

**О. П. Плахотний**, к.т.н., доцент,  
доцент кафедри енерготехнологій  
e-mail: [pldecor@ukr.net](mailto:pldecor@ukr.net)

Черкаський державний технологічний університет  
б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

## ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ РОЗМІРНОЇ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОЇ ОБРОБКИ ДРОТЯНИМ ЕЛЕКТРОДОМ НА ОСНОВІ МОДЕЛЮВАННЯ ТРИВИМІРНИХ ЕЛЕКТРОСТАТИЧНИХ ПОЛІВ

*Комбінована технологія послідовного використання електроерозійної обробки та електрохімічної обробки дротяним електродом дозволяє структурувати поверхню і формувати металеві компоненти з високою точністю, незалежно від міцності та твердості матеріалів. У межах цього дослідження усуваються деякі проблеми, які можуть обмежувати подальший розвиток запропонованої технології. Проста тривимірна модель за методом кінцевих елементів використовується для розрахунку розподілу первинного струму на поверхні аноду. Тривимірні результати порівнюються з даними двовимірного аналітичного моделювання. Це дозволяє перевірити точність алгоритму. В результаті проведених розрахунків встановлено, що катод з ізоляційним шаром, нанесеним на бічну стінку, може поліпшити локалізацію і точність обробки.*

**Ключові слова:** електроерозійна вирізна обробка, електрохімічна обробка, дротяний електрод-інструмент, комп'ютерне моделювання.

**Вступ.** Електроерозійна обробка є найбільш поширеною серед методів електрофізичної обробки металів і сплавів. Таке поширення методу обумовлене високою точністю обробки і малою залежністю продуктивності від властивостей матеріалу, що обробляється. Найбільшою точністю відрізняється електроерозійна вирізна обробка дротяним електродом (ЕЕВО ДЕ). Однак покращення шорсткості обробленої поверхні, видалення поверхневих термічно змінених шарів є актуальною проблемою для ЕЕВО ДЕ. Вирішення проблеми шляхом застосування багатопрхідної електроерозійної обробки призводить до суттєвих втрат продуктивності і значного здорожчання. Інноваційним методом фінішування поверхні після ЕЕВО ДЕ є застосування нетермічного способу електрохімічної розмірної обробки (ЕХРО) рухомим дротяним електродом [1, 2].

Основною задачею при реалізації конкретної технологічної схеми ЕХРО є забезпечення рівномірності анодного розчинення по всій поверхні деталі, яка б не погіршувала точності формоутворення ЕЕВО. Розв'язання задачі складається з двох частин.

Проблематика першої частини полягає в неоднаковій швидкості розчинення зі зміною товщини поверхневих термічно модифікованих шарів, утворених внаслідок дії іскрових розрядів. Дослідженню цього питання присвячено ряд робіт і на сьогодні запропоновано ряд рішень та методик. Моделюється утво-

рення поверхневих шарів при тепловій дії іскрових розрядів з енергетичними параметрами, характерними для ЕЕВО ДЕ, розраховуються товщина структурно змінених шарів і шорсткість поверхні [3, 4]. Далі проектування процесу анодного розчинення проводиться з урахуванням змінного коефіцієнта електрохімічного розчинення для електроерозійно модифікованих шарів [2].

Друга частина задачі полягає у забезпеченні керованості підведенням технологічного струму в процесі ЕХРО до поверхні анода при різних конфігураціях електродів. Застосування імпульсного струму, комп'ютерне моделювання розподілу електростатичних полів і електрохімічного формоутворення привели до значного прогресу за останнє десятиліття у вирішенні питання покращення точності обробки. За умови попереднього моделювання процесу електрохімічна обробка з успіхом застосовується для відтворення внутрішньої геометрії прецизійних деталей незалежно від твердості і міцності матеріалу заготовки [5]. Використання ультракоротких імпульсів струму і моделювання розподілу електростатичних полів з метою збільшення локалізації процесу розчинення дає змогу розвивати і поширювати імпульсну електрохімічну мікрообробку для виробництва мікроструктур з високою точністю [6].

