

DOI: 10.20535/kpissn.2023.1-2.289350

УДК 621.357.6

М.М. Котик, Г.С. Васильєв*

КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

*Відповідальний автор: g.vasyliiev@kpi.ua

**АНАЛІЗ ВПЛИВУ УМОВ ЛОКАЛЬНОГО ЕЛЕКТРООСАДЖЕННЯ
НА ТОЧНІСТЬ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОГО 3D-ДРУКУ**

Проблематика. Адитивне виробництво металевих деталей методом локального електроосадження – новий перспективний напрям, що має ряд унікальних особливостей. Використання електролізу дозволяє виготовляти металеві вироби за кімнатної температури з високою точністю з малими енергетичними витратами. Точність та швидкість електрохімічного 3D-друку перебувають в оберненій залежності, а тому важливим є пошук оптимальних умов електроосадження з максимальною швидкістю без погіршення точності.

Мета дослідження. Метою цієї роботи було проаналізувати вплив параметрів електроосадження (міжелектродна відстань, електропровідність та поляризованість електроліту) на точність формування осаду в комп'ютерній моделі та провести експериментальну верифікацію оптимальних умов під час електроформування реального об'єкта із сульфатного електроліту міднення.

Методика реалізації. Для досягнення цілей дослідження було використано комп'ютерне моделювання процесу електрохімічного осадження в середовищі COMSOL Multiphysics та електрохімічні вимірювання характеристик сульфатних електролітів міднення.

Результати дослідження. Комп'ютерним моделюванням встановлено оптимальні умови: відстань між краєм капіляра та поверхнею, на якій відбувається осадження, не більше 0,5 мм, електроліт, в якому величина оберненого нахилу катодної поляризаційної кривої становить не нижче 2000 мА/(ВЧсм²) та електропровідність не вище 0,02 См/с. Досліджено вплив складу електроліту на обернену поляризованість катодного процесу та його електропровідність. Підібрано оптимальний склад електроліту, що містить 200 г/л CuSO₄, 60 г/л H₂SO₄, 0,2 г/л KCl та добавку RUBIN T-200. В обраному електроліті величина оберненого нахилу катодної поляризаційної кривої становить 2120 мА/(ВЧсм²). Проведено верифікацію процесу локального електроосадження в обраному електроліті під час електроформування циліндричного об'єкта діаметром 4 мм і заввишки 100 мкм. Визначено, що за межами капіляра робочого електрода осаджено не більше 5 %.

Висновки. Результати роботи можуть бути використані для створення системи електрохімічного 3D-друку. Подальші дослідження слід спрямувати на апробацію отриманих параметрів локального електроосадження в установці, яка моделює роботу 3D-принтера, та встановити точність і швидкість друку тривимірних об'єктів.

Ключові слова: адитивне виробництво, електропровідність, склад електроліту, поляризація, локальне електроосадження.

Вступ

Адитивна технологія виробництва з металу є однією з найбільш затребуваних [1], оскільки метали залишаються на перших позиціях найбільш використовуваних матеріалів у світі. Відомі методи адитивного виробництва з металу вимагають застосування високоенергетичних пристроїв для локального плавлення металу: селективного лазерного плавлення (SLM) та електронно-променевого плавлення (EBM) [2–5],

а точність адитивного виробництва обмежена розміром гранул металевих порошків (для лазерного або електронно-променевого спікання). На відміну від них, електрохімічне адитивне виробництво (ЕСАМ) дозволяє отримувати вироби за кімнатної температури з допомогою електроосадження металу з електроліту [6–7].

Електрохімічне осадження дозволяє використовувати найменші частинки матеріалу – іони. Інші методи використовують металевий порошок або дріт, які мають набагато більші від

Пропозиція для цитування цієї статті: М.М. Котик, Г.С. Васильєв, “Аналіз впливу умов локального електроосадження на точність електрохімічного 3D-друку”, *Наукові вісті КПІ*, № 1–4, с. 86–92, 2023. doi: 10.20535/kpissn.2023.1-2.289350

Offer a citation for this article: G.S. Vasyliiev, M.M. Kotyky “Analysis of the influence of local electrodeposition conditions on the accuracy of electrochemical 3D printing”, *KPI Science News*, no. 1–4, pp. 86–92, 2023. doi: 10.20535/kpissn.2023.1-2.289350

іона розміри. Основним напрямом досліджень є електрохімічне адитивне виробництво об'єктів мікронного та субмікронного розмірів. Застосування рідинного силового мікроскопа (FluidFM) дозволяє виготовляти стовпи, голки, спіралі, з'єднувачі та інші об'єкти розміром лише кілька мікрметрів [8–12]. Техніка надзвичайно точна, однак швидкість осадження повільна.

