УДК. 621.9.048.4

В.І. НОСУЛЕНКО, В.М. ШМЕЛЬОВ, А.А. ПАЩЕНКО
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький

# ЕЛЕКТРОДИ-ІНСТРУМЕНТИ ДЛЯ РОЗМІРНОЇ ОБРОБКИ МЕТАЛІВ ЕЛЕКТРИЧНОЮ ДУГОЮ

*У даній роботі розглянуто конструкцію електрода-інструмента, який відрізняється тим, що по його довжині на відстані 10…20мм від першої робочої кромки, та при куті спряження поверхонь φ ≥60° розташовують додатково ще одну робочу кромку електрода-інструмента. Елементи і геометрія другої робочої кромки повторюють елементи і геометрію першої робочої кромки. При виготовлені отвору усі поперечні розміри другої робочої кромки на 1…6мм більше по відношенню до контуру першої кромки, утворюючи таким чином зовнішню еквідистанту. При виготовлені стержня усі поперечні розміри другої кромки на 1…6мм менше по відношенню до контуру першої кромки, утворюючи таким чином внутрішню еквідистанту. Наведена конструкція електрода-інструмента забезпечують, порівняно з відомими конструкціями, такі переваги: якість обробленої поверхні, а саме шорсткість покращується до Ra 0,63 мкм; підвищення економічної ефективності процесу розмірної обробки електричною дугою; розширення меж раціонального застосування процесу розмірної обробки електричною дугою; зростає конкурентоспроможність процесу розмірної обробки електричною дугою за рахунок оптимального поєднання його кількісних і якісних характеристик; підвищується точність обробки.*

*Наведено методику розрахунку виконавчих розмірів електродів-інструментів. Описано особливості, що потрібно враховувати при проектуванні електродів-інструментів. Наведено особливості впливу динамічного тиску потоку робочої рідина та складу робочої рідини на форму зносу електрода-інструмента. Показано, що для оптимального протікання процесу розмірної обробки електричною дугою необхідно в електродах-інструментах передбачати технологічні отвори, для відведення робочої рідини та продуктів ерозії із зони обробки, які по формі повинні повторювати форму робочої кромки. Показано вплив основних технологічних характеристик процесу розмірної обробки електричною дугою на величину між електродного зазору.*

*Ключові слова: розмірна обробка електричною дугою, електрод-інструмент, міжелектродний зазор, шорсткість поверхні, робоча кромка електроду.*

В.И. НОСУЛЕНКО, В.Н. ШМЕЛЕВ, А.А. ПАЩЕНКО
Центральноукраинский национальный технический университет, г. Кропивницький

## ЭЛЕКТРОДЫ-ИНСТРУМЕНТЫ ДЛЯ РАЗМЕРНОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЮ ДУГОЙ

*В данной работе рассмотрено конструкцию электрода-инструмента, который отличается тем, что по его длине в 10 ... 20мм от первой рабочей кромки, и при угле сопряжения поверхностей φ ≥60° располагают дополнительно еще одну рабочую кромку электрода-инструмента. Элементы и геометрия второй рабочей кромки повторяют элементы и геометрию первой рабочей кромки. При изготовлении отверстия все поперечные размеры второй кромки на 1...6 мм больше по отношению к контуру первой кромки, образуя таким образом внешнюю эквидистанта. При изготовлении стержня все поперечные размеры второй рабочейкромки на 1 ... 6 мм меньше по отношению к контуру первой кромки, образуя таким образом внутреннюю эквидистанта. Приведенная конструкция электрода-инструмента обеспечивает, по сравнению с известными конструкциями, следующие преимущества: качество обработанной поверхности, а именно шероховатость улучшается до Ra 0,63 мкм; повышение экономической эффективности процесса размерной обработки электрической дугой; расширение границ рационального применения процесса размерной обработки электрической дугой; растет конкурентоспособность процесса размерной обработки электрической дугой за счет оптимального сочетания его количественных и качественных характеристик; повышается точность обработки.*

*Приведена методика расчета исполнительных размеров электродов-инструментов. Описаны особенности, которые нужно учитывать при проектировании электродов-инструментов. Приведены особенности влияния динамического давления потока рабочей жидкости и состав рабочей жидкости в форму износа электрода-инструмента. Показано, что для оптимального протекания процесса размерной обработки электрической дугой необходимо в электродах-инструментах предусматривать технологические отверстия для отвода рабочей жидкости и продуктов эрозии из зоны обработки, которые по форме должны повторять форму рабочей кромки. Показано влияние основных*

