

УДК 621.357

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.1.1/33>**Дундуков П.О.**<https://orcid.org/0009-0002-2187-149X>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Ущиповський Д.Ю.<https://orcid.org/0000-0002-2809-2774>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ЛОКАЛЬНЕ ЕЛЕКТРОХІМІЧНЕ ОСАДЖЕННЯ МІДНИХ МІКРОРОЗМІРНИХ ЕЛЕМЕНТІВ СТРУМОПРОВІДНОГО РИСУНКУ ДРУКОВАНИХ ПЛАТ

Дана стаття присвячується дослідженню локального електрохімічного осадження мідних мікрооб'єктів діаметром до 1000 мкм із застосуванням сульфатного та нітратного електролітів. Встановлено, що при локальному електроосадженні з використанням анода розміщеного в діелектричному капілярі з діаметром отвору 771 мкм, піднятому над поверхнею катода на висоту 1 мм, відбувається істотне розсіювання зони осадження міді по поверхні катода, унаслідок чого процес локального електроосадження є малоефективним. Це узгоджується з даними мультифізичного комп'ютерного моделювання і свідчить про те, що для забезпечення прецизійного формування мідних об'єктів діаметром до 1000 мкм необхідно мінімізувати зазор між поверхнею катода та краєм діелектричного корпусу капіляра. Підвищення ефективності осадження зі зростанням робочої густини струму може бути пов'язане зі зменшенням розсіювальної здатності електроліту, що загалом є позитивним чинником, оскільки сприяє підвищенню точності локального електроосадження. Встановлено, що у концентрованому нітратному електроліті швидкість і вихід за струмом є вищими порівняно із сульфатним, що пояснюється більшим вмістом іонів міді та нижчою розсіювальною здатністю середовища. При цьому геометричний профіль отриманих мідних об'єктів у нітратному електроліті є більш наближеним до ідеально прямокутного. Також показано, що в нітратному електроліті формуються компактні осади з більш грубокристалічною структурою порівняно із сульфатним електролітом, що обумовлено відсутністю блискоутворюючих добавок. Використання нітратного електроліту забезпечує отримання компактних мідних об'єктів висотою 140 мкм, при густині струму 20 А/дм², за ефективності осадження, що приблизно на третину перевищує аналогічний показник для сульфатного електроліту.

Ключові слова: локальне електрохімічне осадження, приховані мікропереходи, електроліт міднення, ефективність осадження, структура металу.

Постановка проблеми. Через постійну потребу в мініатюризації та підвищенні обчислювальних можливостей особливе місце серед них мають саме багатошарові плати друкованого монтажу (БПДМ). Основними перевагами сучасних БПДМ є можливість значно зменшити розміри виробу виготовленого на їх основі, можливість застосування компактних радіоелементів поверхневого монтажу та автоматизації їх встановлення. Використовуючи сучасні технології виробництва можлива інтеграція базових функціональних еле-

ментів (резистори або конденсатори) в структуру плати на етапі виробництва. Визначено, що подібна інтеграція дозволяє покращити електричні характеристики готових виробів та збільшити щільність розташування елементів на друкованій платі [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основним компонентом що робить існування БПДМ можливим є перехідні отвори. Для збільшення густини монтажу, ефективності використання наявного простору та покращення



