

# ОСОБЛИВОСТІ СТРУКТУРИ І ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МІДІ, ОТРИМАНОЇ СПОСОБОМ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОГО ВИПАРОВУВАННЯ-КОНДЕНСАЦІЇ У ВАКУУМІ

В.Г. Гречанюк<sup>1</sup>, М.І. Гречанюк<sup>2</sup>, О.В. Хоменко<sup>2</sup>, І.М. Гречанюк<sup>1</sup>, В.І. Гоц<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Київський національний університет будівництва і архітектури МОНУ,  
03037, м. Київ, Повітрофлотський просп., 31. E-mail: [eltechnic777@ukr.net](mailto:eltechnic777@ukr.net)

<sup>2</sup>Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАНУ,  
03680, м. Київ, вул. Омеляна Пріцака, 3.

Досліджено структуру і фізико-хімічні властивості міді, отриманої способом електронно-променевого випаровування-конденсації у вакуумі. Для осадження металу використовували підкладку із сталі марки Ст3 нагріту до  $700 \pm 15$  °С. В експериментах використовували ванну-посередник із сплаву Cu–Zr–Y. Оцінка властивостей конденсованої міді у порівнянні з литою показала незначну різницю в значеннях питомого електроопору та деяке підвищення рівня механічних характеристик, що, ймовірно, пов'язано із відмінностями її внутрішньозеренної блочної структури. Виявлено збільшення у 1,5 рази твердості конденсату у разі використання ванни-посередника, що пов'язано із мікролегуванням Zr і Y. Гравіметричні дослідження корозії конденсованої міді у воді дозволили встановити суттєвий вплив на цей процес таких факторів, як наявність солей твердості у водопровідній воді та високий питомий електричний опір дистильованої води. Найбільші зміни маси зразків спостерігалися в перші 10 год корозійних випробувань, а далі відбувалася стабілізація процесу і монотонне зменшення маси зразків. У водопровідній воді мідь характеризується найвищою корозійною стійкістю, причому за динамічних умов випробувань втрати маси в два рази перевищують цей показник для статичних випробувань. У динамічних умовах рух середовища перешкоджає осадженню солей і зростання електричного опору уповільнюється. Аналіз корозійних поляризаційних діаграм підтвердив уповільнення перебігу корозійних процесів у водопровідній воді у порівнянні з дистильованою. Результати вимірювання поверхневого електричного опору зразків до і після випробувань показали, що початковий період корозії поряд з відносно швидкою зміною маси характеризується різким збільшенням електричного опору поверхні зразків, що вказує на переважне утворення оксиду міді (I); зменшення динаміки зміни електроопору в наступні часи випробувань обумовлено стабілізацією процесів росту плівки з утворенням оксиду міді (II). Бібліогр. 17, табл. 4, рис. 9.

*Ключові слова:* електронно-променеве випаровування; вакуум; мідь; конденсати; механічні характеристики; корозійна стійкість

**Вступ.** Наразі багато композиційних матеріалів (КМ) отримують на основі міді, що обумовлено її унікальними властивостями [1]. Зокрема, за низькими значеннями питомого електричного опору (при 20 °С становить  $1,724 \dots 1,80 \cdot 10^{-8}$  Ом·м) мідь поступається лише сріблу, у зв'язку з чим вона широко застосовується в електротехнічній промисловості для виготовлення силових кабелів, проводів або інших провідників.

Чистота міді має вирішальний вплив на властивості КМ, оскільки домішки різко знижують електричну провідність [2–4]. Сучасні способи рафінування металів і сплавів, зокрема вакуумно-індукційна, плазово-дугова та електрошлакова плавки, забезпечують досить ефективну очистку від металевих домішок, неметалевих включень і газів. Але більш вагомими результатами по рафінуванню міді були отримані при використанні технології електронно-променевого переплаву [5, 6]. Перевагами даної технології є більш глибоке

рафінування металу за рахунок фракційної дистиляції, зневоднення, флотації і коагуляції, а висока питома поверхнева потужність в робочій плямі і наявність вакууму, який перешкоджає поглинанню газів в процесі плавки, дозволяє управляти потужністю пучка в просторі та часі. Все це дає можливість здійснити різноманітні технологічні схеми процесу, які важко або неможливо провести іншими способами вакуумної металургії [7, 8].

