



НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”  
КАФЕДРА ТЕХНОЛОГІЇ ЕЛЕКТРОХІМІЧНИХ ВИРОБНИЦТВ

# АДИТИВНА ТЕХНОЛОГІЯ ЕЛЕКТРООСАДЖЕННЯ МЕТАЛІВ ДЛЯ 3D-ДРУКУ НОВИХ МАТЕРІАЛІВ

**Тема № 2514п**

**Номер державної реєстрації НДР:  
№ 0122U001523**

Керівник: д.т.н., доц. Васильєв Г.С.



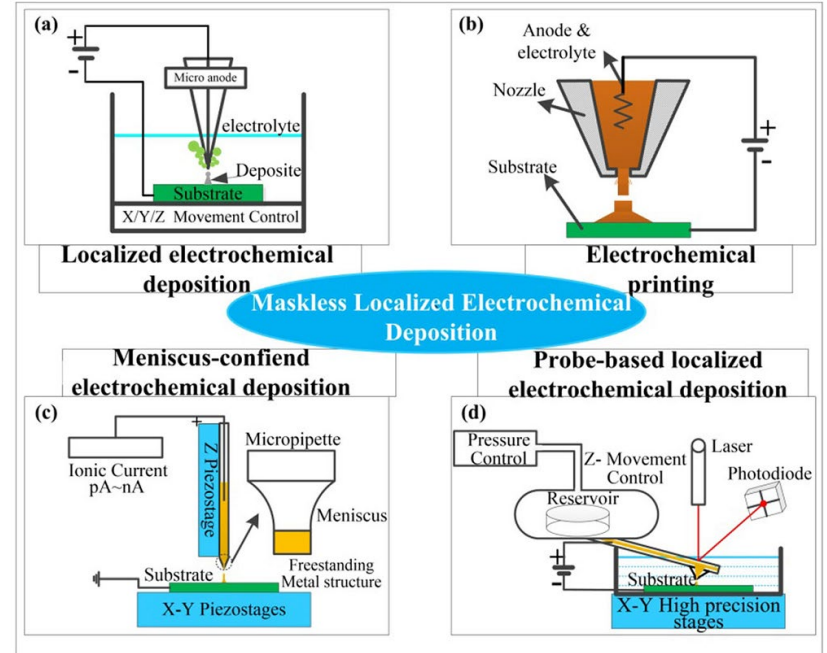
# АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ

Технології адитивного виробництва з металів



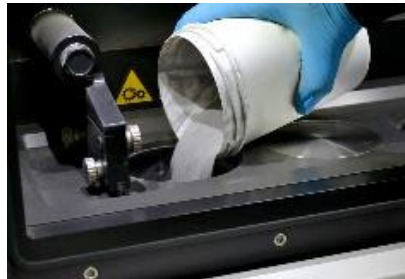
Альтернатива

Електрохімічний 3D-друку



Потрібний порошок металу

Потрібні високі енергії для спікання



The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2020) 110:1731–1757  
<https://doi.org/10.1007/s00170-020-05799-5>

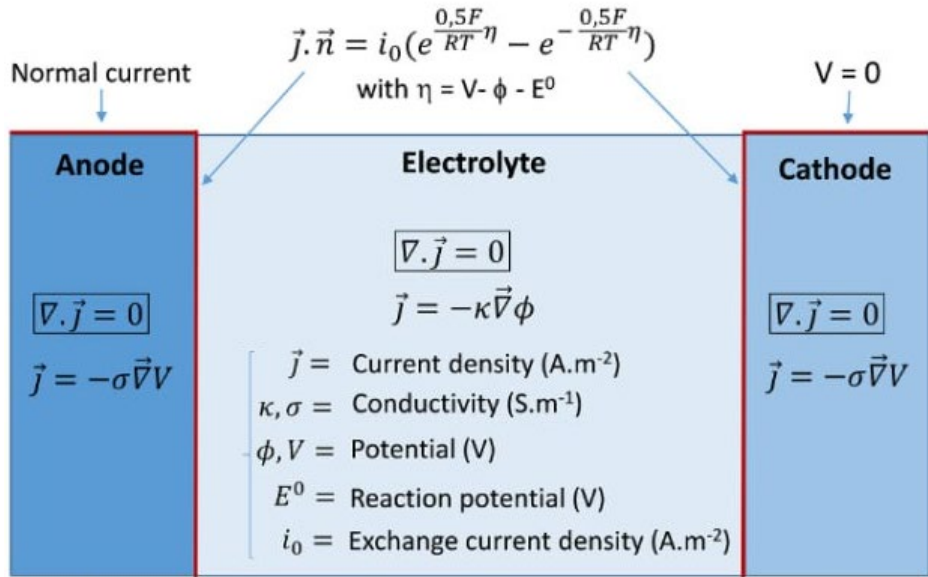


# ОСНОВНІ ЗАВДАННЯ РОБОТИ

1. Розробити модель та провести комп'ютерне моделювання процесу локального електроосадження.
2. Встановити оптимальні параметри електрохімічного локального осадження металу.
3. Підібрати склад електролітів для локального електроформування металевих деталей.
4. Розробити конструкцію лабораторної установки для тестування технології.
5. Дослідити вплив параметрів друку на структуру, склад і функціональні характеристики матеріалів.



