

**ІННОВАЦІЙНІ ТА ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ**

УДК 621.9.048.4

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.2\(33\).150-160](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.2(33).150-160)**В.І. Носуленко**, проф., д-р техн. наук, **В.М. Шмельов**, доц., канд. техн. наук,  
**О.С. Голованич**, асп.*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький,  
Україна**e-mail: shmelyovvm@gmail.com***Технологічні схеми формоутворення за умов  
розмірної обробки електричною дугою**

Підвищення ефективності суспільного виробництва пов'язано, перш за все, з розвитком машинобудування та широким впровадженням у виробництво прогресивних технологій. Основою машинобудування є металообробка, яка представлена різноманітними традиційними способами обробки металів різанням, тиском та литтям, а також електрофізичними та електрохімічними способами обробки. В виробництві для виготовлення важконавантажених та відповідальних деталей все частіше застосовують матеріали, що важко піддаються обробці різанням. Такі деталі зазвичай виготовляють електрофізичними методами обробки. Одним із прогресивних способів електрофізичної обробки металів, що забезпечує широкі технологічні можливості, є електроерозійна обробка, зокрема спосіб розмірної обробки електричною дугою. Реалізація конкретних технологій розмірної обробки електричною дугою та розробка відповідних технологічних схем формоутворення вимагає індивідуальних підходів та застосування найрізноманітніших технологічних прийомів. Це потребує уніфікації цих прийомів та розробки відповідних рекомендацій. На підставі аналізу і узагальнень теоретичних та експериментальних досліджень і практичної реалізації процесу розмірної обробки електричною дугою викладено технологічні прийоми у вигляді правил реалізації процесу. Результати практичного використання технології, верстатів і електроерозійних головок, що реалізують спосіб розмірної обробки електричною дугою, згідно викладеного, підтверджують вказані раніше переваги способу порівняно з відомими, традиційними способами електроерозійної обробки, заснованими на використанні нестационарних електричних розрядів, а саме: при заданій якості обробки продуктивність способу в 5...10 разів і більше перевищує продуктивність відомих способів, приблизно вдвічі зменшується питома витрата електроенергії, значно менша вартість джерел живлення технологічним струмом, а також забезпечуються широкі можливості реалізації процесу за рахунок різноманітних технологічних схем формоутворення як профільованим, так і непрофільованим електродом, починаючи від традиційних і аж до того, що запропонований процес може бути ефективно використаним на будь-яких металорізальних верстатах без втрати останніми їх основних функцій.

**електрична дуга, електроіскрова обробка, електроімпульсна обробка, електророзрядна обробка,  
розмірна обробка електричною дугою****В.И. Носуленко**, проф., д-р техн. наук, **В.Н. Шмелев**, доц., канд. техн. наук, **А.С. Голованич**, асп.*Центральноукраїнський національний технічний університет, г. Кропивницький, Украина***Технологические схемы формообразования в условиях размерной обработка  
электрической дугой**

Повышение эффективности общественного производства связано, прежде всего, с развитием машиностроения и широким внедрением в производство прогрессивных технологий. Основой машиностроения является металлообработка, которая представлена различными традиционными способами обработки металлов резанием, давлением и литьем, а также электрофизическими и электрохимическими способами обработки. В производстве для изготовления тяжело нагруженных и ответственных деталей все чаще применяют материалы трудно поддающиеся обработке резанием. Такие детали обычно изготавливают электрофизическими методами обработки. Одним из прогрессивных

способов электрофизической обработки металлов, обеспечивает широкие технологические возможности, является электроэрозионная обработка, в частности способ размерной обработки электрической дугой. Реализация конкретных технологий размерной обработки электрической дугой и разработка соответствующих технологических схем формообразования требует индивидуальных подходов и применения самых технологических приемов. Это требует унификации этих приемов и разработки соответствующих рекомендаций. На основании анализа и обобщений теоретических и экспериментальных исследований и практической реализации процесса размерной обработки электрической дугой изложены технологические приемы в виде правил реализации процесса. Результаты практического использования технологии, станков и электроэрозионных головок, реализующих способ размерной обработки электрической дугой, согласно изложенного, подтверждающих указанные ранее преимущества способа по сравнению с известными, традиционными способами электроэрозионной обработки, основанными на использовании нестационарных электрических разрядов, а именно: при заданном качестве обработки производительность способа в 5...10 раз и более превышает производительность известных способов, примерно вдвое уменьшается удельный расход электроэнергии, значительно меньшая стоимость источников питания технологическим током, а также обеспечиваются широкие возможности реализации процесса за счет различных технологических схем формообразования как профилированным, так и непрофилированные электродом, начиная от традиционных и до того, что предложенный процесс может быть эффективно использован на любых металлорежущих станках без потери последними их основных функций.

**электрическая дуга, электроискровой обработки, электроимпульсная обработка, электроэрозионная обработка, размерная обработка электрической дугой**

**Постановка проблеми.** Підвищення ефективності суспільного виробництва пов'язано, перш за все, з розвитком машинобудування та широким впровадженням у виробництво прогресивних технологій. Основою машинобудування є металообробка, яка представлена різноманітними традиційними способами обробки металів різанням, тиском та литтям, а також перспективними, але порівняно мало вивченими і такими, що мають обмежене практичне застосування різноманітними процесами так званої електротехнології (електрофізичними та електрохімічними способами обробки) [1,2,3].