*технологических характеристик процесса размерной обработки электрической дугой на величину межэлектродного зазора*

*Ключевые слова: размерная обработка электрическою дугой, электрод-инструмент, межэлектродный зазор, шероховатость поверхности, рабочая кромка электрода.*

V.I. NOSULENKO, V.N. SHMELYOV, A.A. PASHCHENKO
Centralukrainian National Technical University, Kropivnitsky

**ELECTRODES-INSTRUMENTS FOR DIMENSIONAL PROCESSING OF METAL BY ELECTRIC ARC**

*In this paper, we consider the construction of an electrode- tool, which differs in that by length in the 10...20mm from the first working edge, and at a surface conjugation angle φ≥60°, there is additionally one more working edge of the electrode-tool. Elements and geometry of the second working edge repeat the elements and geometry of the first working edge. When making a hole, all the lateral dimensions of the second edge are 1...6 mm larger relative to the contour of the first edge, thus forming an external equidistant. When making a rod, all the lateral dimensions of the second edge are 1...6 mm smaller relative to the contour of the first edge, thus forming an internal equidistant. It is resulted the construction of electrode-tools that provide, in comparison with known designs, such advantages: the quality of the surface to be treated, namely, the roughness is improved to Ra 0.63 μm; increases the economic efficiency of the process of dimensional processing by electric arc; the boundaries of the rational application of the process of dimensional processing with an electric arc are widened; the competitiveness of the process of dimensional processing by electric arc increases due to the optimal combination of its quantitative and qualitative characteristics; improves the accuracy of processing. The technique of calculation of the executive dimensions of tool electrodes is given.*

*The method of calculating the executive dimensions of tool electrodes is given. Described features that need to be considered when designing electrode tools. Features of the influence of the dynamic pressure of the working fluid flow and the composition of the working fluid in the form of wear of the tool electrode are given. It is shown that, for the optimal course of the dimensional machining by electric arc , it is necessary to provide in electrode-tool of the technologic holes for the removal of working fluid and erosion products from the treatment zone, which in shape must be repeated in the form of a working edge. The influence of the main technological characteristics of the process of dimensional machiningby electric arc on the value of the interelectrode gap is shown.*

*Keywords: dimensional processing by electric arc, electrode-tool, interelectrode gap, surface roughness, working edge of an electrode.*

**Постановка проблеми**

Для забезпечення точності та якості отримуваних деталей після розмірної обробки електричною дугою (РОД) необхідно точно виготовити електрод-інструмент (ЕІ), з урахуванням його зносу та міжелектродного зазору (МЕЗ), а також забезпечити оптимальні умови протікання процесу РОД.

Вартість і стійкість ЕІ значною мірою визначають ефективність і економічну доцільність реалізації процесу РОД. ЕІ для РОД виготовляються з тих же матеріалів і забезпечують таку ж стійкість, як і при відомих способах електро-розрядної обробки (ЕРО). Зокрема, ЕІ можуть бути виготовлені із графітизованих матеріалів, наприклад, марки МПГ-7, сталі, сірого чавуну, міді, латуні, алюмінієвих сплавів і т. і., а їх об'ємний знос може коливатись в межах від сотих і десятих часток відсотка до 100% і більше.

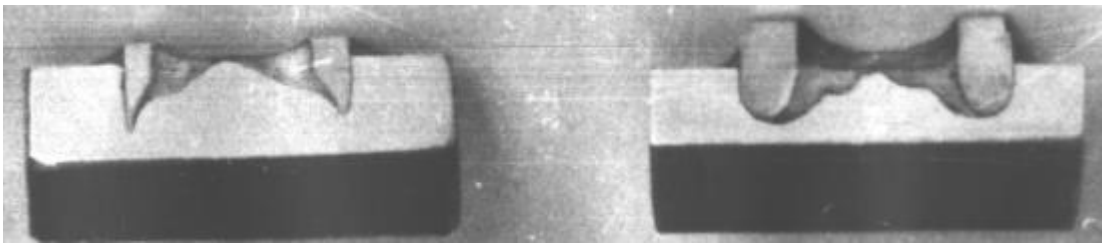
Зупинимось на деяких особливостях зносу ЕІ в умовах РОД стосовно копіювально-прошивних операцій. Стійкість ЕІ є функцією таких параметрів процесу, як матеріал і полярність електродів, склад і динамічний тиск потоку робочої рідини, напруга і струм розряду, МЕЗ, форма і розміри електродів, гідродинамічний режим течі робочої рідини, який змінюється на різних ділянках електрода і т. і.