Швидшим підходом для більших об'єктів є осадження в меніску [13–18]. Тут осадження відбувається в невеликому об'ємі розчину електроліту між капіляром і основою. Анод розміщений всередині капіляра, а основа поляризована катодно. Цей метод дозволяє друкувати плоскі об'єкти. Зокрема, є можливість виробництва з різних металів, які наносяться шар за шаром. Швидкість осадження вища, ніж за методом FluidFM, оскільки об'єм електроліту більший, однак швидкість росту визначається швидкістю дифузії іонів металу в меніску.

Ще більшої швидкості осадження можна досягти, використовуючи електроосадження з великого об'єму електроліту [14–26]. Висока швидкість осадження вимагає високої концентрації іонів металу, що робить електроліт провідним, а електричне поле легко розподіляється навколо анода. Для локалізації області осадження на основу наносять маски [27] або мініатюризують розміри анода [28]. Об'єкти друкуються послідовним осадженням металу під анодом, доки нанесений шар не торкнеться анода. Після цього анод пересувається в інше положення або вгору, і процес повторюється. У цьому стані осадження також обмежене швидкістю дифузії іонів металу, але їх концентрація набагато вища, ніж під час осадження в меніску. Для досягнення більшої швидкості осадження замість постійного застосовують імпульсний струм.

Постановка задачі

Метою цієї роботи було проаналізувати вплив параметрів електроосадження (міжелектродна відстань, електропровідність та поляризованість електроліту) на точність формування осаду в комп'ютерній моделі та провести експериментальну верифікацію оптимальних умов під час електроформування реального об'єкта з сульфатного електроліту міднення.

Методика проведення досліджень

Комп'ютерне моделювання. Комп'ютерна модель побудована в середовищі COMSOL

Multiphysics в модулі “Long-term growth of copper deposits” [29]. Модель описують такими рівняннями.

Поширення електричного поля в електродах:

$$\nabla \mathbf{i} = 0, \mathbf{i} = \sigma \nabla V \quad (1)$$

Поширення електричного поля в об'ємі електроліту:

$$\nabla \mathbf{i} = 0, \mathbf{i} = \kappa \nabla \phi. \quad (2)$$

Для поверхні електродів використано спрощені лінійні залежності:

$$\mathbf{i} \mathbf{n} = b \eta, \quad (3)$$

$$\eta = V - \phi - E^0, \quad (4)$$

де \mathbf{i} – густина струму; σ та κ – електропровідність електрода та електроліту відповідно; V – напруга на комірку; η – перенапруга; b – константа рівняння Тафеля; \mathbf{n} – вектор нормалі, направлений від поверхні електрода; ϕ – потенціал в електроліті; E^0 – рівноважний електродний потенціал.

В моделі (рис. 1) було визначено, як впливає на осадження металу завтовшки 100 мкм безпосередньо під капіляром варіювання таких параметрів:

- 1) відстань між поверхнею основи та краєм капіляра в межах 0,1–5 мм;
- 2) електропровідність електроліту в межах 0,01–0,5 См/см;
- 3) нахил катодної поляризаційної кривої (оберненої поляризованості) в межах 100–5000 мА/(В · см²).