В виробництві для виготовлення важконавантажених та відповідальних деталей все частіше застосовують матеріали, що важко піддаються обробці різанням. Такі деталі зазвичай виготовляють електрофізичними методами обробки. Одним із способів електрофізичної обробки металів, що забезпечує широкі технологічні можливості, є традиційна електроерозійна обробка з використанням нестационарних електричних розрядів (ЕЕО) (електроіскрова, електроімпульсна обробка) [4], проте вона знаходить обмежене практичне застосування, оскільки не забезпечує достатньо високої продуктивності. В цьому зв'язку певний практичний інтерес являє спосіб розмірної обробки електричною дугою (РОД) [5], що отримав помітне практичне застосування і вимагає подальшого удосконалення та розширення технологічних можливостей.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Виготовлення деталей з важкооброблюваних матеріалів зі складним профілем зазвичай виконують методами традиційної ЕЕО з використанням нестационарних електричних розрядів. Для таких методів обробки при копіювально-прошивних операцій електрод-інструменти (ЕІ) виготовляють зазвичай з міді, що при обробці важкооброблюваних матеріалів володіє порівняно низькою стійкістю [6]. Такі ЕІ виготовляють методами вирізання, необхідного контуру, електрод-дротиною з необхідною точністю, що призводить до підвищення вартості таких ЕІ [7] і, як наслідок, підвищення собівартості виготовлення виробів. Для підвищення стійкості ЕІ виготовляють з композиційних матеріалів [8] та псевдосплавів [9], тобто, з матеріалів різних за своїми властивостями методами порошкової металургії спікають ЕІ необхідної форми і розмірів. Виготовлені з таких матеріалів ЕІ хоча і мають вищу стійкість порівняно з мідними ЕІ, проте собівартість виготовлення таких ЕІ значно зростає.

При обробці способом РОД в якості матеріалу для виготовлення ЕІ

використовують, зазвичай, електроерозійний графік марок МПГ-7, МПГ-8, який має порівняно низьку вартість і легко піддається обробці різанням, що дозволяє знизити собівартість виготовлення деталей.

**Постановка завдання.** При забезпеченні основної умови реалізації процесу РОД, яка полягає в тому, що обробка здійснюється електричною дугою в поперечному потоці середовища-діелектрика [10] при динамічному тиску останнього не менше 1...2кПа, РОД, як і відомі способи традиційні ЕЕО з використанням нестационарних електричних розрядів, дозволяє здійснити майже всі технологічні схеми формоутворення, характерні для обробки металів різанням (так звана обробка непрофільованим електродом).

Реалізація конкретних технологій РОД та розробка відповідних технологічних схем формоутворення вимагає індивідуальних підходів та застосування найрізноманітніших технологічних прийомів. Це потребує уніфікації цих прийомів та розробки відповідних рекомендацій. На підставі аналізу і узагальнень теоретичних та експериментальних досліджень і практичної реалізації процесу РОД викладемо ці технологічні прийоми у вигляді правил реалізації процесу РОД або, що те ж, але згідно діючої термінології, у вигляді переліку та опису способів РОД.

**Виклад основного матеріалу.** Спосіб РОД, згідно якого потік робочої рідини підводять до передньої формоутворюючої поверхні електрода 1 (рис. 1), а відводять від задньої робочої поверхні електрода, що прилягає до менш чистої за умовами виготовлення поверхні заготовки або в сторону припуску на подальшу обробку, напуску чи відходу.

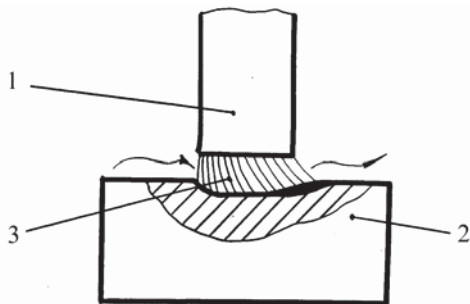


Рисунок 1 – Структура електричної дуги в поперечному потоці рідини

*Джерело: розроблено авторами*

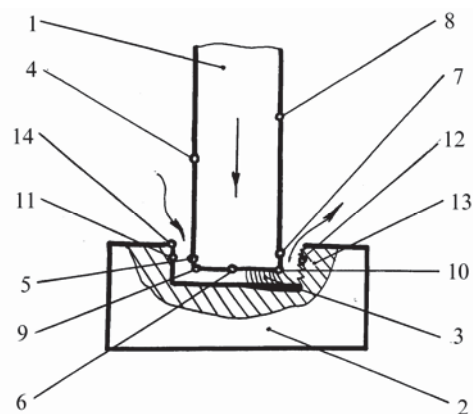


Рисунок 2 – Схема реального процесу

*Джерело: розроблено авторами*

Рідину подають поміж електродом 1 і заготовкою 2 примусово потоком в напрямку, по суті, поперечному до осі стовпа електричної дуги 3.