Звичайно металеві електроди мають порівняно невисоку стійкість (за виключенням електродів на основі вольфраму), їх об'ємний знос звичайно не менше 20…30% і тому застосування таких електродів доцільне лише в тих випадках, коли їх знос не впливає на точність отриманих деталей, наприклад, при прошиванні наскрізних отворів, або ж коли це викликано технологічною необхідністю. Так, наприклад, при обробці твердих сплавів ЕІ із сірого чавуну забезпечують добру якість і високу продуктивність процесу.

Зазначимо, що на стійкість і на характер зносу металевих електродів значно впливає полярність електродів. Наприклад, стійкість латунних електродів при обробці сталей при прямій полярності приблизно в три рази вища, ніж при зворотній. Різним при зміні полярності є також характер зносу металевих ЕІ. Це відображено на рис. 1, де показано металеві ЕІ в оброблених заготовках при прошиванні наскрізних отворів при прямій (*а*) і зворотній (*б*) полярності.

Найбільш високу стійкість, аналогічно як і при відомих способах ЕРО, забезпечують ЕІ із

графітизованих матеріалів типу МПГ-7 при застосуванні в якості робочих середовищ нафтопродуктів (масло, гас і т. і.) і при зворотній полярності електродів. За цих умов об'ємний знос ЕІ залежить від струму обробки *I*, напруги дуги *U*, динамічного тиску робочого середовища $P_d$, геометрії та розмірів ЕІ і т.і., являє собою складну функцію зазначених параметрів, визначається для конкретних прикладів реалізації експериментально і складає звичайно 0,5…1,5%.



**а** **б**

**Рис. 1. Металеві ЕІ в оброблених заготовках при прямій (а) і зворотній (б) полярності**

Для отримання якісної обробленої поверхні готових деталей необхідно в зоні обробки забезпечити оптимальні умови протікання процесу РОД, а саме, забезпечити рівномірну течію робочої рідини з необхідним динамічним тиском потоку робочої рідини.

Для забезпечення стійкості ЕІ їх зазвичай виготовляють з робочим пояском висотою *h* (рис 2, а), який з урахуванням зносу електрода (рис 2, б) дозволяв би отримувати деталі з необхідними розмірами. Проте використання даної конструкції ЕІ призводить до того, що в зоні обробки відбувається порушення рівномірності течії робочої рідини в наслідок появи значних гідродинамічних опорів течії робочої рідини на вході в МЕЗ та по всій довжині траси евакуації продуктів ерозії *h+l*. Внаслідок чого при збільшені висоти робочого пояска *h* ЕІ та припуску на обробку шорсткість обробленої поверхні становитиме *Ra*=20мкм і вище.

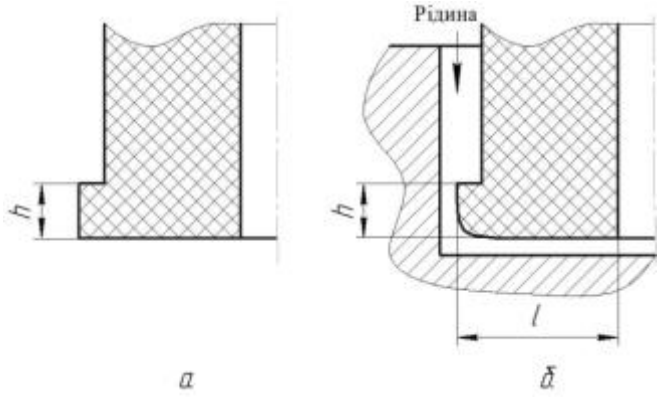



**Рис. 2. Конструкція ЕІ з пояском *h* для розмірної обробки електричною дугою отворів**

**Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Відома конструкція ЕІ для розмірної обробки електричною дугою отворів [1], яка дозволяє покращити умови течії робочої рідини в зоні обробки і тим самим покращити якість обробленої поверхні до *Ra*=10мкм. В такому ЕІ робочий поясок ЕІ, а робочі поверхні ЕІ утворюється кутами (рис. 3), за умови, якщо їх розглядати в напрямку руху робочої рідини в МЕЗ і становлять: передній кут $\alpha \geq 0°30'$; задній кут $\beta=3…5°$; внутрішній кут $\gamma=1°$; радіус заокруглення робочої кромки $R \geq 0{,}5$мм.

