  $P_d$  визначається статичним тиском робочої рідини на вході в міжелектродний зазор (МЕЗ), гідравлічним опором траси евакуації продуктів ерозії в межах міжелектродного зазора та місцевими гідравлічними опорами і є функцією координати зони обробки.

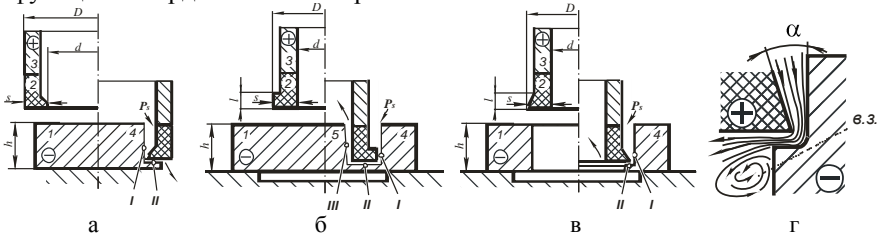


Рисунок 1 – Технологічні схеми формоутворення РОД: 1 – ЕЗ, 2 – ЕІ, 3 – електродотримач, 4 – оброблена деталь, 5 – відхід; \* – зліва – початок обробки, справа – проміжна стадія обробки; I – поверхня, на яку надходить робоча рідина; II – основна ділянка роботи дуги; III – ділянка, через яку рухається відпрацьована рідина

Втрати по довжині траси неминучі, оскільки визначаються формою виробу, а величину місцевих втрат можна коригувати і звести до мінімуму. Внаслідок втрат тиску в місцевих опорах  $\Delta p_m$  (вхід в зазор, зміна напрямку потоку, вихід із зазора) та через тертя  $\Delta p_{тр}$  швидкість потоку по довжині МЕЗ зменшується порівняно зі швидкістю на вході в зазор. При виході потоку із зазора (рис. 1, а, в), внаслідок його раптового розширення, швидкість потоку  $v$  падає до нуля і утворюється вихорна зона (в.з.) (рис. 1, г).

**Постановка проблеми.** Зміни гідродинамічних режимів руху рідини по висоті міжелектродного зазора і по довжині траси викликають зміни якісних характеристик джерел тепла на електродах, згідно виразу (1), що приводить до отримання нерівномірної якості на різних ділянках обробленої поверхні. Порушення течії рідини дестабілізує процес, знижує продуктивність і якість обробки. Дослідження динаміки розряду при його взаємодії з потоком в міжелектродному зазорі і вибір оптимальних конструктивних особливостей інструмента обробки і пристрою є важливими, оскільки забезпечення рівномірної течії рідини в зазорі, зменшення місцевих втрат тиску, організація потоку за рахунок застосування відповідних конструктивних елементів в технологічних схемах формоутворення та оптимальної форми ЕІ дозволить стабілізувати процес, підвищити його ефективність.

**Мета роботи** – дослідження динаміки електричного розряду в МЕЗ, зокрема при виході потоку із зазора, та розробка заходів по забезпеченню потрібних енергетичних характеристик розряду при виході потоку із МЕЗ для

отримання визначеної технологічним процесом якості по всій поверхні оброблюваної деталі.

**Схема формоутворення та динаміка розряду.** Дослідження динаміки розряду при різних швидкостях потоку в зоні обробки виконували на зразках, представлених на рис. 2 при варіюванні сили струму  $I$  в межах 50-400 А, робочої напруги  $U = 25-32$  В, статичного тиску робочої рідини (суміш масло індустріальне та гас освітлювальний у рівній кількості) на вході в МЕЗ Рст = 0,5-1,7 МПа.