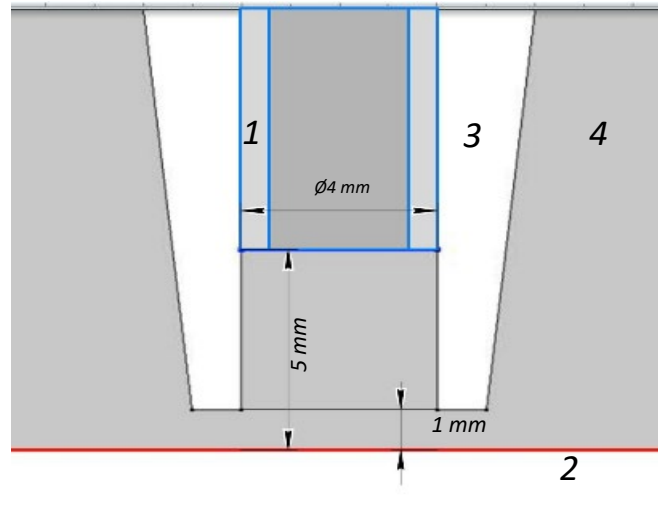
# МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ЛОКАЛЬНОГО ЕЛЕКТРООСАДЖЕННЯ



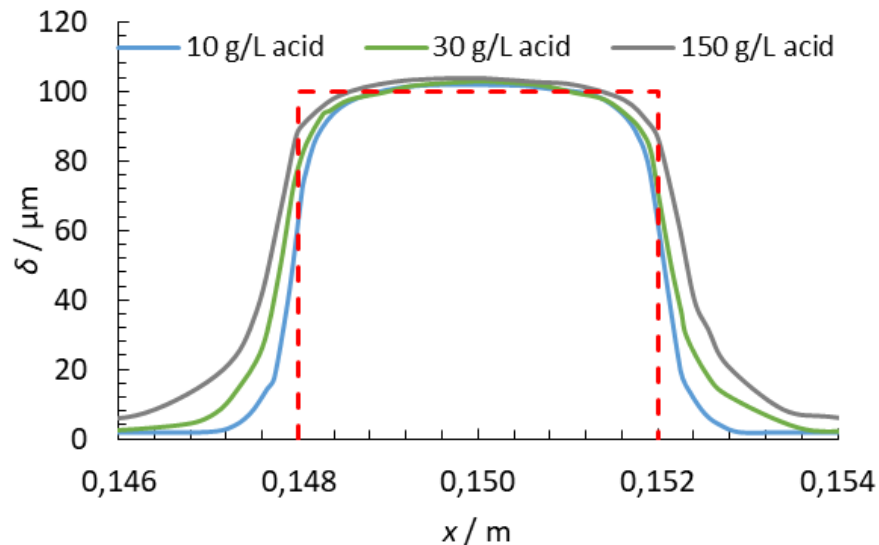
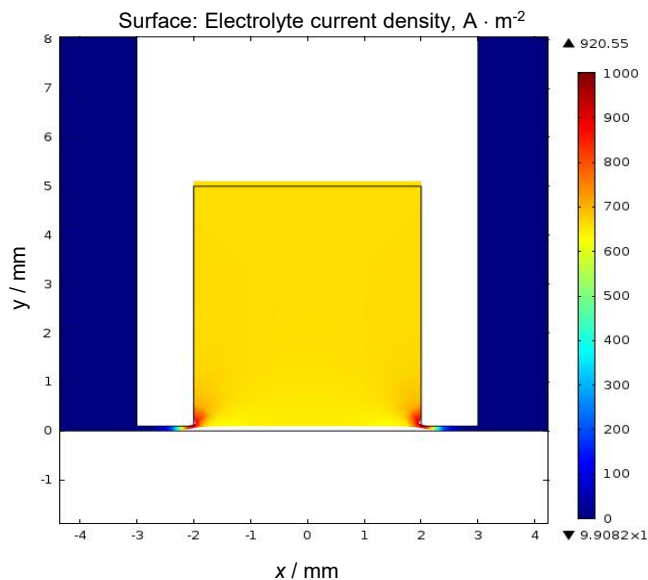
Основні рівняння та граничні умови моделі вторинного розподілу струму в електрохімічній комірці



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



# КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОЗПОДІЛУ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ В ЕЛЕКТРОЛІТІ



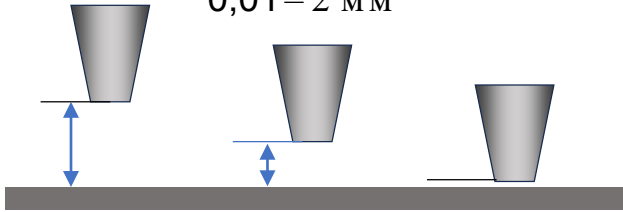
Комп'ютерна модель процесу локального електроосадження в середовищі Comsol та модельні профілі осаду в залежності від концентрації кислоти в розчині



# РЕЗУЛЬТАТИ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРООСАДЖЕННЯ НА ТОЧНІСТЬ

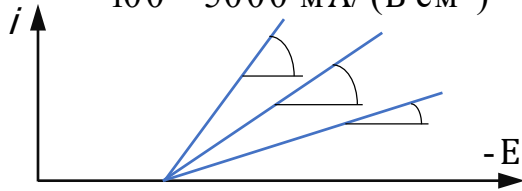
Проміжок між основою і капіляром

0,01 – 2 мм



Нахил катодної поляризаційної кривої

100 – 5000 мА / (В·см<sup>2</sup>)