Комплексний аналіз хімічного складу і структури конденсатів на основі міді електротехнічного призначення [9–13] показав, що формування структури, електротехнічних характеристик, механічної міцності та корозійної стійкості суттєво залежать від чистоти вихідних матеріалів, яка наряду з легуючими компонентами суттєво впливає на зазначені характеристики. У зв'язку з цим значний інтерес представляє вивчення особливостей структури та властивостей чистої конденсованої міді, що дає можливість визначити вплив легую-

М.І. Гречанюк — <http://orcid.org/0000-0002-2609-6018>

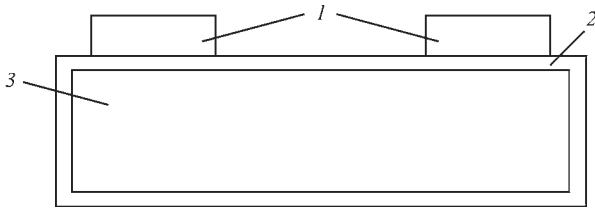


Рис. 1. Схема накладання контактів для вимірювання електричного опору поверхні зразка: 1 — накладні контакти; 2 — плівка; 3 — зразок

чих компонентів, що вводяться в мідь, на властивості КМ.

Метою цієї роботи є вивчення особливостей формування структури, механічних характеристик та корозійної стійкості чистої міді, отриманої способом електронно-променевого випаровування-конденсації у вакуумі.

**Матеріали і методи дослідження.** В якості вихідних матеріалів використовували литу мідь у зливках марки МО ДСТУ 859:2003. Мідь випаровували на лабораторній електронно-променевій установці L-2 багатоцільового призначення, відмінною особливістю якої є можливість здійснення на одному обладнанні більшості типових технологічних процесів, що реалізуються в даний час за допомогою різних електронно-променевих установок спеціального призначення [14]. Установа укомплектована трьома термокатодними гарматами зі стрічковим катодом. Номінальна прискорююча напруга становить 20 кВ. Вакуум у робочій камері при отриманні конденсатів знаходиться на рівні  $10^{-2} \dots 5 \cdot 10^{-3}$  Па. Підкладкою для осадження міді служила нагріта до  $700 \pm 15$  °C пластина із сталі марки Ст3, на яку попередньо наносили розділовий шар із  $\text{CaF}_2$ . Зливок міді діаметром 70 мм поміщали в мідний водоохолоджувальний тигель, з якого здійснювалось його випаровування. Швидкість осадження парового потоку становила 10...15 мкм/хв. В результаті проведення процесу випаровування-конденсації отримували листи конденсованої міді розміром 200×250 мм, товщиною 1,0...1,2 мм. Проводили дві серії експериментів. Друга серія відрізнялась від першої тим, що під час випаровування міді застосовували ванну-посередник із сплаву Cu–Zr–Y, що пришвидшує швидкість випаровування міді в 2...3 рази [16]. Мікроструктуру отриманих зразків вивчали

способом скануючої електронної мікроскопії; механічні властивості визначали при випробуванні стандартних зразків на розтяг за кімнатної температури відповідно до ДСТУ ISO 6892-1:2019. Для порівняння властивостей піддавали випробуванню також зразки вихідної литої міді марки МО ДСТУ 859:2003 після відпалу у вакуумі при 450 °C протягом двох год. Для аналізу корозійної стійкості використовували гравіметричні дослідження, які проводили витримкою зразків у водопровідній та дистильованій воді протягом 100 год. Зростання товщини плівок продуктів корозії контролювали вимірюванням електричного опору поверхні зразків за схемою, представленою на рис. 1. Контроль електричного опору поверхні проводили через кожні 10 год корозійних випробувань.