Відома також різнорежимна послідовна РОД отворів одним двосхідчастим ЕІ [2] коли, в одному ЕІ поєднуються електроди як для чорнової так і для чистової обробки.

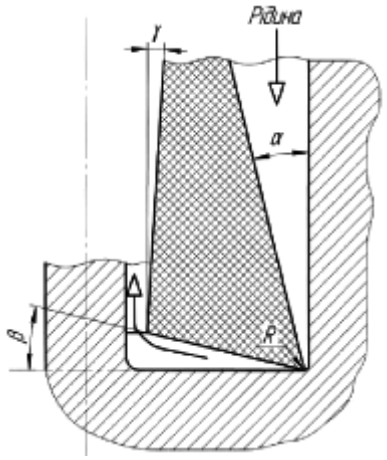



**Рис. 3. Конструкція ЕІ для розмірної обробки електричною дугою отворів**

**Формулювання мети дослідження**

Метою роботи є удосконалення конструкції ЕІ та умов обробки деталей при РОД для покращення якості обробленої поверхні готових деталей.

**Викладення основного матеріалу дослідження**

Профіль формоутворюючої поверхні ЕІ будується згідно технологічних схем формоутворення, режимів обробки та схеми утворення міжелектродних зазорів. Розрахунок геометричної (розмірної) корекції ЕІ з врахуванням міжелектродного зазору, шорсткості поверхні та товщини зони термічного впливу здійснюється згідно існуючих методик ЕРО [3, с. 101...110].

Міжелектродний зазор в умовах РОД є функцією таких параметрів, як матеріал і полярність електродів, склад і динамічний тиск потоку робочої рідини, напруга і струм розряду, гідравлічний режим течі робочої рідини. На рис. 4 показано залежність величини міжелектродного зазору δ від $I$ і $P_d$ при обробці сталі 5ХНТ ЕІ із матеріала МПГ-7 при напрузі на дузі $U_д = 40$В, при використанні в якості робочої рідини гасу (50%) і масла “Індустріальне-12” (50%), при $I = 100...400$А, $P_d = 0{,}01...0{,}5$МПа і при зворотній полярності електродів, що визначається за формулою, мкм:

$$\delta = 29195{,}12 \cdot I^{0{,}13} \cdot P_d^{-0{,}54} \qquad (1)$$

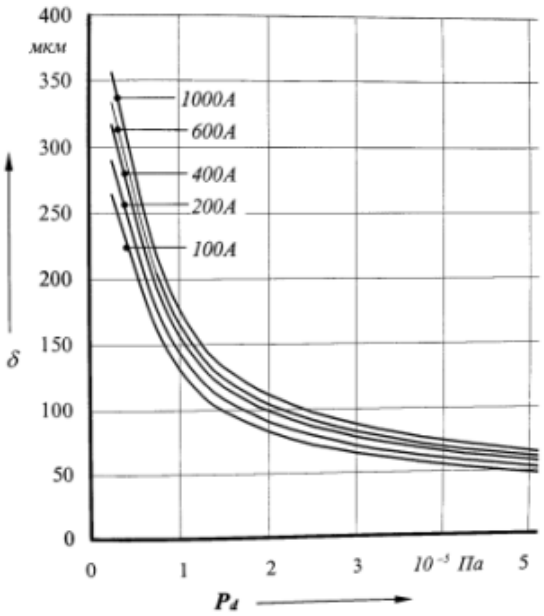
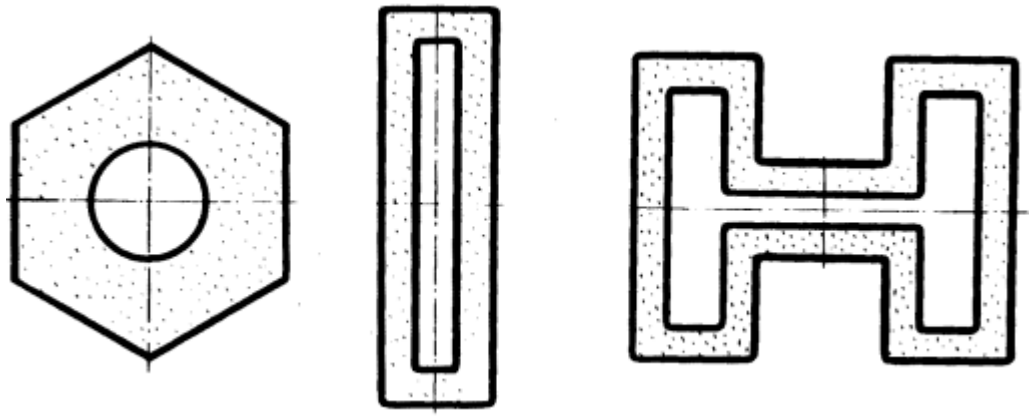