електричних характеристик друкованих плат використовують перехідні отвори малого діаметру – мікропереходи [2]. Високе співвідношення довжини до діаметру ускладнює процес металізації, але виготовлення подібних металізованих отворів є доволі дослідженою проблемою та має ряд технологічних рішень [3, 4]. Перехідні отвори (мікропереходи) поділяються на 3 типи: наскрізні (проходять через всю товщину готової плати), глухі (виходять на один із зовнішніх шарів але не проходять через всю товщину), закриті (з'єднують 2 або більше внутрішніх шари та не виходять до зовнішніх шарів). Для виготовлення друкованих плат із такими елементами необхідним є залучення методу товстошарового електроосадження із селективним заповненням металом таких отворів [5]. Однак відповідна технологія потребує дуже ретельного контролю складу електроліту і є малопродуктивною. В даній роботі основна увага приділяється перспективам використання адитивної технології – локального електрохімічного осаження, оскільки ця технологія дозволяє отримати вироби в мікромасштабі без використання підтримуючих структур, високих температур та потреби інертної атмосфери або вакууму [6]. Існує декілька видів локального електрохімічного осаження. Зокрема, розрізняють локальне електрохімічне осаження з використанням: незаізолюваного мікроанода [7], капіляру наповненого електролітом, мікрокапіляру [8] та мікрокапіляру з декількома отворами [9], осаження обмеженого меніском електроліту [8], зонда [10]. Поступове зменшення розміру анода дозволяє збільшити точність та якість отримуваних мікроструктур. Було проведено дослідження впливу міжелектродної відстані, діаметру аноду та їх співвідношення на густину струму, а також вплив змінного струму та його параметрів на густину струму та властивості осаду [11, 12]. Також продемонстровано виготовлення стовпчиків з міді з використанням багатостадійного формування з репозиціонуванням на краю стовпчика з різною швидкістю руху мікрокапіляра [13]. Нещодавно було проведено дослідження щодо використання локального електроосадження в більших масштабах та впливу характеристик розчину та відносної швидкості руху електродів [14-15] на точність та якість отриманих елементів.

Постановка завдання. З огляду на дані [14] найбільш частий діаметр металізованих отворів друкованих плат становить 1 мм, а для прихованих мікропереходів 0,05...0,1 мм. У аналогічних межах може змінюватись висота відповідних еле-

ментів струмопровідного рисунку, що визначається товщиною діелектричної основи – склотекстоліту або препрегу.

Таким чином метою даної роботи є визначення можливості швидкісного та прецензійного отримання тривимірних мідних об'єктів локальним електрохімічним осаженням із основними параметрами в межах 100...1000 мкм.

Виклад основного матеріалу. Методика досліджень. Для проведення дослідів з практичної реалізації локального електроосадження та впливу різних факторів на отримані вироби було зібрано експериментальну установку. В якості джерела постійного струму обрано потенціостат PGStat 500N, з використанням програмного забезпечення для керування, контролю та збереження даних. В якості аноду використано платинову пластинку розміщену всередині капіляра. Струм вимірювався за допомогою спеціального програмного забезпечення та звірявся з міліамперметром зі шкалою в 150 поділок та мінімальним діапазоном 0,75 мА. Капіляр виготовлено з мірної піпетки. За допомогою металографічного мікроскопу MIM-7 обладнаного камерою SIGETA USMOS08000KPB було визначено діаметр отвору капіляру, який склав 771 мкм. Також відповідним приладом оцінювали геометричні параметри отриманих об'єктів. При оцінюванні швидкості електрохімічного осаження міді, густину струму розраховували як співвідношення між накладеною силою струму та площею перерізу отвору діелектричного капіляру, у якому знаходився допоміжний електрод-анод.

Основною частиною установки слугував корпус з рухомою платформою, рух можливий за двома осями (X та Y), діапазон руху 10 мм. Для встановлення висоти капіляра використовували мікрогвинт (вісь Z) з вимірювальною шкалою, ціна поділки 0,5мм. На рухомій платформі встановлювали робочу ванну. На дні ванни розміщували мідну пластину-катод, струм до якої підводиться знизу. На рис. 1 зображено схему експериментальної установки для проведення дослідів з локального електроосадження.

Для дослідження було використано два електроліти міднення сульфатний [15, 16] та концентрований нітратний. Сульфатний електроліт містив: $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ – 220 г/л; H_2SO_4 – 32 мл/л; HCl – 0,2 мл/л; блискоутворюючі добавки (Рубін T200-A – 2 мл/л, Рубін T200 – G – 8 мл/л, Рубін T200-E – 2 мл/л). Нітратний концентрований електроліт містив: $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ – 500 г/л; HNO_3 – до рН1...2.