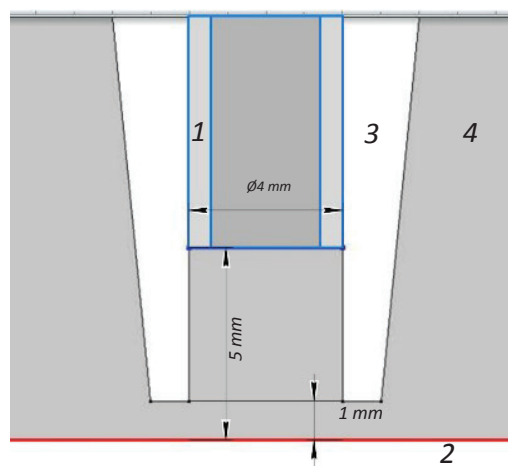


Рис. 1. Схема комірки електроосадження для комп'ютерної моделі: 1 – робочий електрод-анод; 2 – металева основа-катод; 3 – діелектричний капіляр; 4 – електроліт

Матеріали та реактиви. Експериментальну верифікацію результатів комп'ютерного моделювання проводили із використанням серії електродів міднення, склад яких наведено у табл. 1. Електроліти готували з реактивів марки ч.д.а.

Полярizaційні вимірювання. Полярizaційні залежності отримували в усіх досліджуваних електролітах із застосування традиційної триелектродної комірки. Робочий електрод – торцева частина мідного циліндра марки М1, запресованого в тефлон. Площа робочої поверхні – 0,2 см². Допоміжний електрод – платинова пластина 1×1 см, електрод порівняння – хлоридсрібний насичений. Полярizaцію проводили із застосуванням потенціостата Versastat-3-200 (Ametek).

Поверхню робочого електроду захищали, знежирювали та занурювали в електроліт. Електрод витримували в розчині електроліту до встановлення стаціонарного потенціалу, що не змінювався впродовж 5–10 с. Анодні та катодні полярizaційні залежності отримували в гальваностатичному (витримуючи постійну величину струму впродовж 5 хв. для визначення значення потенціалу) та потенціодинамічному (зі швидкістю розгортки потенціалу 0,5 мВ/с) режимах. З полярizaційних залежностей визначали кут нахилу в області ділянки Тафеля.

Електропровідність розчинів електролітів вимірювали між двома однаковими платиновими електродами 1×1 см кожний, які були розміщені на відстані 1 см один від одного. Константу комірки визначали за 0,2 М розчином КСl. Опір між електродами вимірювали в діапазоні частот 10¹–10⁴ Гц із застосуванням потенціостата Versastat-3-200 (Ametek).

Таблиця 1. Склади електролітів для випробувань

Номер електроліту	CuSO ₄ , г/л	H ₂ SO ₄ , г/л	КСl, г/л	Желатин, мг/л	RUBIN T-200
1	300				
2	200				
3	200	60			
4	200	60	0,2		
5	200	60	0,2	25–50	
6	200	60	0,2		2 мл/л А 8 мл/л G 2 мл/л E

Локальне електроосадження. Верифікацію оптимальних умов електроосадження проводили електроформуванням циліндричного об'єкта. Для цього була зібрана установка, схема якої відповідає комп'ютерній моделі (рис. 1). Елек-

троосадження проводили в стаціонарному та імпульсному режимах на поверхні мідної пластини впродовж 90 хв., розраховуючи на осаження 100 мкм. Густина струму в стаціонарному та імпульсному режимі становила 5 А/дм², параметри імпульсу: тривалість 0,01 с, пауза 1 с.

Для аналізу осаджених зразків застосовували метод 3D-профілометрії. Профіль поверхні аналізували з точністю 0,625 мкм у горизонтальній площині та 0,25 мкм у вертикальній.

Результати та їх обговорення

Залежність товщини металу на різній відстані від центру анода залежно від відстані між капіляром та основою, провідності та оберненої поляризованості показано на рис. 2. З результатів комп'ютерного моделювання видно, що вплив провідності, оберненої поляризованості та відстані між краєм капіляра та поверхнею, на якій відбувається осаження, на кількість металу, осаженого за межами капіляра, не лінійний. Щоб забезпечити переважне осаження металу в області, обмеженій діаметром капіляра (осаження металу за межами капіляра не перевищує 15%), слід забезпечити відстань між краєм капіляра та поверхнею, на якій відбувається осаження, не більше 0,5 мм, електроліт, в якому нахил катодної полярizaційної кривої становить не нижче 2000 мА/(В·см²) та електропровідність не вище 0,02 См/см.