На рис. 3 приведено типові кадри швидкісної кінозйомки дуги, що протікає в поперечному потоці робочої рідини між трубчатими електродами: анодом з міді (розташований згори) та графітовим катодом (знизу); частота кінозйомки 4000 кадр/с, експозиція 1/20000 с. Чіткі оптичні межі розрядного каналу (рис. 3, а-е) свідчать про адиабатичний процес взаємодії розряду із навколишнім середовищем. При збільшенні потужності розряду і зменшенні динамічного тиску середовища збільшується поперечний переріз розрядного каналу та починається потужний теплообмін із навколишнім середовищем, про що свідчать зростаючі оптичні ефекти (рис. 3, ж-м).

Виникненню електропровідних каналів розряду в МЕЗ відповідають коливання сили струму  $I$  та напруги  $U_d$  на осцилограмах (рис. 4, 5). Першому пробую відповідає падіння напруги від значень холостого ходу до 25-30 В. При досягненні максимального значення сили струму шляхом теплового пробую утворюється паралельний канал провідності внаслідок поглинання в потоці рідини потужного електромагнітного випромінювання розрядного каналу. Через зростання опору на ділянці першого розряду протікання струму припиняється. Процес повторюється на наступній ділянці.

Характер коливань сили струму і напруги на початку процесу обробки отворів (рис. 2, а) досить стабільний (рис. 4, а). При заглибленні ЕІ різниця по швидкості потоку середовища на вході в зазор та інших ділянках траси суттєво зростає. Оскільки розрядний канал часто переміщується в напрямку

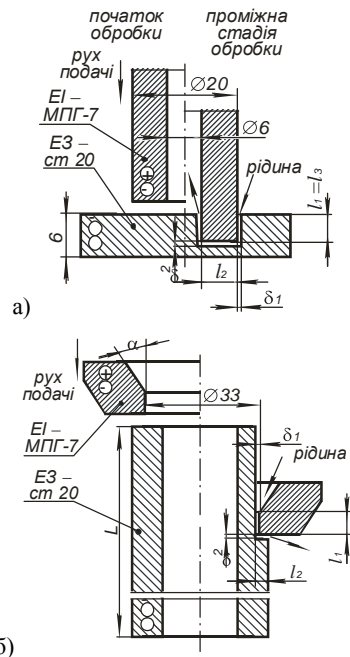


Рисунок 2 – РОД листових деталей:  
а – отворів; б – зовнішніх контурів

поток [4], на осцилограмах це спостерігається як серія розрядів із подібними електричними параметрами (рис. 4, б).

При завершенні обробки отворів коли швидкість потоку падає, між Е1 та Е3 утворюється малорухома зварювальна дуга, що відповідає значному збільшенню напруги дуги на осцилограмі (рис. 4, в). Таким коливанням напруги відповідають елементарні ерозійні акти із утворенням продуктів ерозії діаметром до 5 мм, подібно крупнокрапельному перенесенню матеріалу у зварювальній дузі. Зростання напруги при формуванні продуктів ерозії пояснюють ростом електричного опору вуглецевих сталей в 5-6 разів при температурах плавлення [5].

При обробці зовнішніх контурів деталей, заготовки набирають на оправку, закріплену в пристрої і, таким чином виконують обробку пакетів деталей (див. рис. 2, б). Форма і розміри отримуваної деталі відповідають контуру отвору в Е1 і відрізняються на величину МЕЗ. Цим способом можна отримати як готові деталі, так і заготовки для подальшої обробки на чистових режимах РОД або механічної обробки.