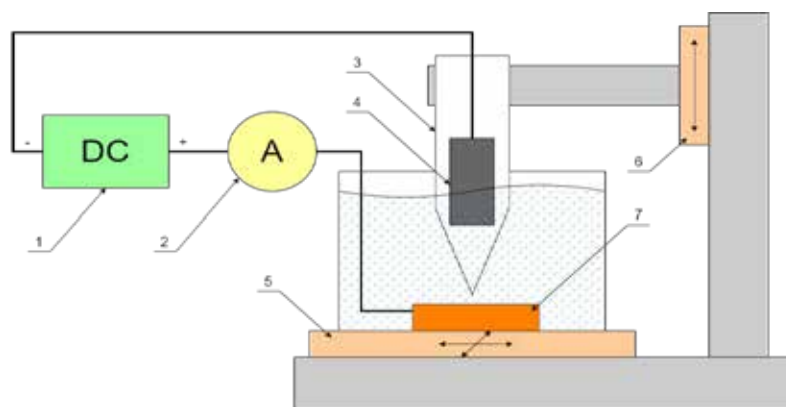


Рис. 1. Схема експериментальної установки: 1 – потенціостат; 2 – міліамперметр; 3 – скляний капіляр; 4 – анод з платинованого титану; 5 – рухома платформа; 6 – мікрогвинт; 7 – мідна пластина-катод

Перед проведенням практичної частини досліджень було здійснено математичне моделювання за допомогою програмного забезпечення COMSOL Multiphysics, за умов наближених до практичних. Для цього були використані модельні дані для сульфатного електроліту, що приведені у [15, 16]. Було проведено моделювання профілю росту осаду та вторинного розподілу струму в міжелектродному просторі за таких умов: діаметр капіляру – 1 мм; відстані від краю капіляра до поверхні катода – 20, 100 та 1000 мкм, яким відповідали модельні значення напруги 0,49 В, 0,57 В, та 1,5 В відповідно; нахил поляризаційної кривої становив 1100 мА/см²/В; провідність досліджуваного сульфатного електроліту міднення складала 0,231 См/см. Умовою зупинки розрахунків було досягнення осадом висоти в 100 мкм. Оцінювання модельної ширини області осадження металу здійснювали в межах висоти профілю осаду, що була більшою за 10 мкм. Графіки вторинного розподілу густини струму та профілі тривалого росту осаду міді наведено на рис. 2.

З рис. 2 видно, що при збільшенні відстані між капіляром та основою від 20 до 1000 мкм відбувається майже більш ніж п'ятиразове розширення області осадження. Хоча у роботах [17, 18] показана можливість досить високоточного локального електроосадження мідного об'єкта при використанні капіляра з діаметром отвору 4 мм та відстанню між краєм діелектричного капіляру та поверхнею основи катода 1000 мкм. Таким чином, для прецизійного електроосадження об'єктів (рис. 2 в) із діаметром 1000 мкм і менше необхідно, щоб зазор між поверхнею катода та краєм діелектричного корпусу капіляру був мінімальним або майже відсутнім.

При спробах локального електроосадження з піднятим над поверхнею катода основи капі-

ляром (відстань від краю капіляру до поверхні катода становила 1000 мкм) спостерігається значне розширення області осадження металу по поверхні катода основи, а локальне електроосадження відбувається дуже повільно і не призводить до утворення явно вираженої тривимірної структури (рис. 3). Це є характерним для обох досліджуваних електролітів, як сульфатного, так і концентрованого нітратного, а також збігається із результатом моделювання приведеного на рис. 2.

На наступному етапі досліджень було здійснено локальне електрохімічне осадження за умови, що діелектричний капіляр, у якому знаходився анод, торкався поверхні катода, тобто зазор був умовно відсутнім. З сульфатного електроліту вдалося отримати об'єкти із компактною структурою та блискучою поверхнею за густини струму до 20 А/дм², при збільшенні густини струму до 30 А/дм² спостерігається утворення дендритів. Зображення отриманих з сульфатного електроліту об'єктів із розрахунковою висотою 200 мкм та 400 мкм наведено на рис. 4.

З нітратного електроліту отримано об'єкти з компактною, але більш грубокристалічною, ніж в сульфатному електроліті структурою (рис. 5). Це пояснюється відсутністю блискоутворюючих добавок у нітратному електроліті. Найбільш дрібнокристалічні осади було отримано за густини струму до 30 А/дм². Проте, навіть при збільшенні густини струму до 60 А/дм² осад є монолітним і щільним не дивлячись на формування сферолітів.