Полярizaційні залежності, отримані в електролітах різного складу, подано на рис. 3, а визначені параметри наведено в табл. 2. З даних видно, що концентрація іонів міді, кислоти та хлориду калію має незначний вплив на нахил полярizaційної кривої (зміна в межах 700–800 мА/см²/В). Порівняно з цим додавання поверхнево активних речовин, желатину та добавки Рубін суттєво змінює нахил катодної кривої. Експериментальна перевірка можливостей впливу на величину оберненого нахилу катодної полярizaційної кривої складу електроліту показала, що найбільший нахил 2120 мА/см²/В можна отримати в розчині № 6, що містить добавку RUBIN T-200.

Аналіз даних впливу складу електроліту та електропровідність (табл. 2) узгоджується із загальними міркуваннями про те, що збільшення концентрації електроліту та кількості кислоти в ньому підвищує електропровідність розчину.

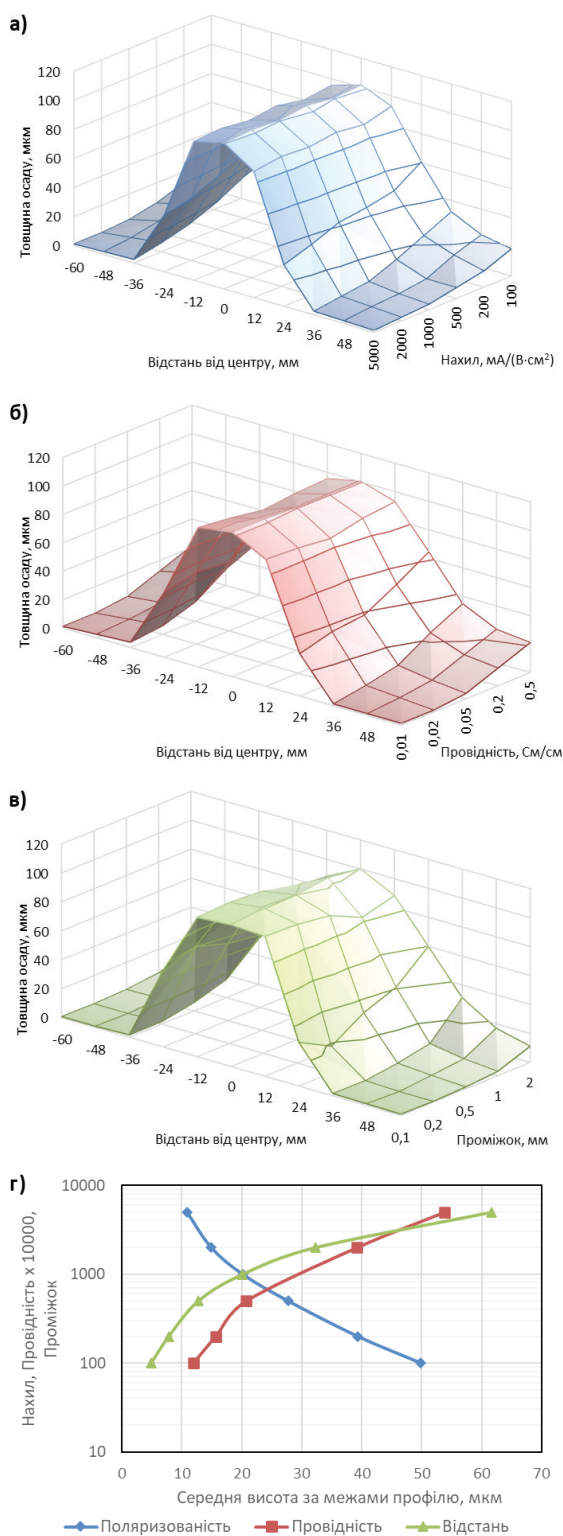


Рис. 2. Вплив параметрів електроосадження на розподіл товщини металу по поверхні: *a* – нахил поляризаційної кривої; *b* – електропровідність електроліту; *в* – відстані між краєм капіляра та поверхнею, на якій відбувається осадження; *г* – зведена залежність