**Рис. 4. Залежність міжелектродного зазору δ від $I$ і $P_d$**

Для прокачування робочої рідини в ЕІ передбачаються спеціальні отвори. При отриманні наскрізних отворів поперечні розміри отворів в ЕІ треба приймати по можливості більшими з тим, щоб зменшити об'єм матеріалу, що руйнується, і таким чином підвищити економічність і продуктивність процесу. Проте, при цьому зменшується товщина стінок ЕІ, яка не може бути менше 3...5мм, оскільки помітно знижується стійкість останнього.

При отримані фасонних поверхонь поперечні розміри отворів в ЕІ повинні бути по можливості мінімальними. Проте при занадто малих розмірах отворів різко зростає потрібний тиск робочої рідини, що не бажано. Тому розміри цих отворів приймаються такими, щоб їх гідравлічний опір при визначених витратах робочої рідини не був значним, а статичний тиск робочої рідини на вході в міжелектродний зазор не перевищував 1,5...2МПа. Отвори треба, по можливості, розташовувати по центру ЕІ, що забезпечує сприятливий гідродинамічний режим течі робочої рідини і оптимальні умови протікання процесу.

За формою отвори ЕІ можуть бути круглими (рис. 5, *а*), прямокутними (рис. 5, *б*) і фасонними (рис. 5, *в*). Перевагу мають круглі отвори, оскільки їх легко отримати. Проте їх можна застосовувати лише для ЕІ круглих і квадратних в плані та близьких до них за формою, коли два поперечних розміри ЕІ приблизно однакові або ж відрізняються незначно (не більше ніж в 1,5...2 рази). Прямокутні отвори (щілини) застосовують для ЕІ видовжених в плані форм. Фасонні отвори застосовують для фасонних в плані ЕІ, коли для забезпечення приблизно однакового гідравлічного режиму течі рідини на різних ділянках отвору чи порожнини, що отримують, контур отвору в ЕІ повинен, хай спрощено, повторити контур останнього.



**а** **б** **в**

**Рис. 5. Отвори в ЕІ**

При реалізації технологічної схеми формоутворення за принципом прошивання з об'ємним копіюванням форми ЕІ, останній, за визначених умов отримує нерівномірний знос. Залежно від режимів обробки слід розрізняти три основні схеми зносу ЕІ із матеріалу МПГ-7 при застосуванні в якості робочого середовища нафтопродуктів:

1. При порівняно невеликих значеннях динамічного тиску потоку робочої рідини ($P_d$ < 0,1МПа) спостерігається незначна зміна робочого контуру ЕІ (рис. 6, *а*).

2. При досить великих значеннях динамічного тиску потоку робочої рідини ($P_d$ > 0,1МПа) при застосуванні в якості робочого середовища масла типу "Індустріальне-12" спостерігається закруглення кутів ЕІ (рис. 6, *б*), причому чим більший струм, тим більше це себе виявляє.

3. При досить великих значеннях динамічного тиску потоку робочої рідини ($P_d$ > 0,1МПа) при застосуванні в якості робочого середовища суміші типу гас (50%) і масло "Індустріальне-12" (50%) кути закруглюються незначно, проте спостерігається нерівномірний знос та помітно змінюється робочий контур ЕІ (рис. 6, *в*), причому тим більше, чим більше $P_d$, що пояснюється різними гідродинамічними режимами течі робочої рідини як по довжині, так і по висоті міжелектродного зазору, особливо на ділянках переходу від вертикальних поверхонь до горизонтальних.