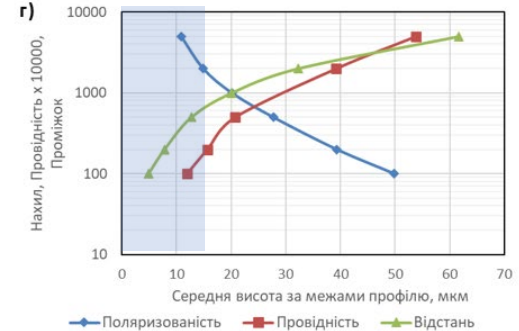
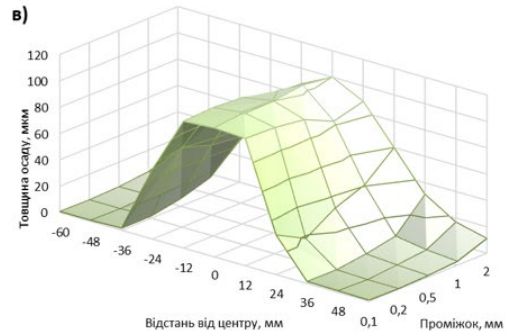
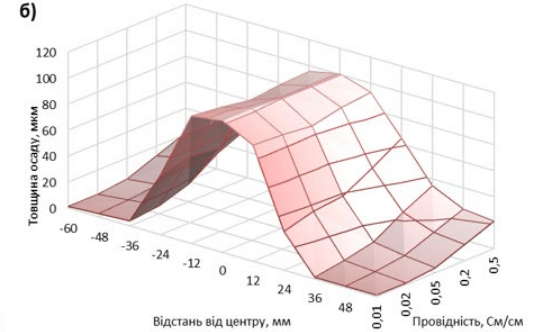
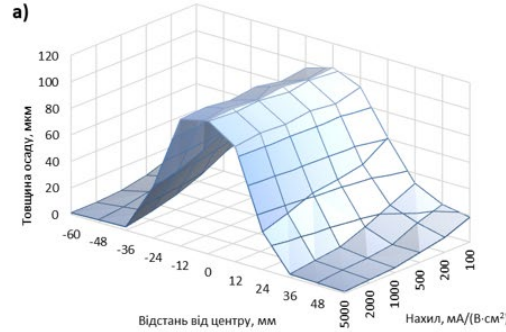


Електропровідність

0,01 – 0,5 См / см



а) нахил поляризаційної кривої; б) електропровідність електроліту; в) відстані між краєм капіляра та поверхнею, на якій відбувається осадження; г) зведена залежність.