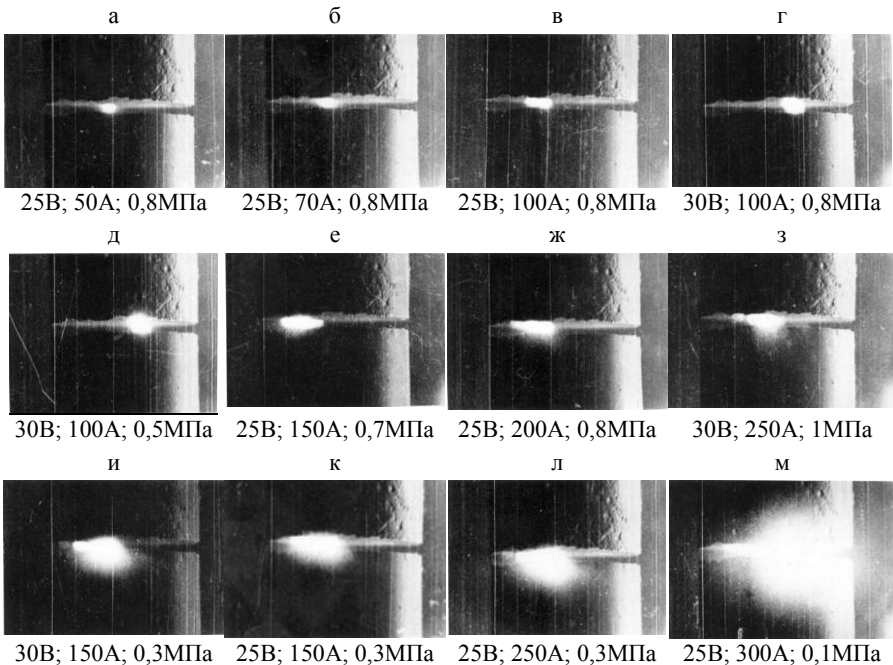


Рисунок 3 – Вплив електричної потужності розряду та динамічного тиску поперечного потоку робочого середовища на ступінь стиснення провідного каналу

Амплітуда коливань електричних параметрів та тривалість ерозійних актів при обробці зовнішніх контурів звичайно менша, ніж при отриманні

отворів (рис. 5, а). При силі струму 50-70 А видовжені дуги практично не утворюються. Їх поява має місце при зростанні підведеної електричної потужності (рис. 5, б). В такий спосіб видаляється більша частина припуску. При цьому тривалість елементарних ерозійних актів зростає від 600 мкс до 5000 мкс. Згідно осцилограми, з 470 по 510 мкс розряди протікали на ділянці входу потоку в зазор, а в інший час – дуги були видовжені.

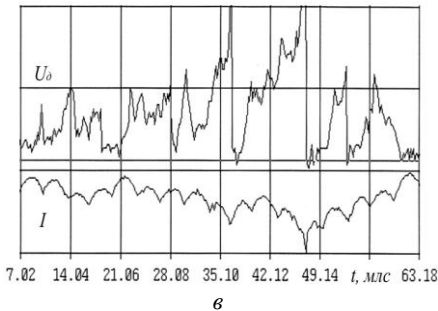
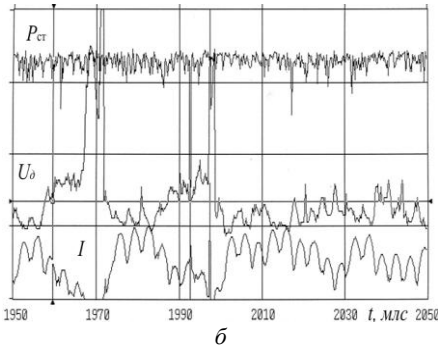
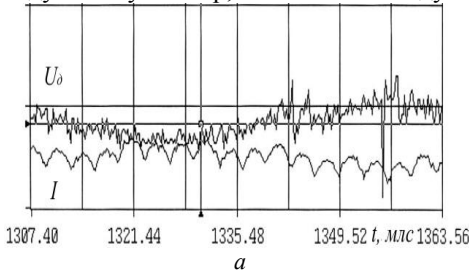


Рисунок 4 – Осцилограми РОД отворів:  
а, б – 25В, 100А, 0,8МПа;  
в – 30В, 150А, 0,1МПа