**Результати досліджень та їх обговорення.** Порівняльна оцінка властивостей конденсованої міді і міді, отриманої способом литва, показала незначну різницю їх значень (табл. 1). Незначне підвищення електричного опору конденсованої міді, отриманої через ванну-посередник, пояснюється додатковим легуванням цирконієм та ітрієм у загальній кількості 0,05...0,10 мас. %. Деякі зміни рівня механічних характеристик осадженої міді у порівнянні із литим металом пов'язані з відмінностями її внутрішньозеренної блочної структури, яка формується в умовах фізичного осадження міді у вакуумі [16]. Крім того, підвищення електроопору та твердості конденсату (у 1,5 рази) у разі використання ванни-посередника пов'язано також із мікролегуванням міді цирконієм та ітрієм. Остаточні висновки щодо цього питання потребують подальших детальних електронно-мікроскопічних досліджень мікроструктури конденсату.

Проведені електронно-мікроскопічні дослідження показали, що конденсати чистої міді мають чітко виражену стовпчасту структуру з розмірами кристалітів приблизно 35...40 мкм (рис. 2).

Дослідження зламів конденсатів міді за кімнатної температури показали в'язкий характер руйнування по механізму злиття мікропустот з великою передуючою руйнуванню пластичною деформацією (рис. 3).

Лита мідь і її сплави схильні до рівномірної корозії, але при цьому зустрічаються виразкова,

Таблиця 1. Основні фізичні і механічні властивості конденсованої та литої міді

Мідь	$\rho$ (густина), кг/м <sup>3</sup>	$R$ , мкОм·м	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_T$ , МПа	$\delta$ , %	$HB$ , МПа
Конденсована	$8,85 \cdot 10^3$	0,0181	210...220	55...60	53...55	500...600
Конденсована через ванну-посередник	—»—	0,0183	215...225	56...61	50...53	520...630
Лита, відпалена	$8,9 \cdot 10^3$	0,0178	200...240	70	40...50	350...400

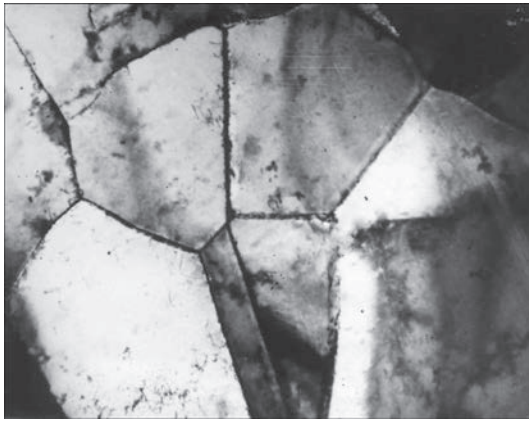
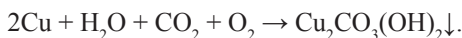


Рис. 2. Мікроструктура конденсованої міді в перетині, перпендикулярному падінню парового потоку (×8000)

кавітаційна, міжкристалічна види корозії, а також корозійне розтріскування [16]. Чиста мідь має задовільну корозійну стійкість в атмосферних умовах за кімнатної температури. Причому чим чистіша мідь, тим вище її корозійна стійкість. Чиста мідь стійка проти атмосферної корозії за рахунок того, що на її поверхні утворюється тонка захисна плівка складу  $\text{CuSO}_4 \cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_2$ . Прісна вода і конденсат пари практично не діють на мідь. Також незначна швидкість корозії міді у морській воді. У вологому повітрі мідь окислюється, утворюючи основний карбонат міді (II):



З електрохімічної точки зору поверхня конденсату міді мікрогетерогенна, що визначається наявністю орієнтації окремих кристалів, існуванням границь зерен, недосконаlostями кристалічної решітки внаслідок утворення дислокацій та іншими порушеннями тонкої структури. Це призводить до неоднакового перенапруження по поверхні зразка і, як наслідок, протіканню анодного і катодного процесів. Таким чином, корозія міді у водних середовищах протікає за електрохімічним механізмом [17].

Наведені дані гравіметричних випробувань мідних конденсатів у статичному і динамічному режимах у дистильованій воді показали, що найбільші зміни маси зразків спостерігаються в початковий період корозійних випробувань (10...20 год) (рис. 4).