Сучасне математичне моделювання процесів ЕХРО проводиться на основі розв'язків відповідних диференціальних рів-

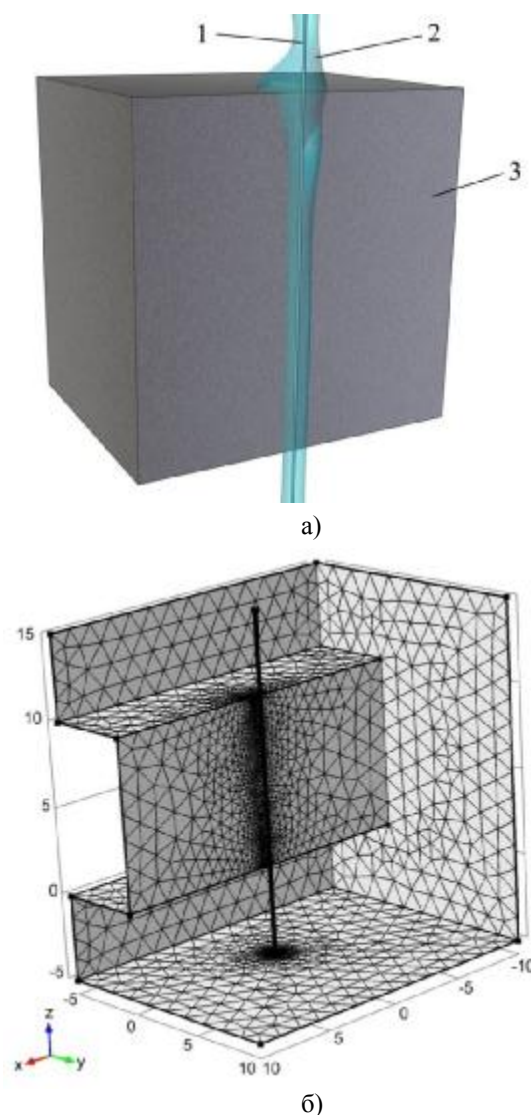
нянь, отриманих аналітичним або чисельним методом, чи з використанням розрахункових систем, що працюють на основі чисельного методу кінцевих елементів, у випадку складної конфігурації електродів [7–11]. Адекватність математичної моделі реальному процесу підвищують за рахунок введення в розгляд додаткових рівнянь та співвідношень, що враховують вплив багатьох чинників на інтенсивність реакцій електрохімічного розчинення. Перспективним у сенсі розвитку і подальшого уточнення математичної моделі є застосування розрахункового пакету COMSOL Multiphysics. Після моделювання первинного розподілу струму можна значно підвищити адекватність моделі, ввівши в розрахунок чинники, що формують вторинний, третинний розподіли струму, інші параметри просторово-часової еволюції процесу, що врешті-решт приведе до отримання моделі, яка застосовна до проектування унікальних технологій виготовлення складних структур в металах та інших матеріалах з розміром у мікрометричному діапазоні [12].

Для технологічної схеми ЕХРО дротяним катодом плоскої поверхні анода (рис. 1, а) існуючі в літературі математичні моделі розроблені тільки в двовимірній постановці [7, 8]. Розвитку математичного опису ЕХРО дротяним електродом у тривимірній постановці присвячена ця стаття.

**Мета роботи** – розробити ефективний розрахунковий апарат для прогнозування параметрів точності формоутворення та їх підвищення при проектуванні технологічних процесів ЕХРО дротяним електродом шляхом моделювання тривимірних електростатичних полів.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Технологічна схема застосування комбінованої обробки ЕЕВО ДЕ та ЕХРО полягає в наступному. Після виконання вирізної електроерозійної операції деталь залишається закріпленою на призмах верстата зі збереженням координат позиціонування. Далі виконується електрохімічна обробка. З верхньої камери верстата під дією тиску подається струмінь електроліту вздовж дротяного електрода-інструмента (ДЕІ), який є катодом (рис.1, а). Деталь слугує анодом. Міжелектродний проміжок (МЕП) заповнюється електролітом, який постійно оновлюється. Приводи верстата за керуючою програмою переміщують ДЕІ по траєкторії, що відповідає траєкторії електроерозійного вирізання з урахуванням еквідистанти – зміщення, яке забезпечує