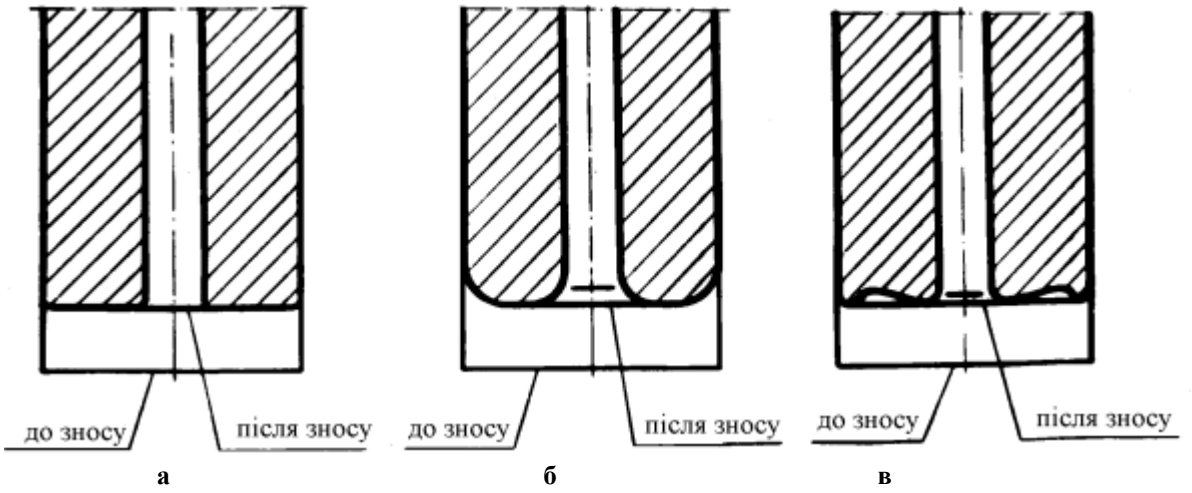



**Рис. 6. Основні схеми зносу ЕІ із матеріалу МПГ-7**

Для підвищення ефективності, точності та якості обробки запропоновано конструкцію ЕІ (рис. 7) який відрізняється тим, що по його довжині на відстані 10…20мм від робочої кромки, назвемо її першою кромкою, та при куті спряження поверхонь φ ≥60° розташовують додатково ще одну, робочу кромку ЕІ, елементи і геометрія якої повторюють елементи і геометрію першої робочої кромки, але усі поперечні розміри якої на 1…6мм більше за умов обробки по внутрішньому контуру по відношенню до контуру першої кромки, утворюючи таким чином зовнішню еквідистанту, при виготовлені отвору (рис. 7, б), і на 1…6мм менше за умов обробки по зовнішньому контуру, по відношенню до контуру першої кромки, утворюючи таким чином внутрішню еквідистанту, при виготовлені стержня (рис. 7, а).