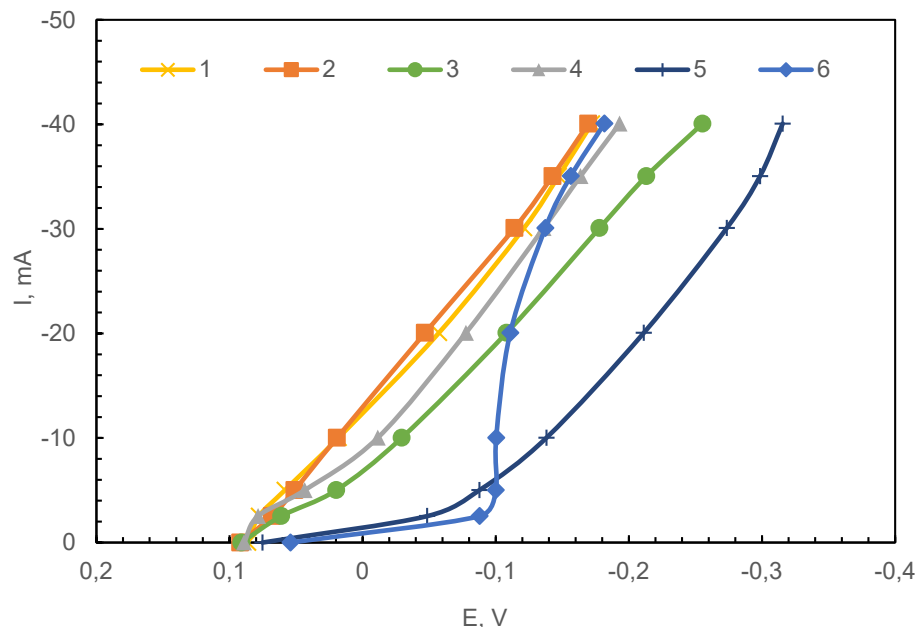


# ОБГРУНТУВАННЯ СКЛАДУ ЕЛЕКТРОЛІТУ ДЛЯ ЛОКАЛЬНОГО ЕЛЕКТРООСАДЖЕННЯ МІДІ

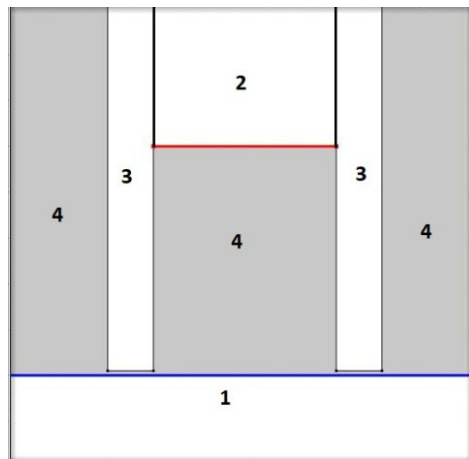
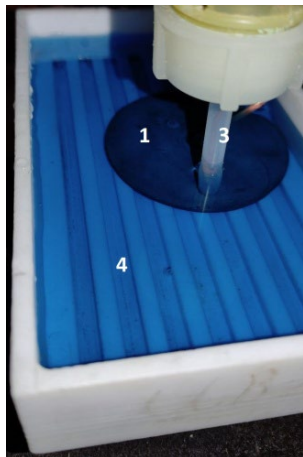
Експериментально  
визначені параметри  
досліджених електролітів

Електроліт	Поляризованість катодного процесу $di/dE$ , $\text{mA/cm}^2/\text{V}$	Електропровідність, $\text{Cm/m}$
1	780	4,94
2	785	4,02
3	830	7,46
4	675	7,48
5	775	8,69
6	2120	8,34

Катодні стаціонарні поляризаційні криві процесу електроосадження міді з електролітів різного складу.



# СТАЦІОНАРНА ЕЛЕКТРОХІМІЧНА КОМІРКА ДЛЯ ВІДПРАЦЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ 3D-ДРУКУ



**а)**  
 $i = 20 \text{ A/дм}^2$   
 $\delta = 100 \text{ мкм}$



**б)**  
 $i = 30 \text{ A/дм}^2$   
 $\delta = 100 \text{ мкм}$



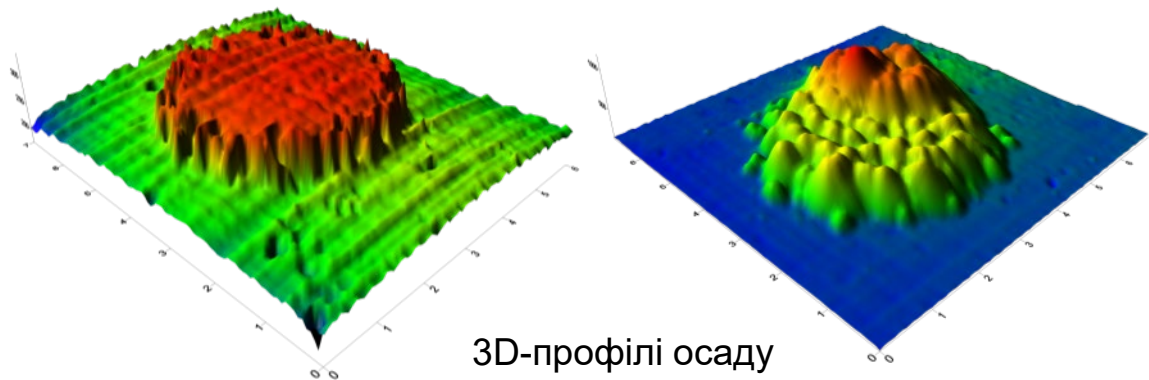
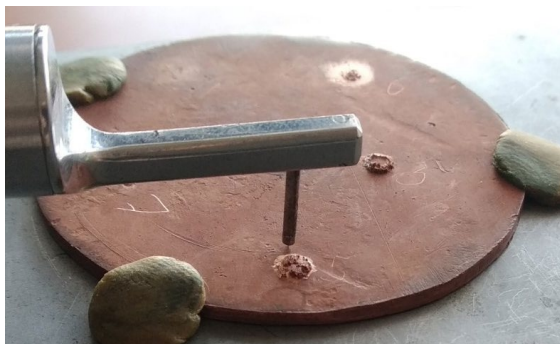
**в)**  
 $i = 30 \text{ A/дм}^2$   
 $\delta = 500 \text{ мкм}$

Зовнішній вигляд комірки для локального електроосадження, її схема та зразки осаду



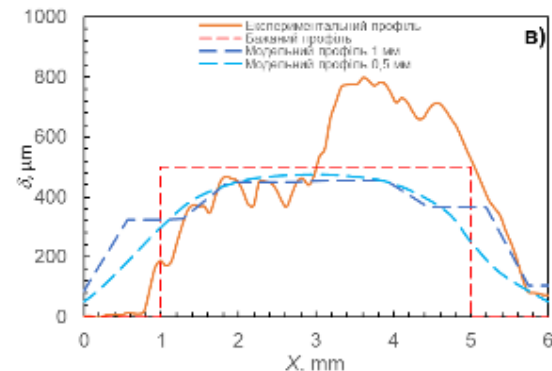
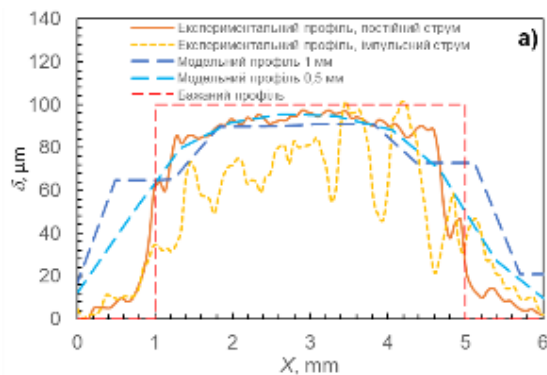
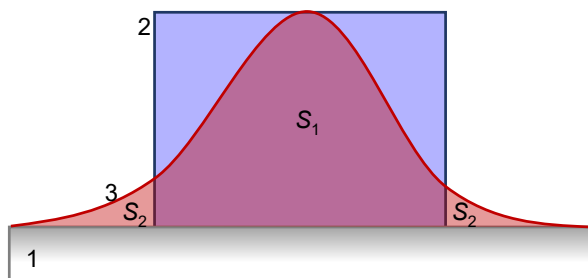