При цьому в умовах реального процесу (рис. 2) на електроді 1 треба розрізняти такі елементи: передня поверхня 4, передня формоутворююча поверхня 5, торцева робоча поверхня 6, задня робоча поверхня 7 і задня поверхня 8. В місцях перетину передньої і торцевої поверхні електрода розташована передня формоутворююча кромка 9, а в місцях перетину задньої і торцевої поверхонь – задня робоча кромка 10.

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 з задньої сторони, де потік залишає електрод. До того ж в

напрямку потоку, що рухається, якість обробленої поверхні погіршується ще й через продукти ерозії, які рухаються разом з потоком.

Отже, дуга зі сторони потоку, що набігає на неї, формує якісну кромку 14 і якісно оброблену поверхню 11, в той час як зі сторони задньої поверхні електрода, де потік залишає електрод, формується менш якісна поверхня 12. Таким чином, коли потік робочої рідини підводять до формують поверхні 5 електрода, то саме тут формується якісна кромка 14, а надалі і якісна поверхня 11, в той час як зі сторони задньої поверхні 8 електрода формується менш якісна поверхня 12. Відзначимо, що якість обробленої поверхні 11 при цьому не поступається досягнутій при традиційних способах електроерозійної обробки.

Спосіб РОД, згідно якого для підвищення якості обробленої поверхні, зменшення розбризкування робочої рідини, гасіння світлових і звукових ефектів на задню робочу поверхню 7 електрода 1 (рис. 3) подають додатковий потік робочої рідини, по суті, перпендикулярно до основного потоку в аксіальному (паралельному поздовжній осі електрода) і тангенціальному (по дотичній до бічної поверхні електрода з круглим поперечним перерізом) напрямках, або ж в зустрічному напрямку до основного потоку. Це дозволяє локалізувати зону обробки за рахунок її затоплення робочою рідиною, в зв'язку з чим такий додатковий потік робочої рідини називають потоком затоплення. Напрямок додаткового потоку рідини визначається вимогами реалізації конкретної технологічної схеми формоутворення.

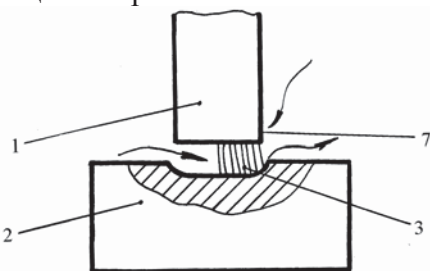


Рисунок 3 – Схема процесу з додатковим потоком затоплення

*Джерело: розроблено авторами*

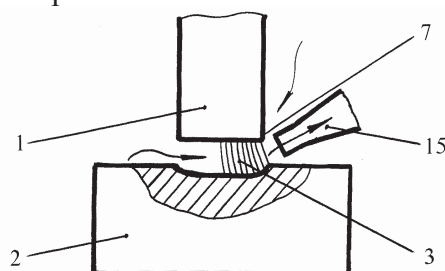


Рисунок 4 – Схема процесу при відведенні рідини через сопло

*Джерело: розроблено авторами*

Спосіб РОД, згідно якого ефект збереження швидкості потоку рідини, що залишає електрод зі сторони його задньої робочої поверхні 7 електрода 1, а отже і забезпечення високої якості обробленої поверхні досягають за рахунок того, що потік робочої рідини формують при її відводі через сопло 15 (рис. 4) або щілину тільки всмоктуванням, тільки нагнітанням або ж комбінацією нагнітання і всмоктування. Таке технічне рішення забезпечує не тільки якісне формоутворення поверхні, що обробляється, але й дозволяє оптимізувати витрату робочої рідини. При цьому вибір варіанту формування потоку робочої рідини (тільки всмоктуванням, тільки нагнітанням або ж комбінацією нагнітання та всмоктування) повністю визначається вимогами реалізації конкретної технологічної схеми формоутворення.

Спосіб РОД, згідно якого для локалізації зони обробки з метою підвищення якості обробленої поверхні, зменшення розбризкування робочої рідини та зменшення світлових і звукових ефектів зі сторони задньої робочої поверхні 7 електрода 1 (рис. 5) створюють гідравлічний опір розтіканню рідини у вигляді ущільнення 16, яке прикріплене до стінки 17. При цьому в зону обробки подається більша кількість рідини, ніж іде на вільний злив під ущільнення 16. Як наслідок, інша частина рідини затоплює робочу зону обробки, створюючи ванну і зливається, наприклад, через стінку 17 або контрольний отвір в ній.

Спосіб РОД, згідно якого для покращення якості обробленої поверхні зі сторони задньої поверхні 7 електрода 1 (рис. 6), достатньо зберегти швидкість потоку робочої рідини, що залишає електрод. Для цього зі сторони задньої робочої поверхні 7 електрода встановлюють додаткові елементи 18, наприклад, одну накладку (див. рис. 6) або дві накладки (рис. 7). Додаткові елементи 18 формують щілину для відведення робочої рідини, висоту якої приймають рівною, або дещо більшою висоти міжелектродного зазору.