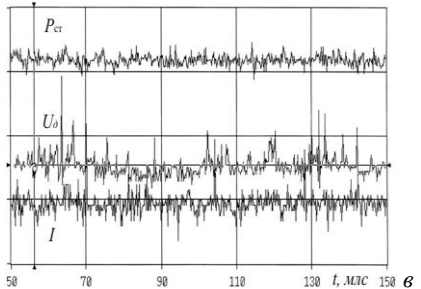
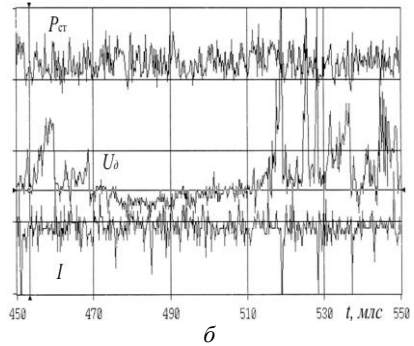
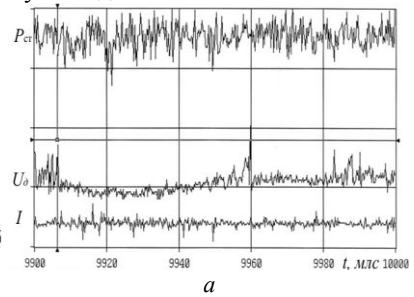


Рисунок 5 – Осцилограми РОД калібрування припуску 2-4 мм: а – 25В, 70А, 0,6МПа; б – 32В, 100А, 0,5МПа; в – 25В, 150А, 0,8МПа

При збільшенні статичного тиску на вході в зазор до 1,7 МПа і, відповідно, швидкості потоку, електричні параметри стають більш

стабільними (рис. 5, в). Видовжені дуги стискаються і ефективність видалення припуску заготовки зростає через прискорене видалення продуктів ерозії. При РОД зовнішніх контурів зазначений механізм саморегулювання розряду дозволяє отримувати високу якість поверхні за рахунок переважаючого випаровування металу і високу продуктивність за рахунок плавлення основного припуску при виході потоку із зазора.

Процес плавлення потребує менших енерговитрат, ніж випаровування, що відображає графік продуктивності процесу обробки отворів (рис. 6), побудований на підставі регресійної моделі ( $M = 7,41 I^{1,07} P_s^{-0,32}$ , мм<sup>3</sup>/хв), отриманої при статистичній обробці експериментальних даних.

На рис. 7 показано ступінь впливу на продуктивність  $M$  формування отворів змінних факторів: сили струму  $I = 50...400$  А, статичного тиску  $P_s = 0,6...1,7$  МПа, робочої напруги  $U = 25...30$  В, максимального розміру траси в плані  $l_{max} = 8...16$  мм, нерівномірності траси  $l_{max}/l_{min} = 1...4$  та коефіцієнту гідравлічного опору при вході в зазор  $\xi_k = 0,05$  і 0,5 (відповідно: поясок із нахилоною під кутом 13° твірною і поясок без нихилу – раптове звуження). Графік побудовано згідно рівняння регресії:

$$y(M) = -0,3 + 0,99 x_1 + 0,069 x_2 - 0,1 x_3 - 0,02 x_4 - 0,009 x_5 - 0,016 x_6. \quad (2)$$

Відповідно, математична модель продуктивності, мм<sup>3</sup>/хв:

$$M = 0,5 I^{1,1} U^{0,84} P_s^{-0,21} \xi_k^{-0,02} l_{max}^{-0,03} (l_{max} / l_{min})^{-0,025} \quad (3)$$

Порівняно з обробкою отворів при тих же режимах продуктивність отримання зовнішніх контурів звичайно на 30-40% вища.