З метою більш детального вивчення особливостей процесу локального електроосадження, для отриманих мідних об'єктів було визначено ряд основних параметрів: максимальну висоту, швидкість електроосадження, ефективність електроосадження як співвідношення між реальною

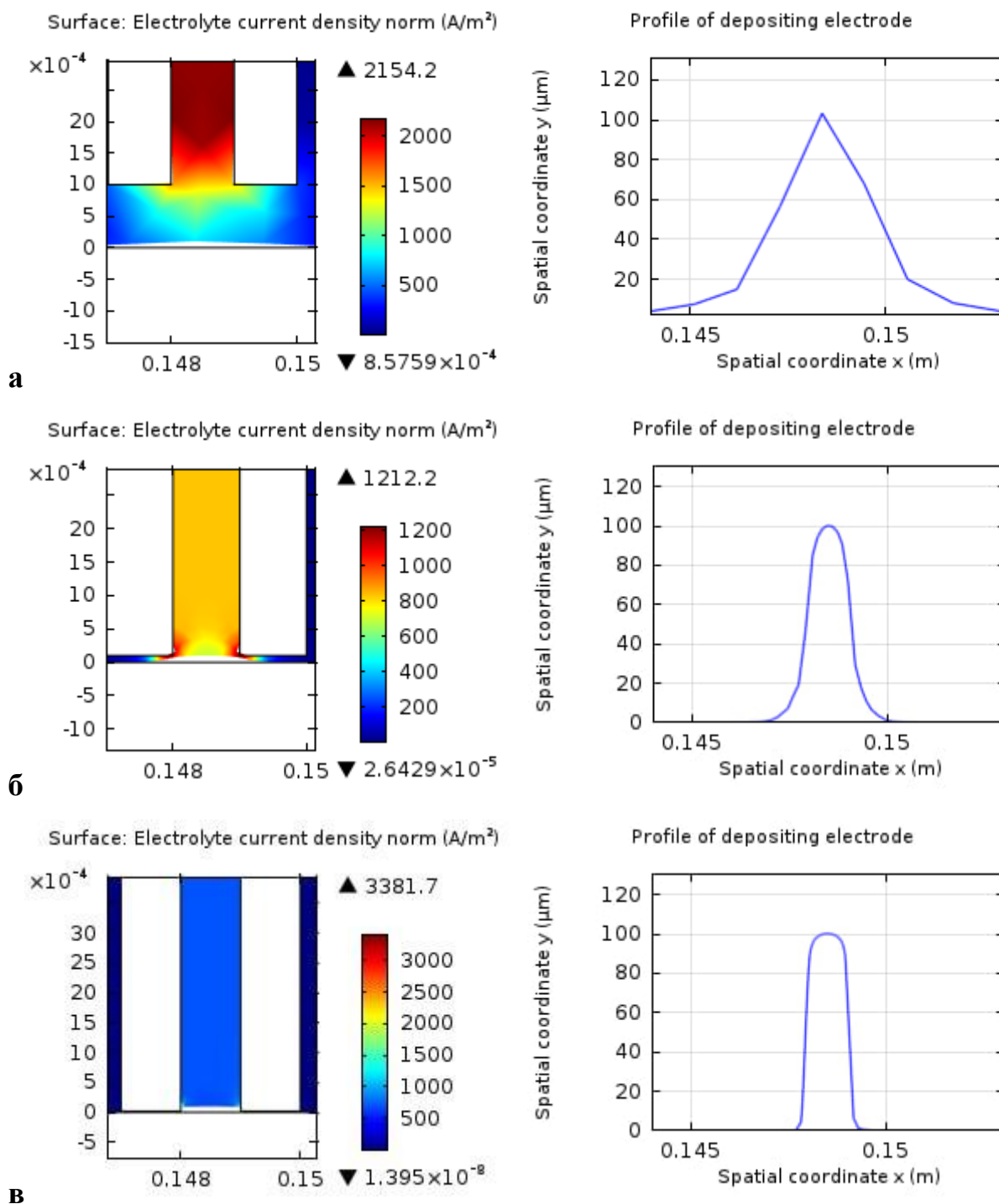


Рис. 2. Графіки вторинного розподілення густини струму та профілів росту осаду міді, при різних значеннях відстані між капіляром та основою (а – 1000 мкм, б – 100 мкм, в – 20 мкм)

та теоретичною розрахунковою висотою об'єктів у відсотках. Відповідні параметри приведені у таблиці 1.