Далі відбувається стабілізація корозійних процесів і зміна маси має рівномірний характер,

Таблиця 2. Хімічний аналіз корозійних середовищ після 100 год випробувань в дистильованій воді

Режим випробувань	Вміст іонів $\text{Cu}^{2+}$ , мг/л
До випробувань	0,09
Статичний	0,151
Динамічний	0,186

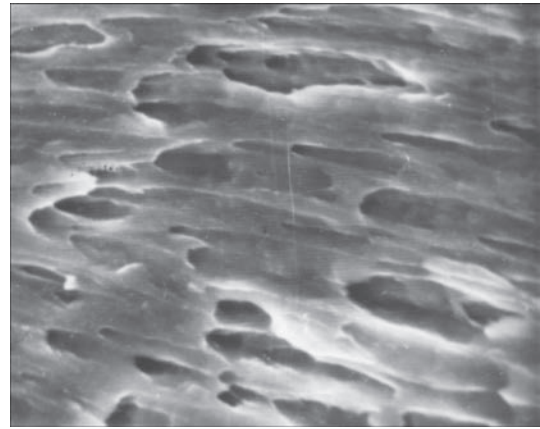


Рис. 3. Електронна фрактограма зламу конденсатів міді (×400)

близький до лінійного. Електронно-мікроскопічні дослідження показали, що корозія протікає рівномірно по всій поверхні зразків. Основний анодний процес полягає в іонізації міді з переходом у розчин двозарядних катіонів:



Це підтверджується результатами хімічного аналізу корозійних середовищ після 100 год випробувань (табл. 2). Ймовірно стабілізація корозійного процесу відбувається за рахунок утворення на поверхні зразків тонкого шару суміші оксидів міді (I) і (II), що мають захисні властивості:



Застосування способу вимірювання електричного опору зразків для оцінки процесів корозії розглядалися в двох аспектах: зміна електричного опору за рахунок утворення на поверхні зразків продуктів корозії і вивчення селективного розчинення електронегативного компонента. Оскільки при вимірюванні електричного опору контакт здійснювався по поверхні зразка, а відстань між контактами була незначна (6 мм), то збільшення електричного опору

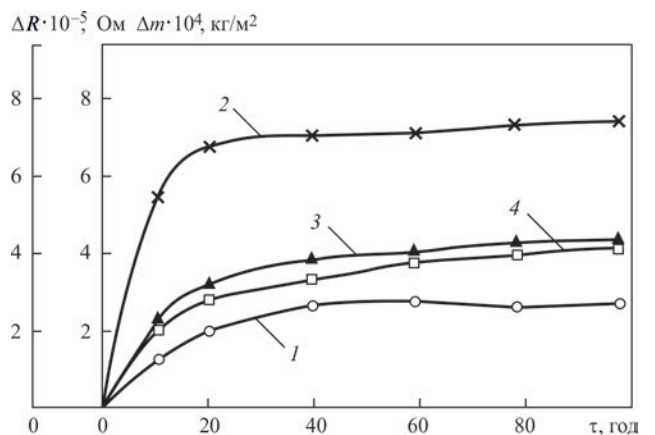


Рис. 4. Зміна маси зразків (1, 2) і електричного опору поверхні зразків (3, 4) в процесі корозійних випробувань в статичних (1, 3) та динамічних (2, 4) умовах у дистильованій воді

зразка можна віднести за рахунок зміни товщини поверхневого шару та хімічного складу продуктів корозії, що його утворюють. Електричний опір поверхні зразка до корозійних випробувань був незначним і приймався рівним нулю. Оксиди міді, особливо  $\text{Cu}_2\text{O}$ , відрізняються значно більшим питомим електричним опором у порівнянні з чистою міддю. Отже, утворення на поверхні зразків захисних плівок із оксидів супроводжується збільшенням загального електричного опору зразків.

З отриманих значень вимірювання електричного опору поверхні зразків можна розрахувати товщину оксидної плівки. Загальний електричний опір зразка ( $R_{\text{зар}}$ ) виражається наступним чином:

$$R_{\text{зар}} = R_{\text{Ме}} + 2R_{\text{пл}}, \quad (1)$$

де  $R_{\text{Ме}}$  — електричний опір частини зразка, яка не підлягала корозії;  $R_{\text{пл}}$  — додатковий електричний опір з урахуванням наявності плівки із продуктів корозії.