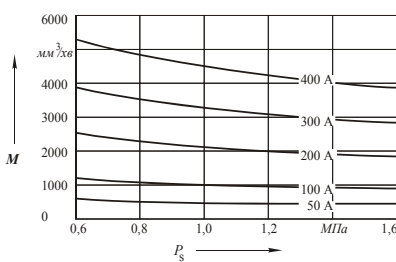


Рисунок 6 – Залежність продуктивності  $M$  від сили струму  $I$  та тиску  $P_s$

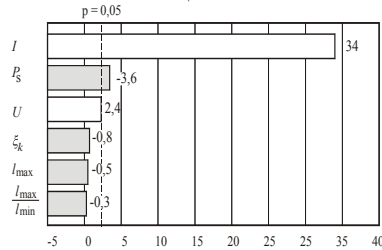


Рисунок 7 – Вплив змінних факторів на продуктивність обробки  $M$

При виході відпрацьованої рідини із зазора в порожнину (рис. 8) потік раптово розширюється, від чого виникають втрати на “удар”, які кількісно відображає відповідний коефіцієнт [6, с. 124]. В широкому перерізі при раптовому розширенні утворюється струмінь, відокремлений від іншого середовища поверхнею розподілу, який розпадається і звертається в потужний вир (вихорні зони). Вся кінетична енергія рідини втрачається на утворення завихрень, пов’язаних із відривом потоку від стінки, тобто на підтримку безперервного обертального руху рідини, в кінцевому рахунку – на внутрішнє тертя. Швидкість падає до нуля.

Спосіб РОД реалізує стаціонарну електричну дугу в поперечному потоці рідини при динамічному тиску потоку не менше 1...2 кПа. Основною умовою якісної і рівномірної обробки є стабільність електричних і гідродинамічних характеристик. По товщині заготовки  $s$  їх можна вважати стабільними, оскільки переріз каналу (міжелектродного зазору) постійний. Вихід рідини із зазору в порожнину характеризується зазначеними змінами потоку і відповідними змінами структури і енергетичних характеристик дуги. Дуга стає малорухомою, довжина стовпа збільшується і вона починає горіти по лінії найменшого опору (мінімального динамічного тиску) між нижньою поверхнею обробленої заготовки та ЕІ. Потік, що виходить із зазора в порожнину, має вигляд, представлений на рис. 8, а [7]. Гарячі продукти ерозії виносяться потоком з міжелектродного зазору і рухаються по відповідних закручених траєкторіях, прилипаючи до стінки отвору підкладної плити. Так досить швидко утворюються “риффи” із продуктів ерозії. Вони мають тенденцію до постійного росту і перекривання отвору, через який відводиться рідина із зони обробки. Коли відстань між “рифами” та ЕІ на завершальній стадії обробки стає критично малою, а підкладна плита електрично неізолювана, то дуга перекидається із торця ЕІ на накопичені продукти ерозії. В цьому випадку не тільки неефективно витрачається енергія на повторне плавлення металу, але й внаслідок малорухомості дуги інтенсивно руйнується робоча частина ЕІ: утворюються заглибини і розгари, в яких залипають наступні продукти ерозії, прискорюючи руйнування ЕІ. Коли підкладна плита електрично ізолювана, рифи із продуктів ерозії можуть розростатись так, що утворений ними отвір стає меншим зовнішнього розміру ЕІ. Це спричиняє подряпини на поверхні ЕІ, а надалі – скол і руйнування ЕІ.

Відомим способом ефективного зменшення втрат повного тиску при утворенні вихорних зон при переході від малого перерізу до великого є встановлення дифузorzів – ділянок, що розширюються поступово (рис. 8, б) [6 с. 153]. Роль дифузора у пристрої для обробки отворів можуть виконувати різноманітні гумові підкладки (рис. 8, в, г). Втрати в дифузорах залежать від кута і степеню розширення та довжини ділянки, що розширюється. Ці величини пов’язані співвідношеннями і в певному діапазоні кутів ( $6...14^\circ$ ) загальний коефіцієнт опору дифузора, приведений до швидкості у вузькому (початковому) зазорі стає меншим, ніж для такої ж довжини ділянки труби постійного перерізу із площею, рівною початковій площі дифузора.

Зберегти швидкість потоку і зменшити опір при виході рідини із зазора дозволяє застосування гумових підкладок різних конфігурацій. В результаті зберігають стабільність процесу при виході ЕІ із заготовки, переривають дугу, отримують якісну нижню кромку та запобігають налипанню продуктів ерозії на стінках підставки.