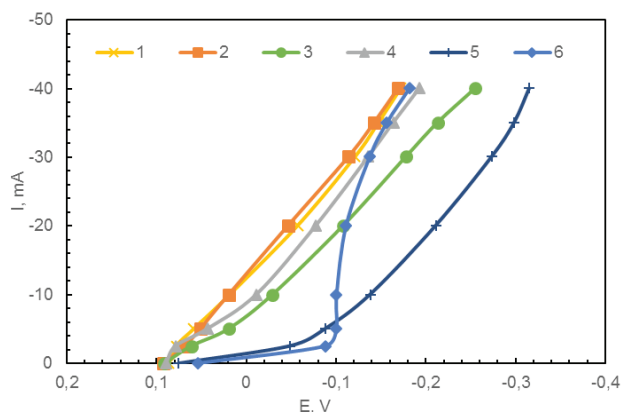


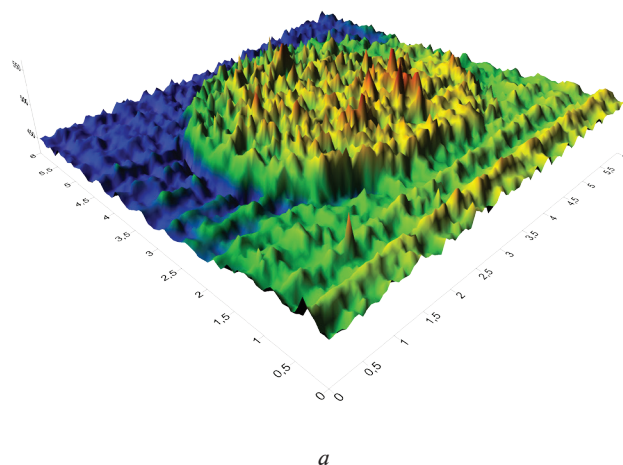
Рис. 3. Катодні стаціонарні поляризаційні криві процесу електроосадження міді з електролітів різного складу. Склад електролітів наведено в табл. 1

Таблиця 2. Склади електролітів для випробувань

Електроліт	Поляризованість катодного процесу di/dE , мА/см ² /В	Електропровідність, См/м
1	780	4,94
2	785	4,02
3	830	7,46
4	675	7,48
5	775	8,69
6	2120	5,68

Обраний склад електроліту верифікували для локального електроосадження об'єкта у формі циліндра. Об'єкт, осаджений за 1,5 години, проаналізували методом 3D-профілометрії (рис. 4).

З отриманих 3D-моделей електроосадженого металу було визначено усереднений профіль поверхні, який порівняли з очікуваним профілем (рис. 5).



a

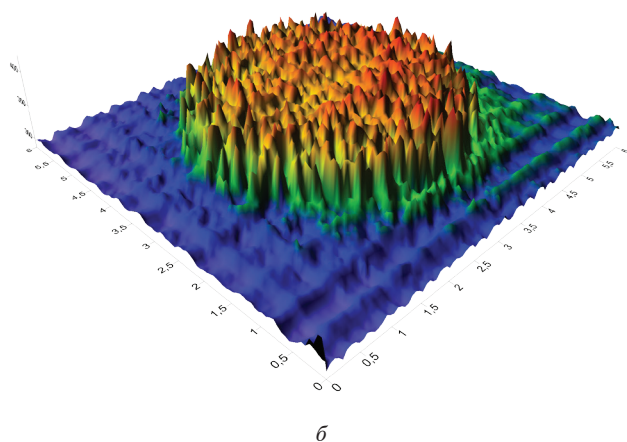


Рис. 4. 3D-профілометрія локально сформованих осадів завтовшки 100 мкм: а – постійний струм; б – імпульсний струм

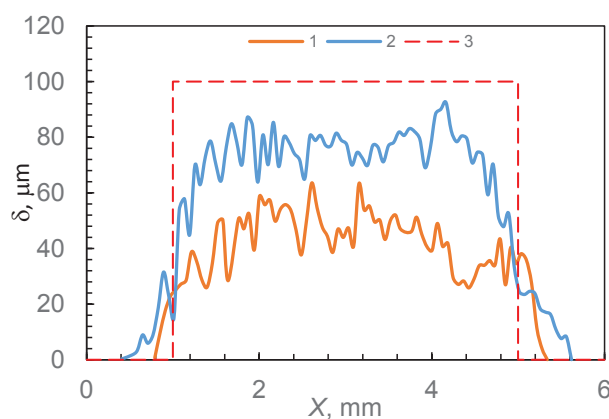


Рис. 5. Профілі локально сформованих осадів: 1 – постійний струм; 2 – імпульсний струм; 3 – очікуваний профіль