заданий міжелектродний проміжок протягом усієї операції електрохімічної обробки. Швидкість переміщення ДЕІ, параметри імпульсного струму, склад та концентрація електроліту визначають товщину розчиненого поверхневого шару. Звичайно, на швидкість проходження електрохімічних реакцій впливають багато чинників, але все ж визначальною, згідно з законом Фарадея, є густина струму, підведена до кожної ділянки поверхні анода. Тому важливим є попередній розрахунок розподілу напруженості електростатичного поля на поверхні анода при проектуванні технологічної схеми з застосуванням циліндричного дротяного катода, яка б забезпечувала рівномірну товщину знятого шару.



**Рис. 1. Технологічна схема ЕХРО дротяним електродом:** а) фізична схема: 1 – ДЕІ; 2 – струмінь електроліту; 3 – поверхня деталі, яка обробляється; б) відповідна розрахункова область і її кінцево-елементна сітка

Процес електрохімічної обробки – багатостадійний і надзвичайно складний. Для кращого обчислення були зроблені наступні припущення, які спрощують розрахункову модель. Зміна концентрації електроліту при проходженні реакцій не врахована, тому провідність електроліту прийнята постійною. Температура в зоні обробки є постійною і не впливає на швидкість процесу. Коефіцієнт виходу за струмом прийнятий постійним. Тобто вважаємо, що товщина розчиненого шару визначається кількістю електрики, наданої кожній ділянці анода за час обробки, і основним чинником є густина первинного розподілу струму при заданій конфігурації електродів.

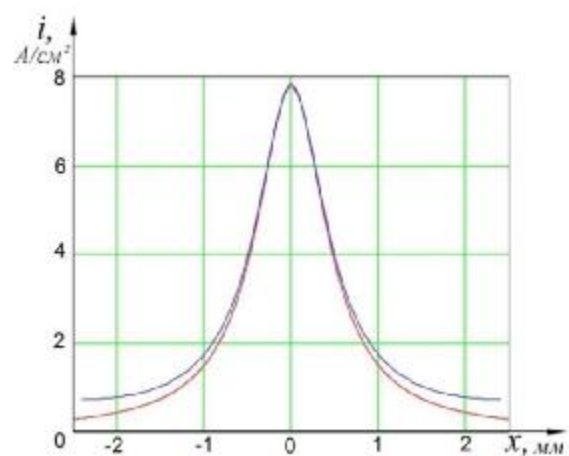
На рис. 1, б) зображена геометрія розрахункової області, її розбиття просторовою сіткою і заповнення кінцевими елементами у формі тетраєдрів. Сітка згущена в областях навколо дрютяного електрода, міжелектродного проміжку і на поверхнях анода, де слід очікувати максимальної концентрації густини струму. Для визначення електростатичних полів розрахунок проводиться тільки один раз, тому кількість елементів розбиття може бути великою, це не має суттєвого впливу на час розрахунку. При моделюванні процесів розчинення розраховується нестационарна задача, і обчислення проводяться багатократно для кожного кроку за часом, тому кількість кінцевих елементів слід вибирати раціонально. Можна, наприклад, при кожному наступному збільшенні щільності сітки порівнювати між собою отримані результати. Якщо вони відрізняються між собою в межах заданої точності, то ущільнення сітки припиняють. Ця властивість притаманна збіжним чисельним методам, до яких відноситься і метод кінцевих елементів.

Граничні умови – 0 В на гранях анода, U В на поверхні циліндричного катода.