Електричний опір тієї частини зразка, яка не підлягала корозії, визначається за формулою:

$$R_{\text{Ме}} = \rho_{\text{Ме}} L / (a \cdot b), \quad (2)$$

де  $\rho_{\text{Ме}}$  — питомий електричний опір матеріалу зразка;  $L$  — відстань між контактами;  $a$ ,  $b$  — товщина і ширина зразка відповідно.

Оскільки для міді  $\rho = 1,72 \cdot 10^{-8}$  Ом·м, а відстань між контактами вибиралася рівною 0,005 м, то при товщині зразка 0,005 м і ширині 0,001 м його електричний опір буде дуже малим (приблизно  $1,7 \cdot 10^{-5}$  Ом) у порівнянні з  $2R_{\text{пл}}$ , причому із зменшенням перетину зразка в процесі корозії опір  $R_{\text{Ме}}$  буде змінюватися незначно. Електричний опір плівки дорівнює:

$$R_{\text{пл}} = \rho_{\text{пл}} h_{\text{пл}} / S_{\text{к}}, \quad (3)$$

де  $\rho_{\text{пл}}$  — середній питомий електричний опір плівки;  $h_{\text{пл}}$  — товщина плівки;  $S_{\text{к}}$  — площа контакту.

Оскільки  $\rho_{\text{пл}}$  має великі значення, а  $S_{\text{к}} = 0,000005$  м<sup>2</sup>, то електричний опір в основному визначається товщиною плівки. Розв'язавши спільно рівняння (1) і (3) відносно  $h_{\text{пл}}$ , отримаємо:

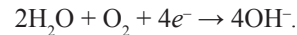
$$h_{\text{пл}} = (R_{\text{зар}} - R_{\text{Ме}}) S_{\text{к}} / 2\rho_{\text{пл}}.$$

Слід зазначити, що застосування отриманого рівняння ускладнено для випадку, коли на поверхні зразків утворюються складні суміші продуктів корозії й оцінити  $\rho_{\text{пл}}$  неможливо. Розрахована за формулою товщина оксидної плівки в початковий період складала  $3,7 \cdot 10^7$  м.

Результати вимірювання поверхневого електричного опору добре узгоджуються з гравіметричними дослідженнями. Початковий період корозії поряд з відносно швидкою зміною маси характеризується різким збільшенням електричного опору поверхні зразків, що підтверджує положення про переважне утворення оксиду міді (I), який має високе значення питомого електричного опору.

Зменшення динаміки зміни  $R_{\text{пл}}$  в наступні часи випробувань вказує на стабілізацію процесів росту плівки і можливість якісних змін у ній з утворенням оксиду міді (II).

Результати випробувань показують, що в динамічних умовах спостерігається більше зменшення маси зразків у порівнянні зі статичними (рис. 3). У динамічних умовах внаслідок більшої аерації середовища та кращого відведення продуктів корозії складаються більш сприятливі умови для протікання корозійних процесів з кисневою деполяризацією



Збільшення концентрації кисню у воді від 6,90 у статичних до 7,34 мг/л у динамічних умовах сприяє прискоренню перебігу процесів утворення оксидів міді (I) і (II), а рух зразків у середовищі усуває дифузні обмеження. Підвищення аерації також збільшує вміст в плівці оксиду  $\text{CuO}$ , який має більшу електропровідність у порівнянні з  $\text{Cu}_2\text{O}$ . Це підтверджується меншими значеннями електричного опору поверхні зразків, що випробували в динамічних умовах у порівнянні зі статичними.

Отримані результати узгоджуються з вимірами рН і електропровідності ( $\kappa$ ) середовищ, у яких проводилися корозійні випробування (табл. 3). Наведені дані підтверджують висновок про те, що в динамічному режимі корозійні процеси активізуються, про що свідчить збільшення вмісту іонів міді, які перейшли в розчин, і, відповідно, підвищили питому електропровідність середовища.