Порівняння кількості металу, осадженого в межах очікуваного профілю, із загальною кількістю осадженого металу показало, що за межами профілю осаджено 3,4 % в умовах електролізу постійним струмом та 5,0 % в умовах електролізу імпульсним струмом. Таким чином, застосування електроліту міднення № 6, склад

якого наведено в табл. 1, дозволяє забезпечити локальне осадження металічної міді в межах робочого капіляра не менше ніж на 95 %.

Висновки

1. Комп'ютерним моделюванням встановлено оптимальні умови: відстань між краєм капіляра та поверхнею, на якій відбувається осадження, не більше 0,5 мм, електроліт, в якому величина оберненого нахилу катодної поляризаційної кривої становить не нижче 2000 мА/(В · см²) та електропровідність не вище 0,02 См/с.

2. Досліджено вплив складу електроліту на обернену поляризованість катодного процесу та його електропровідність. Підібрано оптимальний склад електроліту, що містить 200 г/л CuSO₄, 60 г/л H₂SO₄, 0,2 г/л KCl та добавку RUBIN T-200. В обраному електроліті величина оберненого нахилу катодної поляризаційної кривої становить 2120 мА/(В · см²).

2. Проведено верифікацію процесу локального електроосадження в обраному електроліті під час електроформування циліндричного об'єкта діаметром 4 мм і заввишки 100 мкм. Визначено, що за межами капіляра робочого електрода осаджено не більше 5 %.

3. Результати роботи можуть бути використані для створення системи електрохімічного 3D-друку. Подальші дослідження слід спрямувати на апробацію отриманих параметрів локального електроосадження в установці, яка моделює роботу 3D-принтера, та встановити точність і швидкість друку тривимірних об'єктів.

Подяка

Робота виконана за підтримки МОН України в межах проєкту молодих вчених «Адитивна технологія електроосадження металів для 3D-друку нових матеріалів», 2022 року. Номер державної реєстрації 0122U001523.

Перелік посилань

- [1] I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies*, Springer, New York, USA, 2010, p. 472. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1120-9>
- [2] L.E. Murr, S.M. Gaytan, D.A. Ramirez, E. Martinez, J. Hernandez, K.N. Amato, P.W. Shindo, F.R. Medina, R.B. Wicker, "Metal fabrication by additive manufacturing using laser and electron beam melting technologies", *Journal of Materials Science & Technology*, vol. 1 no 1 pp. 42–54, 2012. [https://doi.org/10.1016/S2238-7854\(12\)70009-1](https://doi.org/10.1016/S2238-7854(12)70009-1)
- [3] W.E. Frazier, "Metal additive manufacturing: a review", *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 23 no 6 pp. 1917–1928, 2014. <https://doi.org/10.1007/s11665-014-0958-z>
- [4] D. Herzog, V. Seyda, E. Wycisk, C. Emmelmann, "Additive manufacturing of metals", *Acta Materialia*, vol. 117, pp. 371–392, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.07.019>