З огляду на результати досліджень, приведених на рис. 4,5 та таблиці 1 можна підсумувати наступне. Форма отриманих об'єктів відрізняється від ідеальної циліндричної. Це може бути у першу чергу наслідком конструктивних

особливостей скляного капіляра, яким обмежували область осадження, як було встановлено кінчик капіляру мав заокруглення з радіусом до 100 мкм. Це спричиняло розширення робочої зони осадження та розповсюдження осадження металу у відповідній зоні міжелектродного простору, як наслідок відбувалось зниження максимальної висоти та ефективності осадження.



Рис. 3. Фотозображення мідних осадів локально електроосаджених в сульфатному електроліті за час 45 хв з піднятим капіляром діаметром 771 мкм, при густинах струму ($A/дм^2$): а – 10; б – 30

З іншого боку, зростання ефективності осадження із збільшенням використовуваної густини струму може вказувати на відповідне зниження розсіювальної здатності, що загалом є позитивним фактором через підвищення локалізації та прецизійності процесу локального електроосадження. Крім цього, утворення грубокристалічної структури осаду в нітратному електроліті також вносило деяку похибку при

визначенні сумарної висоти та ефективності електроосадження. Очікувано, в концентрованому нітратному електроліті швидкість та ефективність осадження є вищою, через більший вміст металу та меншу розсіювальну здатність електроліту. При цьому в нітратному електроліті профіль об'єктів більше наближається до ідеального прямокутного ніж для зразків отриманих в сульфатному електроліті.

Висновки. В ході проведених досліджень здійснено локальне електрохімічне осадження мідних об'єктів діаметром до 1000 мкм із використанням сульфатного та нітратного електролітів.

Встановлено, що використання нітратного електроліту дозволяє отримати компактні мідні об'єкти висотою близько 140 мкм за швидкості осадження, що на 30% перевищує відповідний параметр для сульфатного електроліту. Сульфатний електроліт, із наявним комплексом блискоутворюючих добавок, дозволяє отримувати об'єкти із гладкою блискучою поверхнею, у той же час в нітратному електроліті формується досить крупнокристалічна проте компактна і щільна структура осаду металу.