# АНАЛІЗ МОРФОЛОГІЇ ОСАДУ



3D-профілі осаду

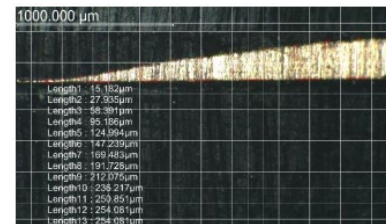
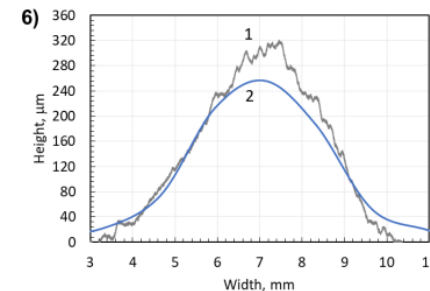
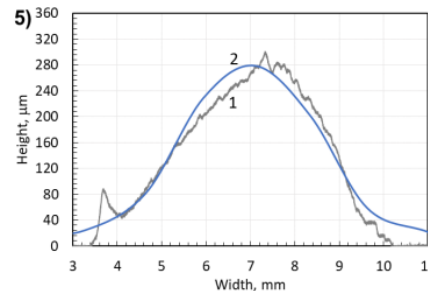
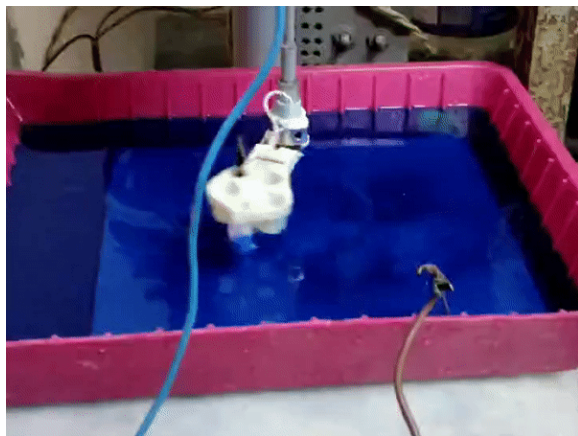
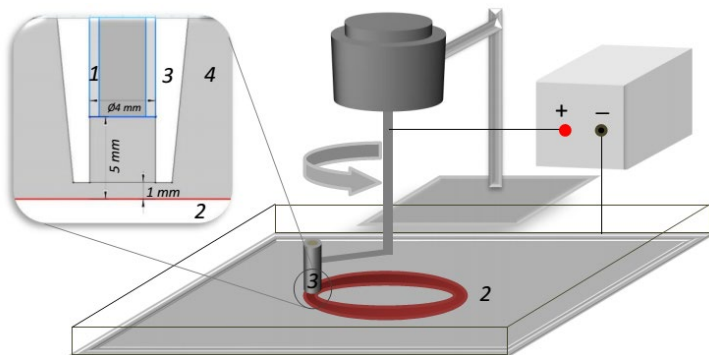
Точність електроосадження чисельно характеризували як частку осаду, яка осаджена поза межами бажаного профілю, знайдена як відношення  $b = S_2/S_1$ ;



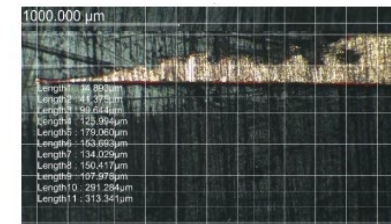
Порівняння модельного, експериментального та бажаного профілю