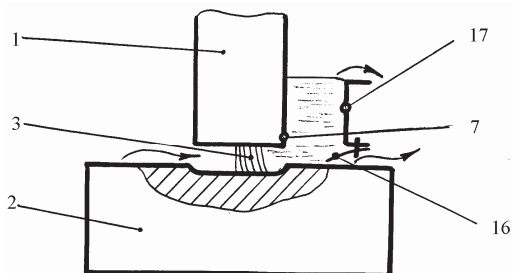


Рисунок 5 – Схема процесу при затопленні зони обробки

Джерело: розроблено авторами

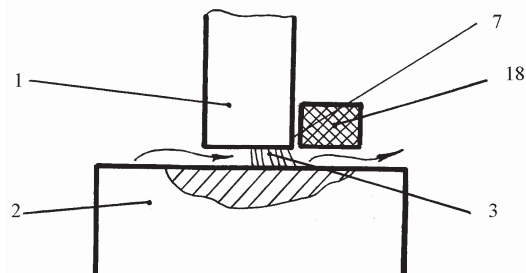


Рисунок 6 – Схема процесу при застосуванні додаткового елемента

Джерело: розроблено авторами

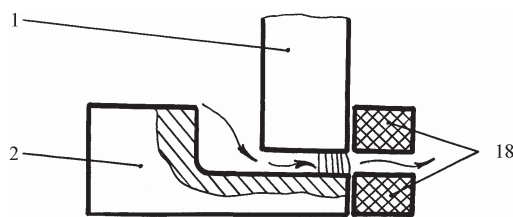


Рисунок 7 – Схема процесу при застосуванні двох додаткових елементів

Джерело: розроблено авторами

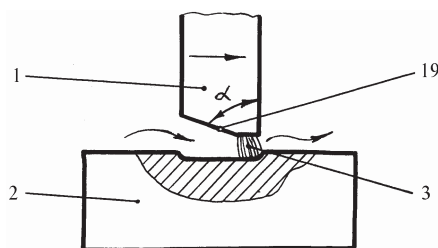


Рисунок 8 – Схема процесу при течі рідини в звужуючу щілину

Джерело: розроблено авторами

Спосіб РОД, коли враховують, що якість обробленої поверхні в умовах даного способу визначається, перш за все, характером взаємодії дуги з потоком робочої рідини. Тому, формуючи потік відповідних характеристик, зокрема забезпечуючи більш рівномірну течу робочої рідини в міжелектродному зазорі, можна покращити якість обробленої поверхні. З цією метою потік робочої рідини формують при її течі в звужуючу щілину, що утворюється оброблюваною поверхнею заготовки 2 (рис. 8) і нахиленою торцевою неробочою поверхнею 19 електрода 1, яку доцільно розташувати під кутом  $\alpha=70...85^\circ$ . При цьому шорсткість обробленої поверхні зменшується на один-два квалітети при інших рівних умовах порівняно з технологічними схемами формоутворення з плоскою торцевою поверхнею.

Спосіб РОД, згідно якого для прошивання наскрізних щілин в тонких листових заготовках застосовують електрод 1 зі скошеною нахиленою або вигнутою торцевою робочою поверхнею 20 (рис. 9). Після заглиблення в заготовку 2 гострою кромкою електрода 1 і його подальшому русі донизу довжина траси прокачування робочої рідини через міжелектродний зазор залишається приблизно однаковою і є невеликою. Під оброблюваним отвором передбачають порожнину 21 з робочою рідиною. Скіс торцевої робочої поверхні може бути як однобічним (див. рис. 9), так і двобічним (рис. 10), а кут  $\beta$  (див. рис. 9) електрода 1 може коливатись в широких межах, в середньому

60°; крім того торцева робоча поверхня 20 електрода 1 може бути вигнута в різних варіантах – і все це, в кінцевому підсумку, визначається вимогами реалізації конкретної технологічної схеми формоутворення.

Спосіб РОД, згідно якого для забезпечення якості нижньої кромки наскрізного отвору, обробку здійснюють на металевій чи гумовій підкладці 22 (див. рис. 10), якою, зокрема, може бути одна з попередньо прошитих заготовок, звичайно перша, яка стає, таким чином, довготривалим оснащенням для прошивання інших заготовок.

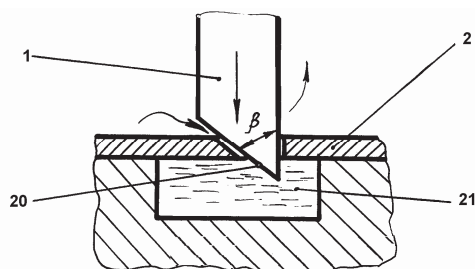


Рисунок 9 – Схема процесу обробки вузької щілини

Джерело: розроблено авторами

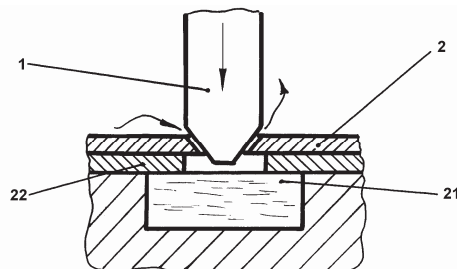


Рисунок 10 – Схема процесу обробки при наявності підкладки

Джерело: розроблено авторами

Спосіб РОД, згідно якого для підвищення продуктивності та якості обробленої поверхні при наскрізному прошиванні під отвором, який отримують, передбачають порожнину 21, яку з'єднують зі зливом (рис. 11), а в головній зливній магістралі створюють додатковий гідравлічний опір, т. з. протитиск, наприклад, за допомогою крана (на схемі умовно не показано). Величина протитиску, яка звичайно коливається в межах 1...10атм, повністю визначається умовами реалізації конкретної технологічної схеми формоутворення.