- [5] C. Kurner, "Additive manufacturing of metallic components by selective electron beam melting – a review", *International Materials Reviews*, vol. 61 no 5 pp. 361–377, 2016. <https://doi.org/10.1080/09506608.2016.1176289>
- [6] T.M. Braun, D.T. Schwartz, "The emerging role of electrodeposition in additive manufacturing", *The Electrochemical Society Interface*, vol. 25, pp. 69–73, 2016. <https://doi.org/10.1149/2.F07161if>
- [7] X. Li, P. Ming, S. Ao, W. Wang, "Review of additive electrochemical micro-manufacturing technology", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 173, pp. 1–31, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2021.103848>
- [8] G. Ercolano, T. Zambelli, C. van Nesselroy, D. Momotenko, J. Vуrus, T. Merle, W.W. Koelmans, "Multiscale additive manufacturing of metal microstructures", *Advanced Engineering Materials*, vol. 22 no 2, pp. 1–8, 2020. <https://doi.org/10.1002/adem.201900961>
- [9] L. Hirt, R.R. Gruber, T. Berthelot, R. Cornut, J. Vуrus, T. Zambelli, "Local surface modification via confined electrochemical deposition with FluidFM", *RSC Advances*, vol. 5 no 103, pp. 84517–84522, 2015. <https://doi.org/10.1039/c5ra07239e>
- [10] W. Ren, J. Xu, Z. Lian, P. Yu, H. Yu, "Modeling and experimental study of the localized electrochemical micro additive manufacturing technology based on the fluidFM", *Materials*, vol. 13 no 12, pp. 1–14, 2020. <https://doi.org/10.3390/ma13122783>
- [11] G. Ercolano, C. van Nesselroy, T. Merle, J. Vуrus, D. Momotenko, W.W. Koelmans, T. Zambelli, "Additive manufacturing of sub-micron to sub-mm metal structures with hollow AFM cantilevers", *Micromachines*, vol. 11 no 1, pp. 1–14, 2020. <https://doi.org/10.3390/mi11010006>
- [12] W. Ren, J. Xu, Z. Lian, X. Sun, Z. Xu, H. Yu, "Localized electrodeposition micro additive manufacturing of pure copper microstructures", *International Journal of Extreme Manufacturing*, vol. 4 no 1, pp. 1–11, 2021. <https://doi.org/10.1088/2631-7990/ac3963>
- [13] A. Ambrosi, R.D. Webster, M. Pumera, "Electrochemically driven multi-material 3D-printing". *Applied Materials Today*, vol. 18, pp. 1–9, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2019.100530>
- [14] S. Burlison, M. Minary-Jolandan, "Multiphysics simulation of microscale copper printing by confined electrodeposition using a nozzle array", *Journal of Applied Physics*, vol. 131 no 5, pp. 1–8, 2022. <https://doi.org/10.1063/5.0072183>
- [15] Y. Guo, P. Liu, P. Jiang, Y. Hua, K. Shi, H. Zheng, Y. Yang, "A flow-rate-controlled double-nozzles approach for electrochemical additive manufacturing", *Virtual and Physical Prototyping*, vol. 17 no 1, pp. 52–68, 2022. <https://doi.org/10.1080/17452759.2021.1989751>
- [16] X. Chen, X. Liu, P. Childs, N. Brandon, B. Wu, "A low cost desktop electrochemical metal 3D printer", *Advanced Materials Technologies*, vol. 2 no 10, pp. 2–7. <https://doi.org/10.1002/admt.201700148>
- [17] F. Zhang, D. Li, W. Rong, L. Yang, Y. Zhang, "Study of microscale meniscus confined electrodeposition based on COMSOL", *Micromachines*, vol. 12 no 12, pp. 2–10, 2021. <https://doi.org/10.3390/mi12121591>
- [18] X. Chen, X. Liu, M. Ouyang, J. Chen, O. Taiwo, Y. Xia, P. Childs, N.P. Brandon, B. Wu, "Multi-metal 4D printing with a desktop electrochemical 3D printer", *Scientific Reports*, vol. 9 no 1, pp. 1–9, 2019. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-40774-5>
- [19] A. Kamaraj, S. Lewis, M. Sundaram, "Numerical study of localized electrochemical deposition for micro electrochemical additive manufacturing", *Procedia CIRP*, vol. 42, pp. 788–792, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.320>
- [20] V.M. Volgin, V.V. Lyubimov, I.V. Gnidina, A.D. Davydov, T.B. Kabanova, "Simulation of localized electrodeposition of micro-wires and microtubes", *Procedia CIRP*, vol. 68, pp. 242–247, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.12.056>
- [21] E.M. El-Giar, R.A. Said, G.E. Bridges, D.J. Thomson, "Localized electrochemical deposition of copper microstructures", *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 147 no 2, pp. 586–591, 2000. <https://doi.org/10.1149/1.1393237>
- [22] C.Y. Lee, C.S. Lin, B.R. Lin, "Localized electrochemical deposition process improvement by using different anodes and deposition directions", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 18 no 10, pp. 1–8, 2008. <https://doi.org/10.1088/0960-1317/18/10/105008>
- [23] J. C. Lin, T. K. Chang, J. H. Yang, Y. S. Chen, C. L. Chuang, "Localized electrochemical deposition of micrometer copper columns by pulse plating", *Electrochimica Acta*, vol. 55 no 6, pp. 1888–1894, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2009.11.002>
- [24] M. M. Sundaram, A. B. Kamaraj, V. S. Kumar, "Mask-less electrochemical additive manufacturing: a feasibility study", *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 137 no 2, pp. 1–10, 2015. <https://doi.org/10.1115/1.4029022>
- [25] M. Sundaram, A. B. Kamaraj, G. Lillie, "Experimental study of localized electrochemical deposition of Ni-Cu alloy using a moving anode", *Procedia CIRP*, vol. 68, pp. 227–231, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.12.053>
- [26] G. Vasylyev, V. Vorobyova, D. Uschapovskiy, O. Linyucheva, "Local electrochemical deposition of copper from sulfate solution", *Journal of Electrochemical Science and Engineering*, vol. 12 no 3, pp. 557–563, 2022. <http://dx.doi.org/10.5599/jese.1352>
- [27] L.T. Romankiw, "A path: from electroplating through lithographic masks in electronics to LIGA in MEMS", *Electrochimica Acta*, vol. 42 no 20-22, pp. 2985–3005, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0013-4686\(97\)00146-1](https://doi.org/10.1016/S0013-4686(97)00146-1)
- [28] H. Hu, H.J. Kim, S. Somnath, "Tip-based nanofabrication for scalable manufacturing", *Micromachines*, vol. 8 no 3, pp. 90–120, 2017. <https://doi.org/10.3390/mi8030090>
- [29] Electrode Growth Next to an Insulator, [Online]. Available: <https://www.comsol.com/model/electrode-growth-next-to-an-insulator-10212>