# ЛОКАЛЬНЕ ЕЛЕКТРОСАДЖЕННЯ В ДИНАМІЧНИХ УМОВАХ



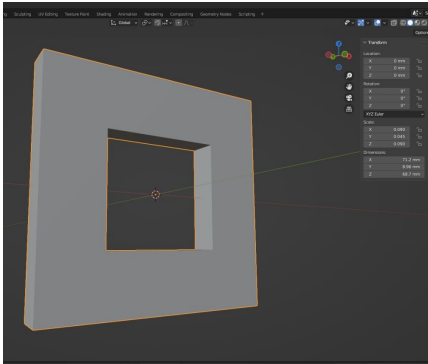
5



6



## Створення моделі на комп'ютері



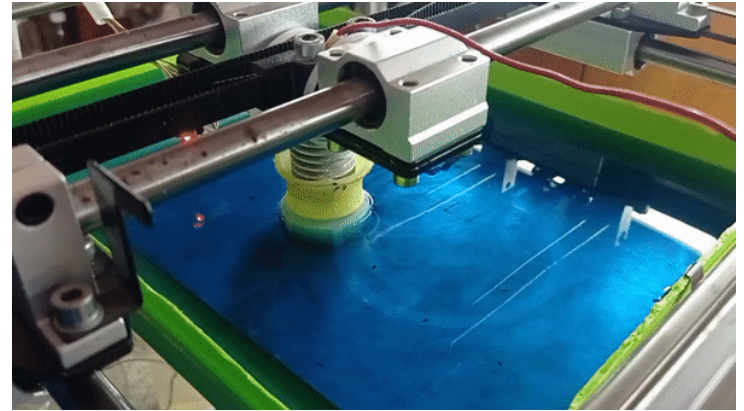
```
M106 S76.5
;MESH:v6.stl
G0 F3600 X94.125 Y94.228 Z0.3
;TYPE:WALL-OUTER
G1 F2400 E0
G1 F300 X94.124 Y99.599 E0.26796
G1 X93.996 Y110.29 E0.80137
G1 X93.995 Y115.773 E1.07492
G1 X116.005 Y115.773 E2.17301
G1 X116.005 Y94.227 E3.24794
G1 X94.125 Y94.228 E4.33954
G0 F3600 X94.125 Y94.428
G1 F2400 E0.33954
G0 F3600 X94.794 Y94.897
;TYPE:SKIN
G0 F3600 X99.341 Y98.697
G0 X94.823 Y99.607
G0 X94.504 Y94.608
```