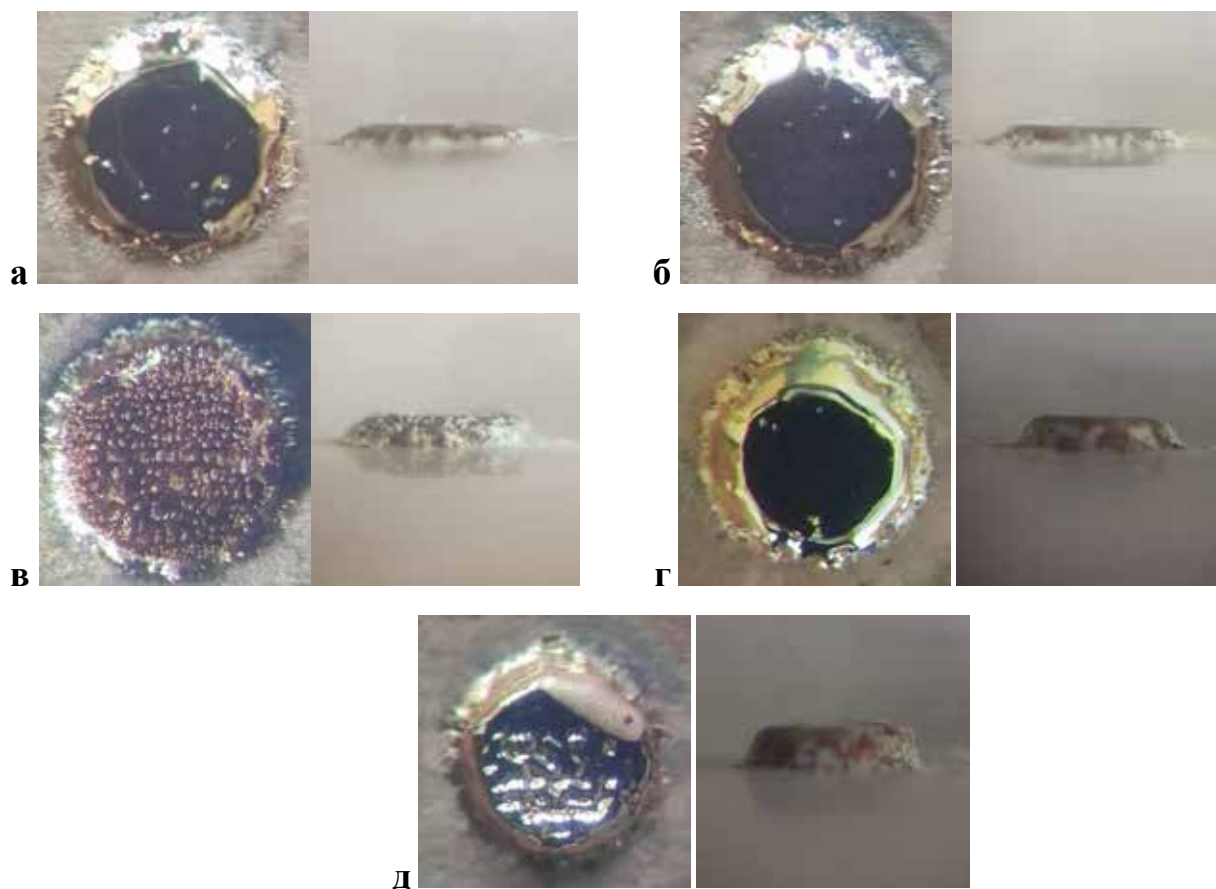


Рис. 4. Електрохімічно сформовані у сульфатному електроліті мідні об'єкти. Густина струму, $A/дм^2$: а, г – 15; б, д – 20; в – 30. Розрахункова висота, мкм: а, б, в – 200; г, д – 400