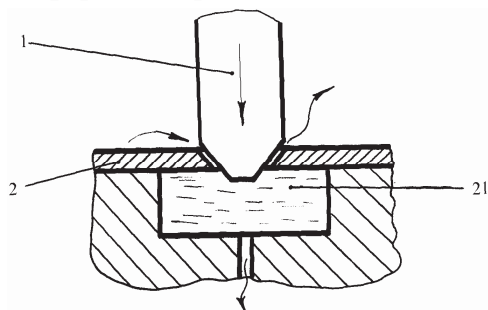


Рисунок 11 – Схема процесу обробки підкладки з притиском

Джерело: розроблено авторами

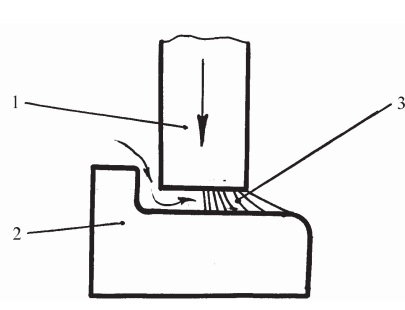


Рисунок 12 – Схема процесу при підвищених напрузі і струму

Джерело: розроблено авторами

Спосіб РОД, коли буває потрібно видалити підвищений припуск (напуск) або відхід. В цьому випадку простим за використанням, продуктивним та економічним в енергетичному відношенні, оскільки руйнування металу здійснюється за рахунок локального плавлення видовженою дугою, є збільшення тільки напруги дуги до  $U = 35...70\text{В}$ , тільки струму дуги до  $I = 300...1000\text{А}$ , або ж одночасно струму і напруги до вказаних значень. Як наслідок, може бути видалений підвищений припуск (напуск) або відхід (до 5...10 мм і більше) (рис. 12).

Спосіб РОД, згідно якого для забезпечення якісного формування поверхні 23 (рис. 13) та кромки 24 зі сторони задньої робочої поверхні електрода процес реалізують при мінімальній напрузі дуги  $U = 20...25\text{В}$  і мінімальному струмі  $I = 1...30\text{А}$ .

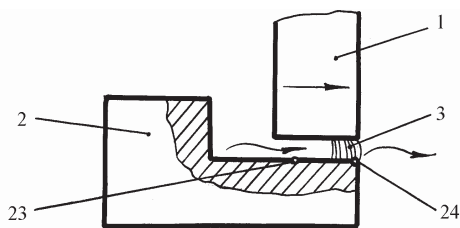


Рисунок 13 – Схема процесу при мінімальних  
нарузі і струму

*Джерело: розроблено авторами*

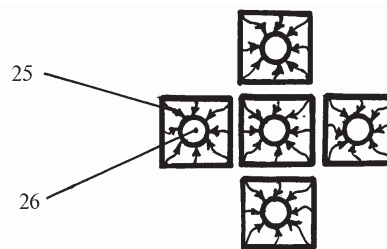


Рисунок 14 – Приклад багатосекційного  
електрода в плані

*Джерело: розроблено авторами*

Спосіб РОД, коли проблемою є стабілізація процесу і виключення його порушень, при запалюванні дуги, близької за своїми енергетичними характеристиками до звичайних зварювальних дуг, що псує оброблювану поверхню. Особливо це виявляється при обробці несиметричних і великих поверхонь, при багатоелектродній обробці, при використанні багатосекційних електродів і т. і. Щоб це виключити, достатньо щоб гідрравлічний опір на всіх лініях течії робочої рідини був по можливості мінімальним і приблизно однаковим, для чого траси прокачки робочої рідини через міжелектродний зазор повинні бути по можливості мінімальними і приблизно однаковими. Для цього робочу поверхню електрода поділяють на окремі ділянки прокачування, які повинні наближатися до круглих чи квадратних в плані. На рис. 14 наведено приклад багатосекційного електрода в плані, який складається із п'яти окремих квадратних ділянок 25 з отворами 26 для відведення робочої рідини, що задовольняє зазначеним умовам та забезпечує якісну обробку.

Спосіб РОД, коли при обробці великих поверхонь профільованим електродом різко зростають траси прокачування робочої рідини через міжелектродний зазор і, відповідно, тиск робочої рідини, що погіршує якість обробленої поверхні, ускладнює і часто порушує процес. В цьому випадку доцільна, особливо при обробці видовжених в плані поверхонь, коли до того ж можна оптимізувати витрату робочої рідини, реалізація технологічної схеми обкатування заготовки 2 профільованим електродом 27 при прокачуванні робочої рідини в напрямку, зворотному обкатуванню (рис. 15).