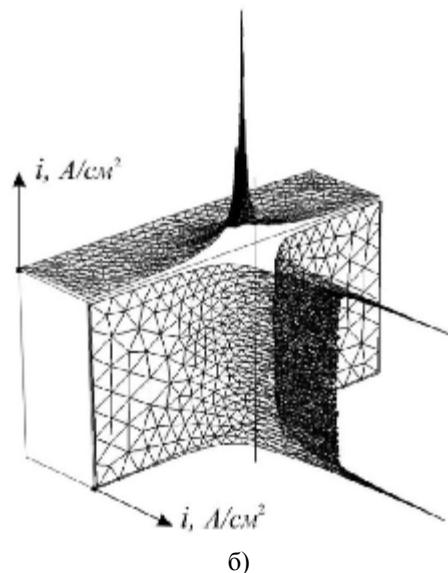
Для тестування обчислювальної схеми проводилось порівняння отриманих результатів розрахунку з відомими точними аналітичними розв'язками двовимірних задач. На рис. 2, а) червона крива відображає результати розподілу густини струму на аноді за аналітичним розв'язком, отриманим за допомогою методу конформних відображень теорії функцій комплексної змінної для конфігурації електродів на площині: катод – коло, анод – півплощина [1, 7]. Синя крива – розподіл густини струму в перерізі в площині XOY, посе-

редині передньої грані анода, тривимірного електростатичного поля, отриманого чисельним методом. Спостерігаємо точний збіг результатів у зоні активного розчинення. Незначна розбіжність на краях пояснюється тим, що чисельний метод, на відміну від аналітичного, враховує реальну скінченну зону змочування електролітом.

Користуючись результатами розрахунку розподілу густини струму на поверхні деталі в поперечному перерізі, як зображено на рис. 2, а), можна контролювати величину зони активного розчинення. Вибір геометричних параметрів катода, анода, міжелектродного проміжку дозволяє впливати в певних межах на локалізацію процесу.



а)



б)

**Рис. 2. Результати розрахунку:** а) порівняння розподілу струму, отриманого з використанням точного розв'язку двовимірної моделі (червона крива) і чисельного розв'язку тривимірної моделі (синя крива); б) сіткові графіки розподілу густини струму на передній та верхній гранях анода

Аналіз результатів чисельного розрахунку тривимірного розподілу густини струму на передній та верхній гранях анода (на нижній грані – симетрично) свідчить про двократне збільшення рівня концентрації струму в локальних областях на ребрах анода (рис. 2, б). Проведені обчислювальні експерименти показали, що варіація значень діаметра ДЕІ, величини міжелектродного проміжку, висоти анода не змінює вищезазначеної тенденції. На практиці це проявляється в суттєвій нерівномірності швидкості розчинення по висоті деталі. На рис. 3 зображена вертикальна канавка, експериментально отримана внаслідок електрохімічного розчинення поверхні деталі-анода при дії електричного поля від нерухомого дротяного катода. Поблизу ребер спостерігається більша площа знятого електроерозійно зміненого поверхневого шару, і глибина канавки з самого верху і низу більша, чим загалом усередині. Розрахунок кількості розчиненого матеріалу зверху і посередині деталі в перерахунку на профілі канавки у відповідних перерізах збігається з експериментальними вимірами з похибкою, що не перевищує 5 %.

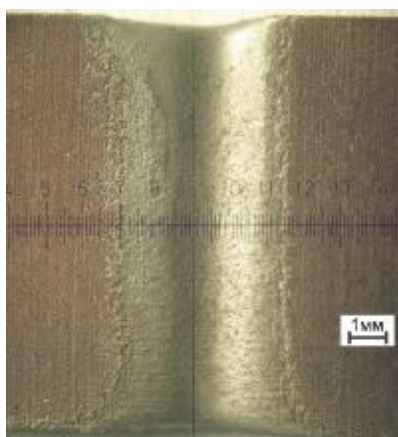


Рис. 3. Канавка на поверхні деталі, отримана в результаті розчинення при дії електростатичного поля між нерухомим ДЕІ та анодом

Для зменшення нерівномірності розподілу струму по висоті необхідні додаткові конструктивні рішення та технологічні прийоми. Одним із таких рішень є застосування ізолятора (рис. 4, а), який обмежує активну довжину катода – дротяного електрода-інструмента. Ізолятор встановлюється на відстані  $h$  від верхньої та нижньої граней деталі і, зважаючи на те, що дріт не переміщується при ЕХРО, ця відстань буде збережена протягом

усього технологічного процесу. Техніка нанесення ізолятора на електроди і його експлуатаційна стійкість в умовах взаємодії з електролітами добре описані в літературі [13].