Таблиця 3. Зміна рН і питомої електропровідності середовищ в процесі корозійних випробувань

Режим випробувань	Показник	Значення через $\tau$ , год			
		0	20	50	100
Статичний	рН	6,41	6,29	6,53	6,81
	$\kappa$ , См/м	$6,24 \cdot 10^{-4}$	$6,74 \cdot 10^{-4}$	$7,88 \cdot 10^{-4}$	$9,34 \cdot 10^{-4}$
Динамічний	рН	6,41	6,13	6,74	7,01
	$\kappa$ , См/м	$6,24 \cdot 10^{-4}$	$8,17 \cdot 10^{-4}$	$9,07 \cdot 10^{-4}$	$1,92 \cdot 10^{-3}$

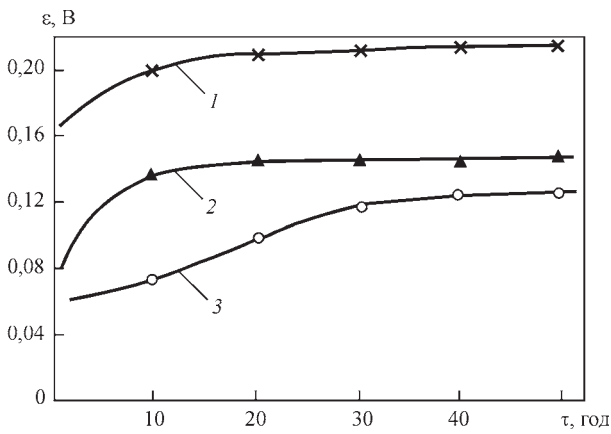


Рис. 5. Вплив концентрації кисню  $[O_2]$  в дистильованій воді на величину стаціонарного електродного потенціалу мідних електродів, мг/л: 1 — 8,95; 2 — 8,67; 3 — 14,29

Важливою характеристикою, яка дозволяє судити про кінетику корозійних процесів, є величина стаціонарного електродного потенціалу (рис. 5).

Результати досліджень у середовищах з різним вмістом кисню показують, що підвищення концентрації кисню зрушує стаціонарний потенціал в позитивну область внаслідок полегшення протікання катодного процесу відновлення кисню.

Введення в дистильовану воду NaCl досить сильно зміщує стаціонарний електродний потенціал ( $\epsilon = -0,018$  В) в більш негативну область, тобто корозійні процеси протікають інтенсивніше. Про це свідчить корозійна діаграма для конденсатів міді, отримана при знятті поляризаційних кривих у потенціодинамічному режимі в 3%-ному розчині NaCl (рис. 6).

З наведених даних видно, що при корозії конденсату міді в 3%-ному розчині NaCl контролюючою стадією є процес відновлення кисню, що протікає в дифузійному режимі. Значення дифузійного струму в статичних умовах становить  $0,631$  А/м<sup>2</sup>, а загальна швидкість розчинення відповідно  $0,661$  А/м<sup>2</sup> при потенціалі корозії  $+0,04$  В.

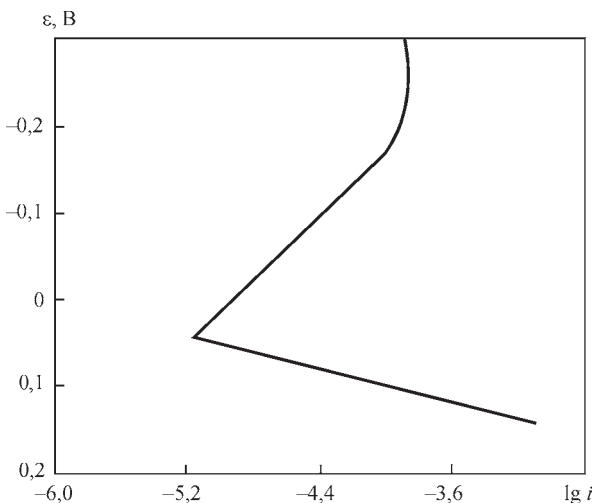


Рис. 6. Корозійна поляризаційна діаграма для мідного конденсату в 3%-ному розчині NaCl