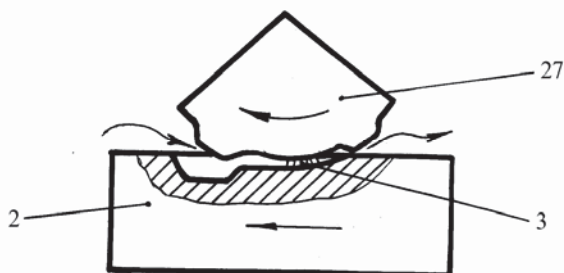


Рисунок 15 – Технологічна схема формоутворення за  
принципом обкатування

*Джерело: розроблено авторами*

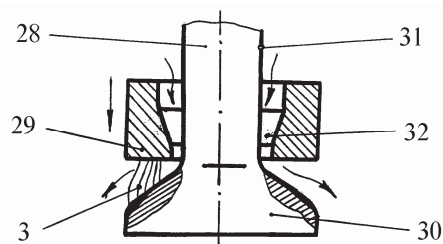


Рисунок 16 – Технологічна схема  
формоутворення деталі типу «стержень»

*Джерело: розроблено авторами*

Викладені технічні рішення, прийоми та режими обробки способом в їх сукупності, взаємозв'язку та взаємозалежності дозволяють реалізувати практично всі відомі технологічні схеми формоутворення розмірної обробки, забезпечуючи при цьому оптимальне поєднання кількісних та якісних характеристик процесу і, в кінцевому рахунку, зазначені раніше його переваги.

Як приклад, що підтверджує це, розглянемо реалізацію технологічної схеми формоутворення деталі 28 (рис. 16) типу фасонний стержень. Перш за все звертаємось

способу зображеному на рис. 2, згідно якого для якісного формоутворення деталі при реалізації відомої схеми зворотного копіювання необхідно використати так зване пряме прокачування робочої рідини від центру порожнистого профільованого електрода 29 до його периферії і, відповідно, від центру оброблюваної заготовки до її периферії. З метою високопродуктивного видалення збільшеного припуску 30 використовуємо спосіб зображений на рис. 12. Щоб покращити якість поверхні 31, використовуємо спосіб зображений на рис. 8. Як наслідок, реалізується технологічна схема формоутворення (див. рис. 16) і відповідні режими обробки, що забезпечують зазначені вище переваги способу. Так, наприклад, при обробці сталеві заготовки при застосуванні дуги напругою  $U = 35\text{В}$  при струмі  $I = 1000\text{А}$  забезпечується продуктивність  $30000\text{мм}^3/\text{хв}$  при відсутності на обробленій поверхні 31 зони термічного впливу та при шорсткості обробленої поверхні в межах четвертого класу ( $R_a$  6,3). Це при заданій якості поверхні в десятки разів перевищує продуктивність традиційних методів електроерозійної обробки.

Наступним прикладом є реалізація способу при відносному переміщенні заготовки і електрода в різних напрямках, наприклад, при обробці тіл обертання (рис. 17, 18) непрофільованим електродом 33. В цьому випадку треба виходити з того, що оптимальним варіантом підведення робочої рідини високого тиску в зону обробки є загальновідоме технічне рішення – використання порожнистого електрода 33 з отвором 34. Проте при цьому існує проблема локалізації робочої зони обробки з метою забезпечення якості обробки, зменшення світлових і звукових ефектів від розряду та зменшення розбризкування робочої рідини із зони обробки. Найбільш просте рішення із викладених, що вирішує цю проблему, це технічне рішення, що показано на рис. 5. Згідно цього зі сторони задньої робочої поверхні електрода 33 (див. рис. 17) створюють гідравлічний опір розтіканню робочої рідини ущільненням 16, яке прикріплене до стінки 17. Оскільки кількість рідини, що надходить через отвір 34 в електроді 33, більше тієї, що іде на вільний злив під ущільненням 16, то робоча рідина затоплює зону обробки, створюючи ванну, і зливається через контрольний отвір 35.

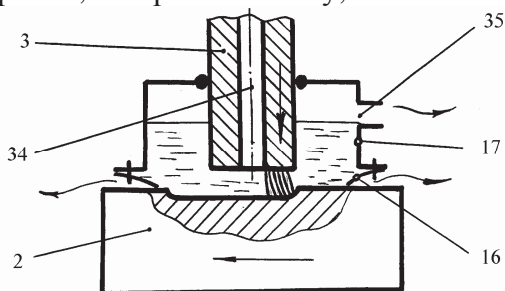


Рисунок 17 – Технологічна схема формоутворення непрофільованим електродом  
Джерело: розроблено авторами

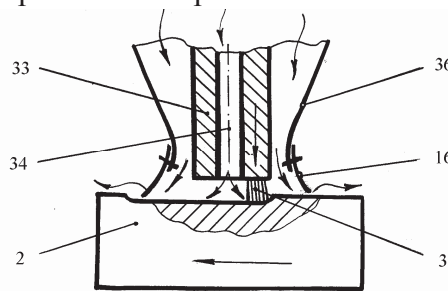


Рисунок 18 – Технологічна схема формоутворення непрофільованим електродом  
Джерело: розроблено авторами

Більш складним, але й більш ефективним є технічне рішення показане на рис. 3. Згідно цього на задню робочу поверхню електрода 33 (див. рис. 18) подають додатковий потік робочої рідини за допомогою камери 36, до нижньої частини якої прикріплене ущільнення 16. Це створює ванну робочої рідини, яка локалізує зону обробки, з можливостями впливати на характер течії робочої рідини в зоні обробки, а відповідно визначати, в відомих межах, як кількісні, так і якісні характеристики процесу обробки, а також умови обслуговування.