В залежності від конструкції пристрою та конкретної технології підкладки можуть бути двох типів: тонка листовая гума  $\approx 2-3$  мм або товста гума (10 мм і більше), що вкладається у відповідну проточку в підставці. Перша має спрощений, звичайно круглий отвір; її відгинає потік. При цьому кромка підставки повинна мати радіус. Отвір в товстих підкладках виконують по контуру оброблюваного отвору із зазором 1 мм на сторону. Потік при виході із зазора (зона А), сформований такою підкладкою, має вигляд,

представлений на рис. 8, г. Як показано, хоча відрив потоку від стінки і має місце, вихорна зона менш потужна порівняно із відсутністю підкладки. Оскільки видовжених дуг при застосуванні підкладок не існує, нижня поверхня обробленої деталі чи отвору якісна, без оплавлення.

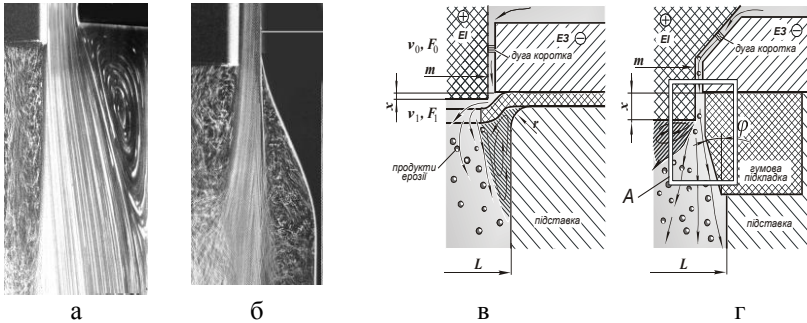


Рисунок 8 – Вихід ЕІ в порожнину з рідиною: а – без підкладки; б, в, г – через гумові підкладки

## Висновки

1. При виході потоку з міжелектродного зазора канал електричного розряду стає малорухомих і за своїми енергетичними характеристиками наближається до зварювальної дуги.
2. Саморегулювання енергетичних характеристик електричного дугового розряду в умовах РОД розділових операцій листового металу при виході потоку з міжелектродного зазора дозволяє забезпечити різні механізми руйнування металу: переважаюче випаровування на оброблюваній стінці і плавлення більшої частини припуску та отримати високу якість обробленої поверхні при високій продуктивності.
3. Запропоноване технологічне оснащення забезпечує високу стійкість ЕІ в умовах РОД шляхом стабілізації гідродинамічних характеристик потоку робочої рідини і, відповідно, енергетичних характеристик розряду.

**Список літератури:** 1. Носуленко В. І. Розмірна обробка металів електричною дугою: Автореф. дис... д-ра техн. наук: 05.03.07 / Кіровоградський держ. техн. ун-т. – К., 1999. – 36 с. 2. Носуленко В. І. Размерная обработка металлов электрической дугой // Электронная обработка материалов, 2005, № 1. – С. 8 – 17. 3. Чумаченко О. С. Розмірна обробка електричною дугою листових деталей: Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.03.07 / Кіровоградський держ. техн. ун-т. – К., 2002. – 20 с. 4. Боков В. М. Розмірне формоутворення поверхонь електричною дугою. – Кіровоград: Поліграфічно-видавничий центр ТОВ «Імекс ЛТД», 2002 – 300 с. 5. Пономарев В., А.В. да Коста, Скотти А. Влияние капли электродного металла на напряжение дуги при сварке в защитных газах // Автоматическая сварка, 2002, № 4. – С. 7 – 11. 6. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М.: Машиностроение, 1975. – 559 с. 7. Ван-Дайк М. Альбом течений жидкости и газа. – М.: Мир, 1986, 184 с.

Надійшла до редколегії 06.08.2010