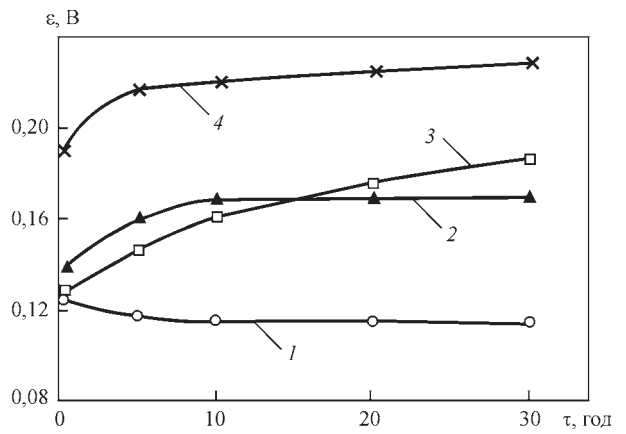


Рис. 7. Вплив концентрації кисню  $[O_2]$  у водопровідній воді на величину стаціонарного електродного потенціалу конденсатів міді, мг/л: 1 — 2,3; 2 — 3,1; 3 — 8,11; 4 — 16,07

У водопровідній воді стаціонарний електродний потенціал конденсатів міді в значній мірі залежить від часу витримки води в контакт з атмосферним повітрям. Так, у свіжій водопровідній воді стаціонарний потенціал Cu має найбільше негативне значення. У процесі відстоювання води в ній підвищується концентрація розчиненого кисню, а частина солей твердості випадає в осад. При цьому стаціонарний електродний потенціал приймає значення більш позитивні, ніж у дистильованій воді.

Вплив зазначених факторів на величину стаціонарного електродного потенціалу наведений на рис. 7. Таким чином, збільшення вмісту кисню в водопровідній воді, підвищення рН та зменшення концентрації іонів  $Ca^{2+}$  і  $Mg^{2+}$  сприяє зміщенню в позитивну область стаціонарного електродного потенціалу парофазних конденсатів.

Гравіметричними дослідженнями встановлено, що мідні конденсати у водопровідній воді характеризуються високою корозійною стійкістю (рис. 8, криві 1, 2). Однак за динамічних умов випробувань втрати маси в два рази перевищують цей показник для статичних випробувань. Найбільші зміни маси

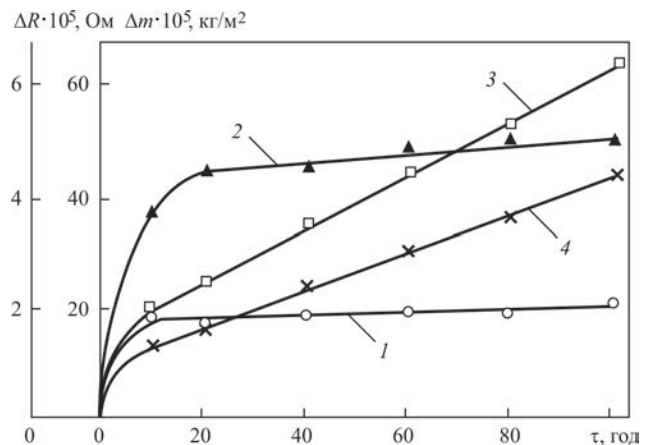


Рис. 8. Зміна маси (1, 2) і електричного опору поверхні зразків (3, 4) в процесі корозійних випробувань в статичних (1, 3) та динамічних (2, 4) умовах у водопровідній воді

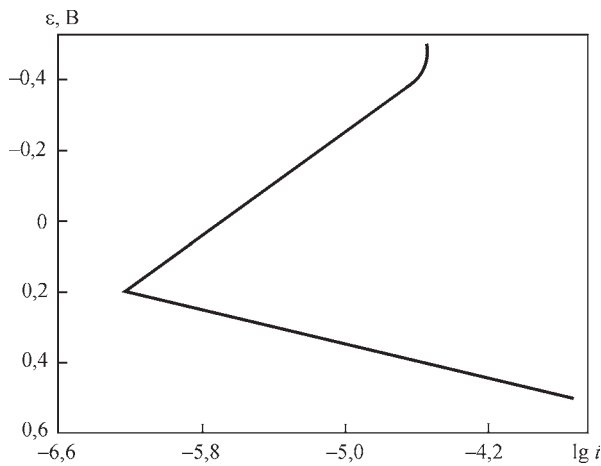


Рис. 9. Корозійна поляризаційна діаграма конденсованої міді в водопровідній воді

спостерігаються в перші 10 год корозійних випробувань, а далі відбувається стабілізація процесу і монотонне зменшення маси зразків. Із розташування кривих електричного опору поверхні зразків випливає, що в статичних умовах  $\Delta R$  зростає інтенсивніше в порівнянні з динамічними (рис. 8, криві 3, 4). Це можна пояснити осадженням на поверхні зразка при відсутності руху середовища солей твердості, які мають високі значення питомого електричного опору.