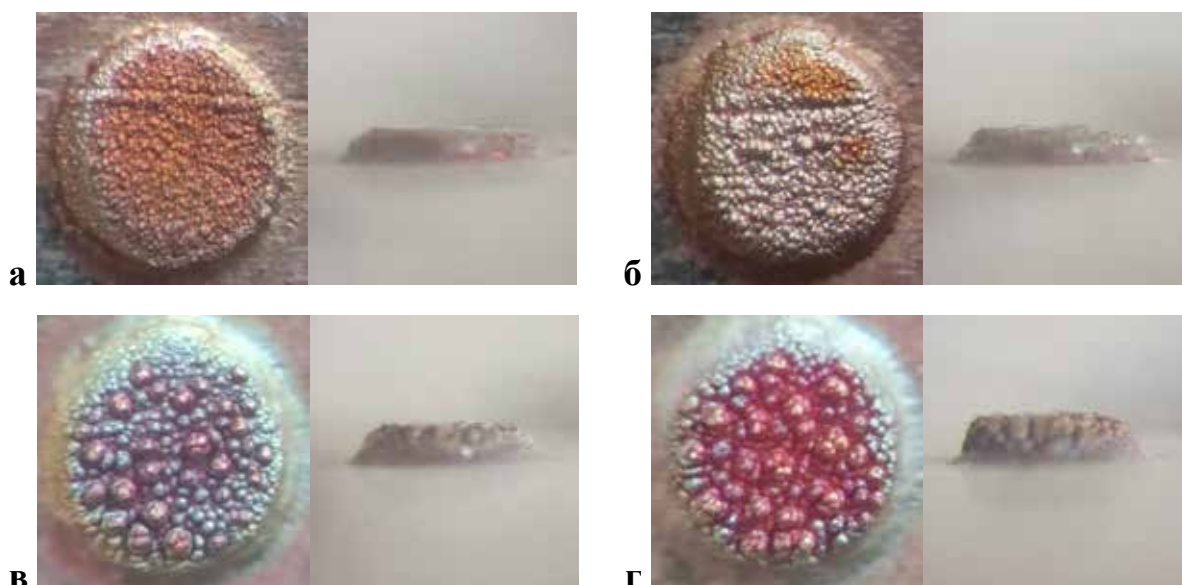


Рис. 5. Електрохімічно сформовані у сульфатному електроліті мідні об'єкти. Густина струму, А/дм²: а – 20; б – 30; в – 45; г – 60. Розрахункова висота – 200 мкм

Таблиця 1

Умови локального електроосадження мідних об'єктів

Розчин електроліту	Розрахункова густина струму, А/дм ²	Розрахункова висота об'єкта, мкм	Максимальна визначена висота об'єкта, мкм	Ефективність електроосадження, %	Швидкість електроосадження, мкм/год
Сульфатний	10	200	40	20	26,7
	15		95	47,5	95
	20		95	47,5	126,7
	30		140	70	276
	15	400	175	44	86,5
	20		230	57,5	153,3
Нітратний	10	200	120	60	80
	15		130	65	131
	20		145	72,5	192
	30		150	75	304
	45		180	90	534
	60		200	100	820

Список літератури:

1. Lee H. F., Chan C. Y., Tang C. S. Embedding capacitors and resistors into printed circuit boards using a sequential lamination technique. *Journal of Materials Processing Technology*. 2008. Vol. 207. № 1-3. P. 72–88. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.12.051>
2. Jones D. L. PCB design tutorial. 2004, P 3-25. URL: https://d1.amobbs.com/bbs_upload782111/files_12/ourdev_422724.pdf
3. Reid J. Copper electrodeposition: principles and recent progress. *Japanese journal of applied physics*. 2001. Vol. 40. № 4S. DOI: <https://doi.org/10.1143/JJAP.40.2650>
4. Kou S. C., Hung A. Plating of small blind vias [multilayer PCBs]. *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*. 1999. Vol. 22. № 3. P. 202–208. DOI: <https://doi.org/10.1109/6104.795855>
5. Яцюк Л. А., Косогін О. В., Ушаповський Д. Ю., Лінючева О. В., Фатєєв Ю. Ф. Технологія нанесення неметалевих покриттів та виробництво плат друкованого монтажу, 2018. 330 с.
6. Sundaram M. M., Kamaraj A. B., Kumar V. S. Mask-less electrochemical additive manufacturing: a feasibility study. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2015. Vol. 137. № 2. P. 021006. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4029022>