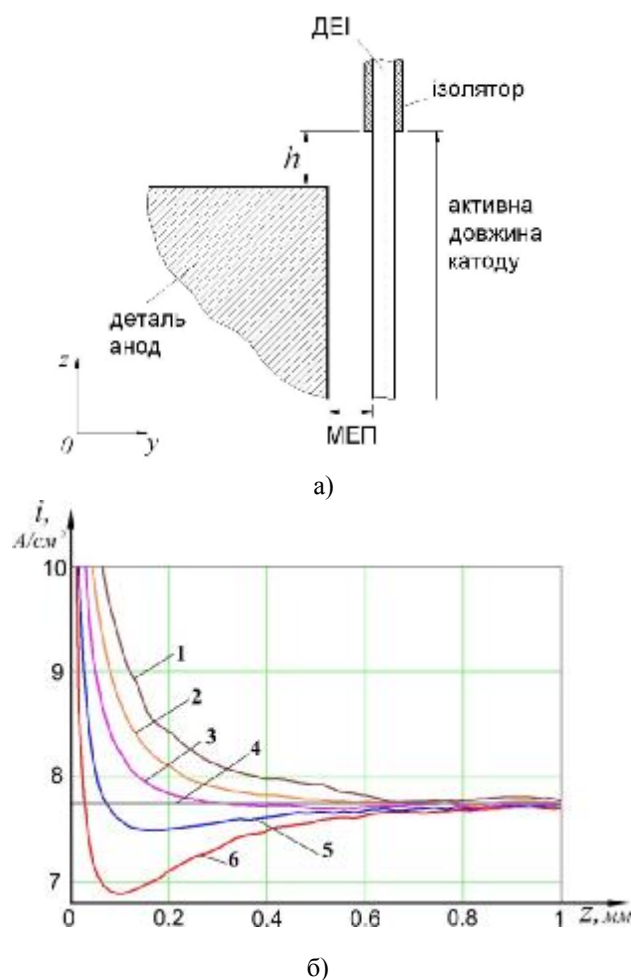


Рис. 4. Застосування ізолятора при ЕХРО дротяним електродом: а) схема розміщення ізолятора; б) розподіл густини струму на передній грані деталі вздовж осі  $OZ$  при різних положеннях ізолятора: 1 – без ізолятора; 2 –  $h=0.5$  мм; 3 –  $h=0.25$  мм; 5 –  $h=0.1$  мм; 6 –  $h=0$  мм; 4 – значення густини струму далеко від ребер деталі

Розрахунок електростатичного поля з застосуванням ізолятора дає можливість вибрати найбільш прийнятне значення висоти  $h$  при конкретних заданих значеннях інших параметрів. На рис. 4, б) представлені результати розподілу густини струму в перерізі в площині  $YOZ$  на передній грані анода. Точка  $z=0$  – це точка на ребрі деталі, далі  $z>0$  – вздовж поверхні анода.

Для умов наведеного прикладу доцільно вибрати розташування ізолятора в діапазоні висоти  $h=0.1-0.25$  мм. Величина діапазону вибрана з міркувань можливості дотримання

на практиці вказаного розміру при розташуванні ДЕІ з ізоляторами відносно граней деталі. Наведені висоти відповідають кривим 3 і 5 на графіку розподілу густини струму (рис. 4, б). Так, при  $h=0.1$  мм згідно з розрахунковою кривою 3 отримаємо приблизно 0.3 мм висоти «пошкодженої» ділянки у верхній частині деталі. При  $h=0.25$  мм отримаємо висоту 0.1 мм «пошкодженої» ділянки і незначне (в межах 5%) зменшення густини струму в прилеглій зоні. В подальшому технологічною операцією плоского шліфування можна зняти з верхньої і нижньої граней деталі встановлену товщину шару. Інший технологічний спосіб полягає в застосуванні накладних листів розрахованої товщини, що затискаються зверху та знизу заготовки і в процесі виготовлення деталі за комбінованою технологією зменшують відкладення латуні при оберненому переносі матеріалу з ДЕІ на стадії електроерозійного різання і відводять зону підвищеного розчинення при операції електрохімічної обробки.