G.S. Vasyliiev, M.M. Kotyk

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF LOCAL ELECTRODEPOSITION CONDITIONS ON THE ACCURACY OF ELECTROCHEMICAL 3D PRINTING

Background. Additive manufacturing of metal parts by local electrodeposition is a new promising area with several unique features. The use of electrolysis makes it possible to manufacture metal parts at room temperature with high accuracy and low energy consumption. The accuracy and speed of electrochemical 3D printing are inversely related, and therefore it is important to find optimal electrodeposition conditions at maximum speed without degrading accuracy.

Objective. The purpose of this work was to analyse the influence of electrodeposition parameters (electrode distance, electrical conductivity and electrolyte polarization) on the accuracy of metal deposit formation in a computer model and to conduct experimental verification of optimal conditions for electroforming a real object from copper sulphate electrolyte.

Methods. To achieve the goals of the study, computer simulation of the electrochemical deposition process in the COMSOL Multiphysics software and electrochemical measurements of the characteristics of copper sulphate electrolytes were used.

Results. Computer simulation established optimal conditions: the distance between the edge of the capillary and the surface on which deposition occurs is not more than 0.5 mm, the electrolyte in which the inverse slope of the cathode polarization curve is not lower than 2000 mA/(V×cm²) and the electrical conductivity is not higher than 0.02 S/cm. The influence of the electrolyte composition on the inverse polarization of the cathode process and its electrical conductivity was investigated. The optimal composition of the electrolyte was selected, containing 200 g/L CuSO₄, 60 g/L H₂SO₄, 0.2 g/L KCl and RUBIN T-200 additive. In the selected electrolyte, the value of the inverse slope of the cathode polarization curve is 2120 mA/(V×cm²). Verification of the process of local electrodeposition in the selected electrolyte during the electroformation of a cylindrical object with a diameter of 4 mm and a height of 100 μm was carried out. It was determined that no more than 5 % of metal was deposited outside the capillary of the working electrode.

Conclusions. The results of the work can be used to create an electrochemical 3D printing system. Further research should be aimed at approbation of the obtained parameters of local electrodeposition in an installation that simulates the operation of a 3D printer and establish the accuracy and speed of printing of a three-dimensional object.

Keywords: additive manufacturing, electrical conductivity, electrolyte composition, polarization, local electrodeposition.

Рекомендована Радою
хіміко-технологічного факультету
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції
19 жовтня 2023 року

Прийнята до публікації
11 грудня 2023 року