# ЕЛЕКТРОХІМІЧНИЙ ЗД-ДРУК



Лабораторний ЗД-принтер

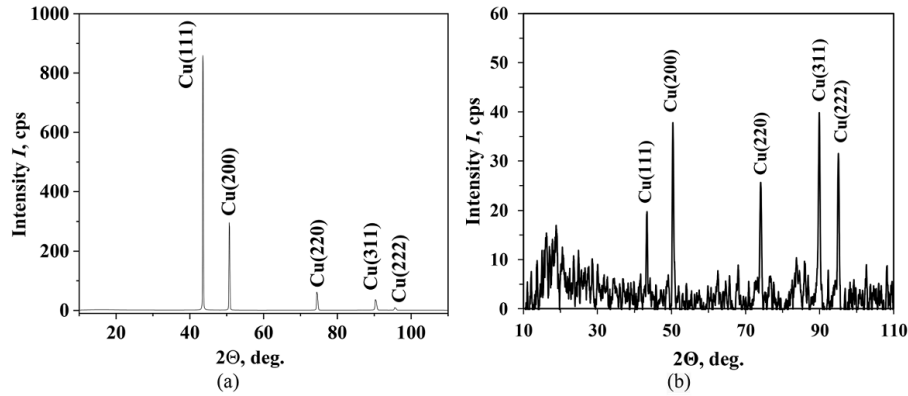
## Принцип електрохімічного ЗД-друку



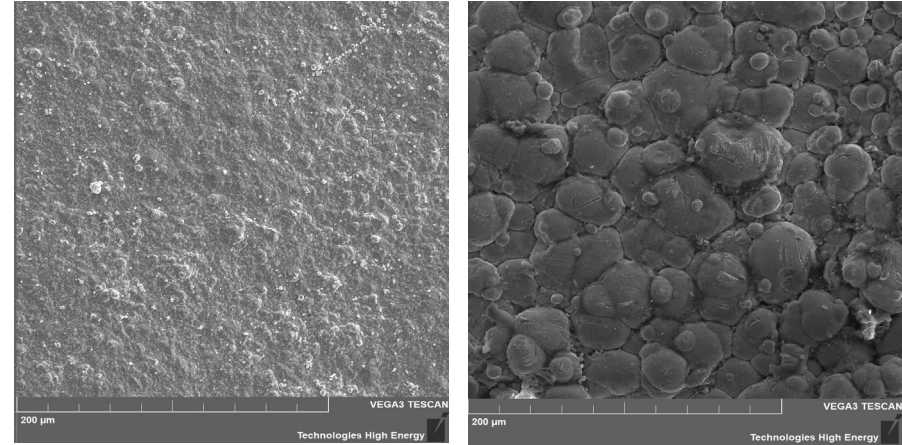
## Надруковані зразки



# ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ НАДРУКОВАНИХ МАТЕРІАЛІВ



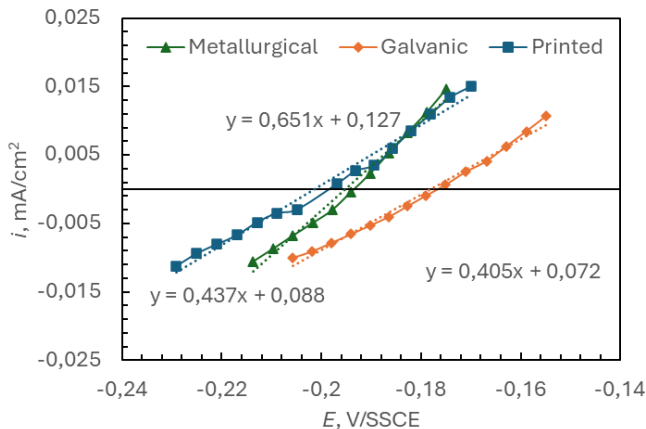
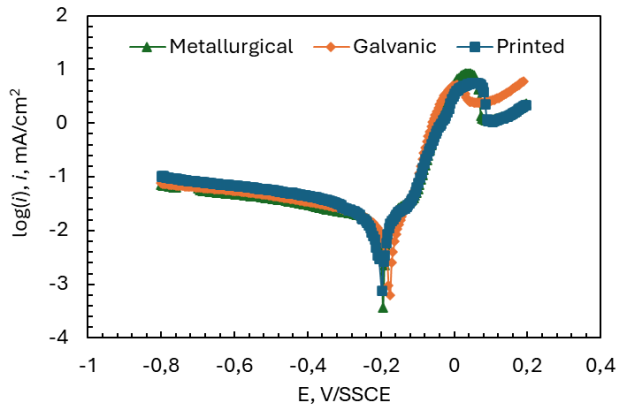
XRD спектри гальванічної (а) та електрохімічно 3Д-надрукованої (б) міді.



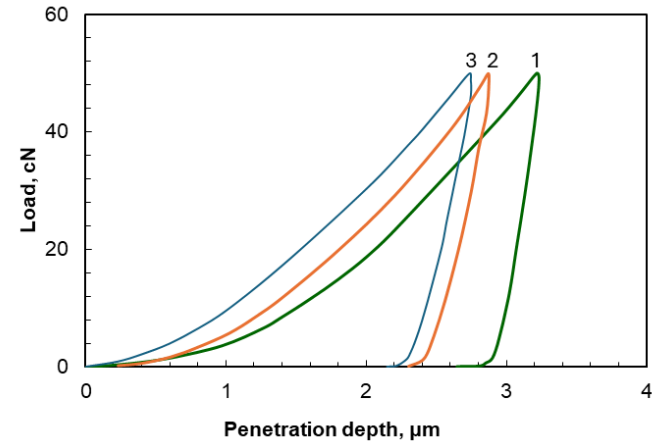
Морфологія поверхні міді: а) електроосадженої; б) 3D-надрукованої.



# ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ НАДРУКОВАНИХ МАТЕРІАЛІВ



Поляризаційні криві та ділянки поляризаційного опору, що показують подібну електрохімічну поведінку міді в 3,5 % NaCl



Усереднені діаграми проплавлення індентора Берковича: 1 – металургійна мідь; 2 – гальванічна мідь; 3 – 3D-друкована мідь.

Металургійна мідь			Гальванічна мідь			Мідь надрукована на 3D принтері		
HM, GPa	E, GPa	K <sub>elast</sub>	HM, GPa	E, GPa	K <sub>elast</sub>	HM, GPa	E, GPa	K <sub>elast</sub>
2.16	114.4	0.918	3.1	100.1	0.88	3.3	97.1	0.87



# ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ВИРОБНИЦТВА

Технологія виробництва	Переваги	Недоліки	Вартість 1 см <sup>3</sup>
 <p data-bbox="426 274 649 383"><b>Традиційне субтрактивне виробництво</b></p>	<ul data-bbox="716 274 1199 383" style="list-style-type: none"><li>• Опанованість технологій.</li><li>• Наявність широкого спектру обладнання.</li></ul>	<ul data-bbox="1253 235 1673 421" style="list-style-type: none"><li>• До 80% матеріалу викидається.</li><li>• Вартість зростає пропорційно складності деталі</li></ul>	<p data-bbox="1740 306 1875 345"><b>\$14.09</b></p>
 <p data-bbox="401 497 678 639"><b>Адитивне виробництво шляхом спікання металу</b></p>	<ul data-bbox="716 459 1190 683" style="list-style-type: none"><li>• Не потрібно різнотипного обладнання.</li><li>• Відсутність відходів металу.</li><li>• Вартість зменшується зі збільшенням складності деталі.</li></ul>	<ul data-bbox="1253 497 1624 639" style="list-style-type: none"><li>• Потреба у витратних матеріалах.</li><li>• Потреба у високих енергіях.</li></ul>	<p data-bbox="1740 552 1875 590"><b>\$10.02</b></p>
 <p data-bbox="417 770 658 880"><b>Електрохімічне адитивне виробництво</b></p>	<ul data-bbox="716 754 1170 896" style="list-style-type: none"><li>• Друк за кімнатної температури.</li><li>• Дешеві витратні матеріали.</li><li>• Малі енерговитрати.</li></ul>	<ul data-bbox="1253 792 1605 858" style="list-style-type: none"><li>• Відсутність готових продуктів.</li></ul>	<p data-bbox="1750 803 1866 841"><b>\$5.79</b></p>



# ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

1. Порівняльний аналіз результатів комп'ютерного моделювання процесу локального електроосадження міді в середовищі COMSOL MULTIPHYSICS та експериментального осадження з сульфатного електроліту міднення показав задовільне узгодження профілів надрукованих зразків. Кількість осаду, що осаджується поза межами робочого електрода, не перевищує 5-7%. Це дозволяє використовувати комп'ютерну модель процесу локального електроосадження в COMSOL MULTIPHYSICS для прогнозування результатів електрохімічного 3Д-друку.

2. Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено оптимальний склад сульфатного електроліту міднення та параметри електроосадження. Так, електроліт має містити 200 г/л  $\text{CuSO}_4$ , 60 г/л  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , 0,2 г/л KCl та добавку RUBIN T-200, величина оберненого нахилу катодної поляризаційної кривої становить  $2120 \text{ mA}/(\text{V} \times \text{cm}^2)$ , питома електропровідність 5,7 См/м. Геометричні параметри комірки для виконання 3Д-друку наступні: міжелектродна відстань – 4 мм, відстань між поверхнею основи і краєм капіляра – 0,2 мм, діаметр капіляра, в якому розміщено робочий електрод – 4 мм, швидкість руху робочого електрода – не нижче 2,5 с/шар. Дотримання цих умов дозволяє виконувати електрохімічний 3Д-друк деталей розмірами до 10 см та товщиною до 1 мм зі швидкостями до 15 мкм/год.

3. Надруковані методом електрохімічного 3Д-друку матеріали мають близькі фізико-хімічні властивості до матеріалів, отриманих традиційним металургійним методом. Так, XRD-аналіз надрукованих зразків показав основні характерні піки кристалічних ґраток міді. Дослідження морфології поверхні методом растрової електронної мікроскопії показав на порядок більші розміри кристалітів 3Д-друкованої міді, порівняно з гальванічною, через імпульсний характер режиму 3Д-друку. Виміряно механічні властивості електроосадженої міді: мікротвердість Мейєра становить 3,1-3,3 ГПа, модуль Юнга 100,1-97,1 ГПа і коефіцієнти пластичності 0,88-0,87. Механічні властивості електрохімічно осадженої та 3Д-надрукованої міді дуже близькі. Швидкість корозії 3Д-друкованої міді в 3,5 розчині NaCl становить  $7,4 \text{ mA}/\text{cm}^2$ , що нижче швидкості корозії металургійної міді ( $11,1 \text{ mA}/\text{cm}^2$ )

4. Висока точність електрохімічного 3Д-друку та відносно невисока швидкість друку в напрямку осі Z дозволяє рекомендувати його як метод друку металорезисту в технології виготовлення плат друкованого монтажу. Подальші дослідження в сфері електрохімічного 3Д-друку слід спрямувати на розробку такої технології.



# КІЛЬКІСНІ ПОКАЗНИКИ ВИКОНАННЯ НАУКОВОЇ РОБОТИ

№ з/п	Показники/індикатори	Заплановано, кількість	Виконано, кількість
1.	<b>Публікація результатів:</b>		
1.1.	Статті у журналах, що індексуються наукометричними базами даних: - Scopus та/або Web of Science Core Collection, всього, од.	4	7
	з них із квартилем Q1 і Q2 на момент опублікування, од.		2
	з них із квартилем Q3 і Q4 на момент опублікування, од.		5
	з них з відкритим доступом, од.		5
1.5.	Статті у наукових фахових виданнях України категорії «Б», од.	11	9
1.6.	Статті у періодичних виданнях інших країн, що мають ISSN, од.		2
1.7.	Публікації у матеріалах конференцій, тезах доповідей та виданнях, що не включені до переліку наукових фахових видань України та не індексуються наукометричними базами даних Scopus або Web of Science Core Collection, од.		9
1.8.	Монографії та розділи монографій, опубліковані (або підготовлені і подані до друку) у закордонних виданнях мовами країн ОЕСР та/або СС, од.	6 д.а.	10,5 д.а.
1.9.	Монографії та розділи монографій, опубліковані (або підготовлені і подані до друку) в українських виданнях, од.		2
2.	<b>Презентація та поширення результатів:</b>		
2.1.	Міжнародні науково-комунікативні заходи, конференції, од.		5
2.2.	Всеукраїнські та регіональні науково-технічні/промислові виставкові заходи, од.		2
2.3.	Представлення розробки/бізнес-плану/результатів роботи на: - інноваційних фестивалях, од.		2
3.	<b>Підготовка наукових кадрів:</b>		
3.1.	Захищено дисертацій доктора наук авторами роботи або під консультуванням авторів у рамках тематики роботи, од.		1
3.2.	Захищено дисертацій доктора філософії авторами роботи або під керівництвом авторів у рамках тематики роботи, од.		1
4.	<b>Охоронні документи на об'єкти права інтелектуальної власності (ОПІВ)</b>	2	2
4.3.	Отримано патентів України на корисну модель, од.		1
4.6.	Подано заявок на отримання охоронного документу на ОПІВ України та/або інших країн, од.		1
5.	<b>Впровадження та використання наукових або науково-технічних (прикладних) результатів:</b>		
5.1.1	Господарських договорів/контрактів, од./тис.грн	2	2
5.4.	Подано заявок на державні, міжнародні наукові гранти (окрім індивідуальних), од.		1
6.	<b>Створено чи істотно удосконалено/покращено існуючі:</b>		
6.1.	Пристрої (макет, експериментальний/дослідний зразок), од.		3
7.	<b>Участь з оплатою у виконанні роботи (штатних одиниць/осіб) згідно з додатком до форми, всього, у т.ч.:</b>		10
7.2	Аспірантів (здобувачів вищої освіти III рівня), шт.од./ осіб		3
7.3.	Молодих вчених, шт.од./ осіб		9







Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»



National Technical University of Ukraine  
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"