**Висновки.** Розроблено і випробувано методику математичного комп'ютерного розрахунку розподілу густини технологічного струму в тривимірній постановці для конфігурації плоский анод – циліндричний катод, яка допомагає прогнозувати точність формотворення при проектуванні процесу обробки за комбінованою технологією послідовного застосування ЕЕВО ДЕ та ЕХРО.

Запропоновано технологічний прийом з використанням ізоляторів на ДЕІ, який при застосуванні разом з математичним апаратом розрахунку електростатичних полів зменшує нерівномірність розподілу густини струму і цим підвищує точність виготовлення виробу.

### Список літератури

1. Осипенко В. І., Плахотний А. П., Билан А. В. Исследование процессов съема материала при электрохимической размерной обработке проволочным электродом. *Вісник СевНТУ: зб. наук. праць*. 2011. Вип. 118. С. 107–112.
2. Osipenko V. I., Plakhotny A. P., Denisenko A. Yu. Improved methodology for calculating the processes of surface anodic dissolution of spark eroded recast layer at electrochemical machining with wire electrode. *Праці Одеського політехнічного університету*. 2014. Вип. 1 (43). С. 55–60.
3. Hackert-Oschätzchen M., Kreißig M., Kowalick M., Zeidler H., Schubert A., Kröning O., Herzig M., Schulze H.-P. Single discharge simulations of needle pulses for electrothermal ablation. *Proceedings of the 2013 COMSOL Conference in Rotterdam*. 2013.
4. Осипенко В. І., Плахотний О. П., Нестеренко І. М. Розрахунок мікрогеометричних параметрів поверхневого шару при електроерозійному дротяному вирізанні повного зйому. *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*. 2015. № 3. С. 95–102.
5. Hackert-Oschätzchen M., Kowalick M., Paul R., Zinecker M., Kuhn D., Meichsner G., Schubert A. 2-D axisymmetric simulation of the electrochemical machining of internal precision geometries. *Proceedings of the European COMSOL Conference*. 2016.
6. Kozak J., Gulbinowicz D., Gulbinowicz Z. The mathematical modeling and computer simulation of pulse electrochemical micromachining. *Engineering Letters*. 2008. Т. 16, № 4. Р. 556–561.
7. Житников В. П., Зайцев А. Н. Импульсная электрохимическая размерная обработка: монография. Москва: Машиностроение, 2008. 413 с.
8. Волгин В. М., Любимов В. В., Давыдов А. Д. Моделирование электрохимического формообразования поверхностей подвижным электродом-инструментом. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2015. № 10. С. 54–67.
9. Проничев Н., Палютин С., Нехорошев М. Моделирование электрических полей в электрохимической ячейке в условиях ЭХО средствами программного комплекса «ANSYS». *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва*. 2006. № 2–1. С. 317–321.
10. Purcar M., Dorochenko A., Bortels L., Decoinck J., Van den Bossche B. Advanced CAD integrated approach for 3D electrochemical machining simulations. *Journal of Materials*