Ще більш складним, але й більш ефективним може бути технічне рішення, показане на рис. 4 коли є можливість, зокрема, за рахунок всмоктування взагалі



видалити із зони обробки як робочу рідину, так і продукти ерозії.

Аналогічно, згідно викладеного, можна реалізувати як відомі, так і нові технологічні схеми формоутворення електроерозійної обробки.

**Висновки.** Результати практичного використання технології, верстатів і електроерозійних головок, що реалізують спосіб РОД, згідно викладеного, підтверджують вказані раніше переваги способу порівняно з відомими, традиційними способами електроерозійної обробки, заснованими на використанні нестационарних електричних розрядів, а саме: при заданій якості обробки продуктивність способу в 5...10 разів і більше перевищує продуктивність відомих способів, приблизно вдвічі зменшується питома витрата електроенергії, значно менша вартість джерел живлення технологічним струмом, а також забезпечуються широкі можливості реалізації процесу за рахунок різноманітних технологічних схем формоутворення як профільованим, так і непрофільованим електроодом, починаючи від традиційних і аж до того, що запропонований процес може бути ефективно використаним на будь-яких металорізальних верстатах без втрати останніми їх основних функцій.

## Список літератури

1. Киселев М.Г. Мрочек Ж.А., Дроздов А.В. Электрофизическая и электрохимическая обработка материалов: учебное пособие. Москва: НИЦ ИНФРА-М, Нов. знание, 2014. 389 с.
2. Носенко В. А., Даниленко М.В. Физико-химические методы обработки материалов: учебное пособие. Изд. 2-е, перераб. и доп. Старый Оскол: ООО «Тонкие наукоемкие технологии», 2019. 196 с.
3. Серебrenицкий П. П. Современные электроэрозионные технологии и оборудование: учебное пособие для вузов по направлению "Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств". Изд.2-е, перераб. и доп. Санкт-Петербург: Лань, 2013. 352 с.
4. Елисеев Ю.С., Саушкин Б.П. Состояние и перспективы развития наукоемких технологий машиностроительного производства. *Металлообработка*. 2010. № 2. С. 9–17.
5. Носуленко В.І., Шмельов В.М. Розмірна обробка металів електричною дугою: навчальний посібник. Кропивницький: ПП «Ексклюзив-Систем», 2017. 256 с.
6. Абляз Т.Р., Ханов А.М., Хурматуллин О.Г. Современные подходы к технологии электроэрозионной обработки материалов: учеб. пособие. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2012. 120 с.
7. Гришарин А.О., Абляз Т.Р. Анализ актуальных задач использования электроэрозионных технологий для изготовления деталей гидроцилиндров и изделий специального назначения. *Инновационные технологии в материаловедении и машиностроении (ИТММ-2016)*: материалы 3-й междунар. науч.-практ. конф., г. Пермь, 3–7 октября 2016 г. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2016. С. 53–56.
8. Елисеев Ю.С., Савушкин Б.П. Электроэрозионная обработка изделий авиационно-космической техники / под ред. Б.П. Савушкина. Москва: Изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана, 2010. 437 с.
9. Гришарин А.О., Абляз Т.Р., Оглезнев Н.Д. Повышение эффективности электроэрозионной обработки деталей гидроцилиндров и изделий специального назначения путем применения электродов-инструментов с повышенными электроэрозионными свойствами. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-effektivnosti-elektroerozionnoy-obrabotki-detaley-gidrotsilindrov-i-izdeliy-spetsialnogo-naznacheniya-putem-primeneniya/viewer> (дата звернення: 20.11.2019).
10. Носуленко В. І., Шмельов В.М. Особливості електричної дуги в поперечному потоці рідини. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. пр. Кіровоград. нац. техн. ун-ту*. 2017. Вип 30. С.103-110.

## References

1. Kiselev, M.G. Mrochek, Zh.A., & Drozdov, A.V. (2014). *Elektrofizicheskaya i elektrohimicheskaya obrabotka materialov [Electrophysical and electrochemical processing of materials]*. Moscow: NITs INFRA-Moscow: Nov. znanie [in Russian].