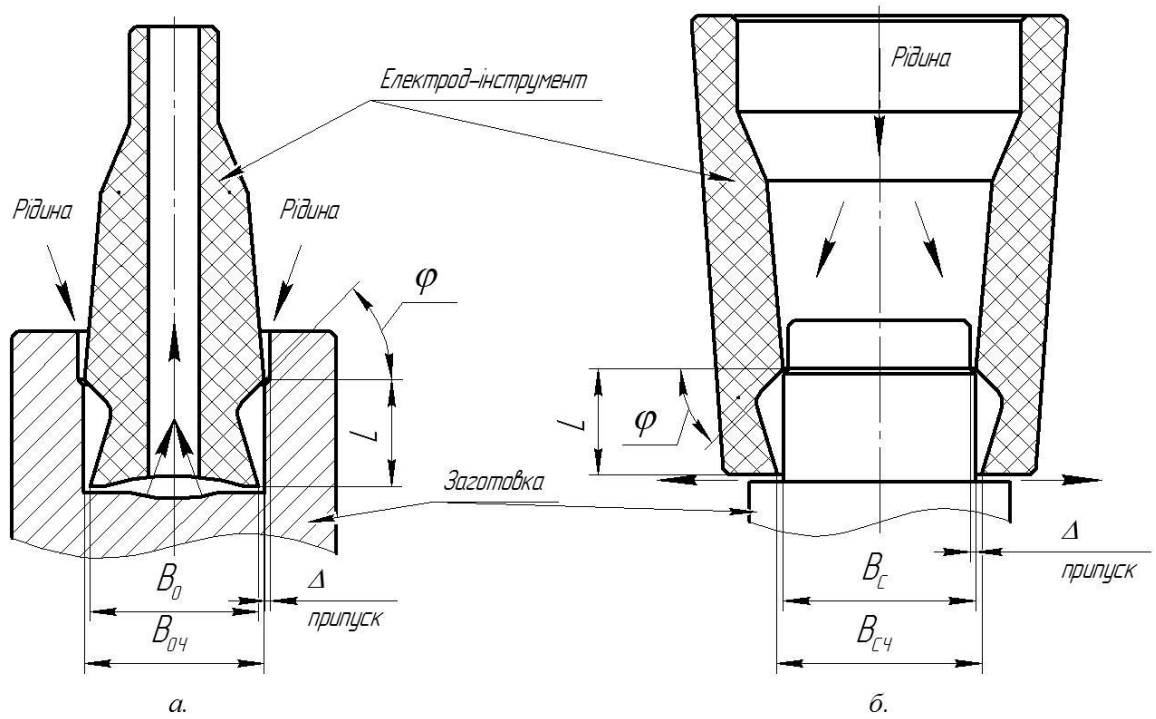



**Рис. 7. Конструкція ЕІ з двома робочими кромками**

Розрахунки та виготовлення ЕІ для РОД здійснюється, певною мірою, як при відомих способах ЕРО [4, с.101...188]. Так, наприклад, виконавчі розміри ЕІ для внутрішніх контурів (отворів) $\boldsymbol{B_o}$ та зовнішніх контурів (стержнів) $\boldsymbol{B_c}$ визначають за формулами:

- чистова обробка $$B_o = \left(A + 0{,}7\Delta_в - 2\delta_2\right)^{+0{,}3\Delta_в} \qquad (2)$$

- чорнова обробка $B_{оч} \le \left(A + 0{,}7\Delta_{в} - 2\left(\delta_1 + z_{\min}\right)\right)^{+0{,}3\Delta_{в}}$ (3)

- чистова обробка $B_{c} = \left(A - 0{,}7\Delta_{н} + 2\delta_2\right)^{-0{,}3\Delta_{н}}$ (4)

- чорнова обробка $B_{сч} \le \left(A + 0{,}7\Delta_{н} + 2\left(\delta_1 + z_{\min}\right)\right)^{-0{,}3\Delta_{н}}$ (5)

де $A$ – номінальний розмір деталі; $\delta_1$, $\delta_2$ – міжелектродний зазор, відповідно при чорновій і чистовій обробці; $z_{min}$ – мінімальний припуск на обробку; $\Delta_в$, $\Delta_н$ – відповідно верхній і нижній допуск на виготовлення деталі.

**Висновки**

1. Описано конструкції електродів-інструментів для РОД, особливості проектування та методику розрахунку його виконавчих розмірів.

2. Запропонована конструкція ЕІ для РОД, що забезпечує такі переваги перед існуючим технологічним рішенням:

- якість обробленої поверхні, а саме шорсткість покращується до Ra 0,63 мкм;
- підвищення економічної ефективності процесу;
- розширення меж раціонального застосування способу РОД;
- зростає конкурентоспроможність процесу за рахунок оптимального поєднання його кількісних і якісних характеристик.
- продуктивність процесу обробки збільшилася на 13%;
- підвищилась точність обробки.

**Список використаної літератури**

1. Патент на корисну модель № 110775 Україна, МПК (2016/01) B23K 9/00. Електрод-інструмент для розмірної обробки електричною дугою отворів / Носуленко В. І., Юр'єв В.В., Пархоменко А. С.; заявник і патентовласник Кіровоградський національний технічний університет. – №u201603083; Заявл. 25.03.2016; Опубл. 25.10.2016. бюл. №20.
2. Боков В. М., Попова В. І. Обробка отворів електричною дугою. Монографія / В. М. Боков, М. І. Попова. – Кіровоград; Поліграфічно-видавничий центр ТОВ «Імекс – ЛТД», 2014. – 160 с.
3. Эккер Г. Современное развитие теории приэлектродных областей электрической дуги // Теплофизика высоких температур. – 1973. – т.2. – вып.4.
4. Электроэрозионная и электрохимическая обработка. Часть 1. / Под. ред. А. Л. Лившица, А. М. Рома. – М.: НИИМАШ, 1980. – 224 с.