- Processing Technology*. 2008. T. 203, № 1. P. 58–71.
11. Penzel M., Hackert-Oschätzchen M., Kreibig M., Kowalick M., Zinecker M., Schubert A., Meichsner G. Transient simulation of an electrochemical machining process for stamping and extrusion dies. *Proceedings of the European COMSOL Conference*. 2016.
  12. Kumsa D., Scherson D. A. Theoretical aspects of pulsed electrochemical micromachining. *Journal of The Electrochemical Society*. 2013. T. 160, № 8. P. H481–H488.
  13. Yao J., Chen Z., Nie Y., Li Q. Investigation on the electrochemical machining by using metal reinforced double insulating layer cathode. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017. T. 89, № 5–8. P. 2031–2040.
- ### References
1. Osipenko, V. I., Plakhotnyi, A. P. and Bilan, A. V. (2011) Investigation of material removal processes in electrochemical machining using wire electrode. *Visnik SevNTU: zb. nauk. pr.*, (118), pp. 107–112 [in Russian].
  2. Osipenko, V. I., Plakhotnyi, A. P. and Denisenko, A. Yu. (2014) Improved methodology for calculating the processes of surface anodic dissolution of spark eroded recast layer at electrochemical machining with wire electrode. *Pratsi Odeskoho politekhnichnoho universytetu*, 1 (43), pp. 55–60.
  3. Hackert-Oschätzchen, M., Kreibig, M., Kowalick, M., Zeidler, H., Schubert, A., Kroning, O., Herzig, M. and Schulze, H.-P. (2013) Single discharge simulations of needle pulses for electrothermal ablation. *Proceedings of the 2013 COMSOL Conference in Rotterdam*.
  4. Osypenko, V. I., Plakhotnyi, O. P., Nesterenko, I. M. (2015) Calculation of microgeometrical parameters of surface layer at electroerosion wire cutting of complete removal. *Visnyk Cherkaskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu. Seria: Tehnichni nauky*, (3), pp. 95–102 [in Ukrainian].
  5. Hackert-Oschätzchen, M., Kowalick, M., Paul, R., Zinecker, M., Kuhn, D., Meichsner, G. and Schubert, A. (2016) 2-D axisymmetric simulation of the electrochemical machining of internal precision geometries. *Proceedings of the European COMSOL Conference*.
  6. Kozak, J., Gulbinowicz, D. and Gulbinowicz, Z. (2008) The mathematical modeling and computer simulation of pulse electrochemical micromachining. *Engineering Letters*, 16 (4), pp. 556–561.
  7. Zhitnikov, V. P. and Zaitsev, A. N. (2008) Pulse precision electrochemical machining. Moscow: Mashinostroenie, 413 p. [in Russian].
  8. Volgin, V. M., Liubimov, V. V. and Davydov, A. D. (2015) Modeling of electrochemical formation of surfaces by a moving tool electrode. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, (10), pp. 54–67 [in Russian].
  9. Pronichev, N., Paliutin, S. and Nekhoroshev, M. (2016) Modeling of electric fields in electrochemical cell under conditions of ECHO by means of a program complex "ANSYS". *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akademika S. P. Koroleva*, No. 2-1, pp. 317–321 [in Russian].
  10. Purcar, M., Dorochenko, A., Bortels, L., Deconinck, J. and Van den Bossche, B. (2008) Advanced CAD integrated approach for 3D electrochemical machining simulations. *Journal of Materials Processing Technology*, 203 (1), pp. 58–71.
  11. Penzel, M., Hackert-Oschätzchen, M., Kreibig, M., Kowalick, M., Zinecker, M., Schubert, A. and Meichsner, G. (2016) Transient simulation of an electrochemical machining process for stamping and extrusion dies. *Proceedings of the European COMSOL Conference*.
  12. Kumsa, D. and Scherson, D. A. (2013) Theoretical aspects of pulsed electrochemical micromachining. *Journal of The Electrochemical Society*, 160 (8), pp. H481–H488.
  13. Yao, J., Chen, Z., Nie, Y. and Li, Q. (2017) Investigation on the electrochemical machining by using metal reinforced double insulating layer cathode. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 89 (5–8), pp. 2031–2040.

**O. P. Plakhotnyi**, *Ph.D., associate professor,*  
*associate professor of the department of energy technology*  
Cherkasy State Technological University  
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine  
e-mail: [pldecor@ukr.net](mailto:pldecor@ukr.net)

**ENHANCEMENT OF ACCURACY OF DIMENSIONAL ELECTROCHEMICAL  
PROCESSING BY A WIRE ELECTRODE ON THE BASIS  
OF THREE-DIMENSIONAL ELECTROSTATIC FIELD MODELING**

*Combined technology for the sequential use of electroerosive treatment and electrochemical machining with a wire electrode allows the surface to be structured and the metal components to be fused with high accuracy, regardless of the strength and hardness of materials. Within the scope of this study, some issues which may limit the further development of the proposed technology are eliminated. A simple three-dimensional model by the finite element method is used to calculate the distribution of primary current on the surface of the anode. Three-dimensional results are compared with the data of two-dimensional analytical modeling. This allows to check the accuracy of the algorithm. As a result of the calculations, it is established that a cathode with an insulating layer applied to the side wall can improve the localization and accuracy of the treatment.*

**Key words:** *electro-erosive treatment, electrochemical machining, wire electrode-tool, computer modeling.*