2. Nosenko, V.A., & Danilenko, M.V. (2019). *Fiziko-himicheskie metody obrabotki materialov [Physico-chemical methods of processing materials]*. Staryiy Oskol: OOO «Tonkie naukoemkie tehnologii» [in Russian].
3. Serebrenitskiy, P.P. (2013). *Sovremennyye elektroerozionnyie tehnologii i oborudovanie [Modern electroerosion technologies and equipment]*. Sankt-Peterburg: Lan [in Russian].
4. Eliseev, Iu.S. & Saushkin, B.P. (2010). *Sostoianie i perspektivy razvitiia naukoemkikh tekhnologii mashinostroitel'nogo proizvodstva [State and prospects of development of high technologies of machine-building production]*. Metalloobrabotka, 2, 9–17 [in Russian].
5. Nosulenko, V.I. & Shmelev, V.N. (2017). *RozmIrna obrobka metallv elektrichnoyu dugoyu [Dimensional processing of metals by an electric arc]*. Kropyvnytskyi: PP «Eksklyuziv-Sistem» [in Ukrainian].
6. Abliaz, T.R., Khanov, A.M., & Khurmatullin, O.G. (2012). *Sovremennyye podkhody k tekhnologii elektroerozionnoi obrabotki materialov [Modern approaches to technology of electroerosive processing of materials]*. Perm': Izdatel'stvo Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta [in Russian].
7. Grisharin, A.O. & Abliaz, T.R. (2016). Analiz aktual'nykh zadach ispol'zovaniia elektroerozionnykh tekhnologii dlia izgotovleniia detalei gidrotsilindrov i izdelii spetsial'nogo naznacheniiia [The analysis of relevant problems of use of electroerosive technologies for production of details of hydraulic cylinders and products of a special purpose]. *Innovatsionnyie tekhnologii v materialovedeni i mashinostroeni (ITMM-2016): materialy 3-i mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, g. Perm', 3–7 oktiabria 2016 g.* Perm': Izdatel'stvo Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta, 2016, pp. 53–56 [in Russian].
8. Eliseev, Iu.S. & Savushkin, B.P. (2010). *Elektroerozionnaia obrabotka izdelii aviatsionnokosmicheskoi tekhniki [Electroerosive processing of products of the aerospace equipment]*. Ed. B.P. Savushkina. Moscow: Izdatel'stvo Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni N.E. Baumana [in Russian].
9. Grisharin, A.O., Abliaz, T.R. & Ogleznev, N.D. Povy`shenie e`ffektivnosti e`lektroe`roizionnoj obrabotki detalej gidrocilindrov i izdelij speczi`al'nogo naznacheniya putem primeneniya e`lektrodov-instrumentov s povy`shenny`mi e`lektroe`roizionny`mi svojstvami [Increase of efficiency electrical discharge machining of details of hydraulic cylinders and products of special purpose by application of electrodes with the raised electrical discharge machining properties]. *cyberleninka.ru*. Retrieved from: +(accesses 20 November 2019)
10. Nosulenko, V. I., & Shmelov, V.M. (2017). Osoblyvosti elektrychnoi duhy v poperechnomu pototsi ridyny [Features of an electric arc in a cross flow of fluid]. *Zbirnyk naukovykh prats kirovohrad'skoho natsional'nogo tekhnicheskoho universytetu. Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyziatsiia – Collected Works of Kirovohrad National Technical University machinery in agricultural production, industry machine building, automation, Vol. 30, 153-156* [in Ukrainian].

**Victor Nosulenko**, Prof., DSc., **Vitaliy Shmelyov**, Assoc. Prof., **Phd** tech. sci., **Alexander Golovanych**, post-graduate

*Centralukrainian National Technical University, Kropivnitsky, Ukraine*

### **Technological Schemes of Shaping In the Conditions of Dimensional Droccessing By an Electric Arc**

The increase in the efficiency of social production is associated primarily with the development of mechanical engineering and the widespread introduction of advanced technologies in production. The basis of mechanical engineering is metalworking, which is represented by various traditional methods of metal processing by cutting, machining pressure and casting, as well as electrophysical and electrochemical processing methods. In production, materials that are difficult to process by cutting are increasingly used for the manufacture of heavily loaded and critical parts. Such parts are usually manufactured by electrophysical processing methods. One of the progressive methods of electrophysical processing of metals, which provides wide technological capabilities, is electrical discharge machining, in particular, the method of dimensional processing by an electric arc. The implementation of specific technologies for dimensional processing by an electric arc and the development of appropriate technological schemes for shaping requires individual approaches and the application of the most technological methods. This requires the unification of these techniques and the development of appropriate recommendations.

Based on the analysis and generalizations of theoretical and experimental studies and the practical implementation of the process of dimensional processing by an electric arc, technological methods are described in the form of rules for the implementation of the process.

The results of the practical use of technology, machines and electroerosive heads, implementing the method of dimensional machining by an electric arc, according to the foregoing, confirming the previously mentioned advantages of the method compared to the known, traditional methods of electroerosive, based on the use of non-stationary electric discharges, namely: for a given processing quality 5 to 10 times or more of the method exceeds the productivity of the known methods, decreases by about half specific energy consumption, significantly lower cost of technological current power sources, and also provides ample opportunities for implementing the process due to various technological schemes of forming as by profiled and non-profiled electrodes, starting from traditional ones and to the fact that the proposed process can be effectively used on any metal-cutting machine tools without the last loss of their basic functions.

**electric arc, electrospark processing, electroimpulse processing, electrodischarge processing, dimensional electric arc processing**

*Одержано (Received) 22.11.2019*

*Прорецензовано (Reviewed) 04.12.2019*

*Прийнято до друку (Approved) 23.12.2019*