7. El-Giar E. M., Said R. A., Bridges G. E., Thomson D. J. Localized electrochemical deposition of copper microstructures. *Journal of the Electrochemical Society*. 2000. Vol. 147. № 2. P. 586. DOI: <https://doi.org/10.1149/1.1393237>
8. Hu J. Interfacial physics in meniscus-confined electrodeposition and its applications for fabricating electronic structures: Doctoral dissertation; University of Illinois at Urbana-Champaign. 2011. P. 117.
9. McKelvey K., O'Connell M. A., Unwin P. R. Meniscus confined fabrication of multidimensional conducting polymer nanostructures with scanning electrochemical cell microscopy (SECCM). *Chemical Communications*. 2013. Vol. 49. № 29. P. 2986–2988. DOI: <https://doi.org/10.1039/C3CC00104K>
10. Hirt L., Ihle S., Pan Z., Dorwling-Carter L., Reiser A., Wheeler J. M., Zambelli T. Template-Free 3D Microprinting of Metals Using a Force-Controlled Nanopipette for Layer-by-Layer Electrodeposition. *Advanced materials* (Deerfield Beach, Fla.). 2016. Vol. 28. № 12. P. 2311–2315. DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.201504967>
11. Kamaraj A. B., Sundaram M. A study on the effect of inter-electrode gap and pulse voltage on current density in electrochemical additive manufacturing. *Journal of Applied Electrochemistry*. 2018. Vol. 48. № 4. P. 463–469. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10800-018-1177-3>
12. Behroozfar A., Daryadel S., Morsali S. R., Moreno S., Baniasadi M., Bernal R. A., Minary-Jolandan M. Microscale 3D printing of nanotwinned copper. *Advanced materials*. 2018. Vol. 30. № 4. P. 1705107. DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.201705107>
13. Nakazawa K., Yoshioka M., Mizutani Y., Ushiki T., Iwata F. Local electroplating deposition for free-standing micropillars using a bias-modulated scanning ion conductance microscope. *Microsystem Technologies*. 2020. Vol. 26. № 4. P. 1333–1342. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00542-019-04665-z>
14. Standard Size of PCB Vias. 2024. URL: <https://www.pcbx.com/article/Standard-Size-of-PCB-Vias>
15. Vasyliiev G., Vorobyova V., Uschapovskiy D., Kotyk M., Linyucheva O. Influence of polarization curve slope on the accuracy of local copper electrodeposition from sulphate electrolyte. *Journal of Electrochemical Science and Engineering*. 2023. Vol. 13. № 6. P. 971–980. DOI: <https://doi.org/10.5599/jese.1899>
16. Babchuk R., Uschapovskiy D., Vorobyova V., Linyucheva O., Kotyk M., Vasyliiev G. Additive concentration and nozzle moving speed influence on local copper deposition for electrochemical 3D-printing. *Journal of Electrochemical Science and Engineering*. 2024. Vol. 14. № 2. P. 265–273. DOI: <https://doi.org/10.5599/jese.2291>
17. Ushchapovskiy D., Vorobyova V., Plivak O., Motronyuk T., Vasyliiev G. Limitations of copper nitrate electrolyte for fast electrochemical 3d-printing. *Bulletin of Cherkasy State Technological University*. 2022. Vol. 27. № 4. P. 77–87. DOI: <https://doi.org/10.24025/2306-4412.4.2022.265832>
18. Vasyliiev G., Vorobyova V., Uschapovskiy D., Linyucheva O. Local electrochemical deposition of copper from sulfate solution. *Journal of Electrochemical Science and Engineering*. 2022. Vol. 12. № 3. P. 557–563. DOI: <https://doi.org/10.5599/jese.1352>

Dundukov P.O., Ushchapovskiy D.Yu. LOCAL ELECTROCHEMICAL DEPOSITION OF COPPER MICRO-SIZED ELEMENTS OF THE PRINTED BOARD PATTERNS

This article is devoted to the study of local electrochemical deposition of copper microobjects with a diameter of up to 1000 μm using sulfate and nitrate electrolytes. It has been established that during local electrodeposition, there is a significant scattering of the copper deposition zone over the cathode surface, as a result of which the local electrodeposition process is very inefficient, provided that the anode is placed in a dielectric capillary with a hole diameter of 771 μm , raised above the cathode surface to a height of 1 mm. This is consistent with multiphysics computer modeling data and indicates that to ensure precision electrodeposition of copper objects with a diameter of up to 1000 μm , it is necessary to minimize the gap between the cathode surface and the edge of the dielectric. It has been shown that the increase in deposition efficiency with increasing operating current density may be associated with a decrease in the electrolyte's throwing power, which is generally a positive factor, since it contributes to increasing the accuracy of local electrodeposition. It was found that in concentrated nitrate electrolyte the velocity and deposition efficiency are higher compared to sulfate, which is explained by the higher content of copper ions and lower electrolyte throwing power. At the same time, the geometric profile of the obtained copper objects in nitrate electrolyte is closer to perfectly rectangular. It was also found that compact deposits with a coarser crystalline structure are formed in nitrate electrolyte compared to sulfate electrolyte, which is due to the absence of the brightener additives. The nitrate electrolyte under study provides electrodeposition of compact copper objects with a height of 140 μm , at a current density of 20 A/dm^2 , with a deposition efficiency that is approximately one third higher than the similar indicator for the sulfate electrolyte.

Keywords: local electrochemical deposition, hidden microjunctions, copper plating electrolyte, deposition efficiency, metal structure.

Дата першого надходження статті до видання: 26.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026