У динамічних умовах рух середовища перешкоджає осадженню солей і зростання електричного опору уповільнюється. Результати електрохімічних досліджень, отриманих методом зняття поляризаційних кривих, підтвердили уповільнення перебігу корозійних процесів у водопровідній воді у порівнянні з дистильованою (рис. 9). Це підтверджується струмами корозії, значення яких у водопровідній воді менші, ніж у дистильованій і становлять  $6,31 \cdot 10^{-3}$  А/м<sup>2</sup>. Процес електрохімічної корозії протікає в двох середовищах з катодним контролем.

Гравіметричні випробування добре узгоджуються з даними хімічного аналізу середовища після корозійних випробувань (табл. 4).

Вміст солей твердості в середовищі зменшується у зв'язку з утворенням плівок на поверхні зразків, до складу яких входять іони кальцію і магнію, концентрація іонів міді в середовищі збільшується, особливо помітно це для динамічних умов.

**Висновки**

1. Порівняльні дослідження осадженої міді, отриманої способом електронно-променевого випаровування-конденсації та традиційним способом литва (марка МО), виявили незначну різницю в значеннях електроопору. Деяке підвищення рівня механічних характеристик осадженої міді у порівнянні з литою, ймовірно, пов'язано із відмінностями

Таблиця 4. Результати хімічного аналізу водопровідної води після 100 год корозійних випробувань

Режим випробувань	Вміст іонів в корозійному середовищі, мг/л		
	Cu <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>
До випробувань	0,053	90,09	10,94
Статичний	0,113	86,90	10,24
Динамічний	0,162	88,01	10,73

ми її внутрішньозеренної блочної структури. Збільшення у 1,5 рази твердості конденсату, отриманого при використанні ванни-посередника, пов'язано із мікролегуванням міді цирконієм та ітрієм.

2. Вивчено вплив водного середовища на корозійну стійкість конденсованої міді. Встановлено, що корозія міді у водних середовищах протікає за електрохімічним механізмом. Уповільнення перебігу корозійних процесів у водопровідній воді у порівнянні з дистильованою підтверджується гравіметричними випробуваннями, даними хімічного аналізу середовища після корозійних випробувань, струмами корозії, значення яких у водопровідній воді менші, ніж у дистильованій.

**Список літератури/References**

- Pradyot, P. (2002) *Inorganic compounds*. Handbook of inorganic chemicals. <https://fitk.iainambon.ac.id/tadrisipa/wp-content/uploads/sites/6/2020/10/handbook-of-inorganic-chemical.pdf>
- Hsu, Y.T., O'Reilly, B. (1977) Impurity effects in high-conductivity copper. *J. of Minerals. Metals and Materials*, **29**, 21–24.
- Devis, J.R. (2001) *Copper and copper alloys*: ASM Specialty Handbook.
- Chapman, D. (2011) *High conductivity copper for electrical engineering*. <https://leonardo-energy.pl/wp-content/uploads/2019/03/mied%ac5%b9-elektryka-raport.pdf>
- Movchan, B.A., Tikhonovsky, A.L., Kudinov, Yu.A. (1973) *Electron beam melting and refining of metals and alloys*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
- Zolotoj, A.L. (1973) To problem of melting of copper and producing of ingots from it in electron beam furnace. *Sb. Nauch. Trudov*, **41**, 45–53, Moscow, Giredmet [in Russian].
- (2007) *Electron beam melting in foundry*. Ed. by S.V. Ladokhyn. Stal, Kyiv [in Russian].
- Paton, B.E., Akhonin, S.V., Berezos, V.A. (2018) Development of technologies of electron beam melting of metals at the E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. *Suchasna Elektrometalurgiya*, **4**, 19–35. DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/sem2018.04.01>
- Grechanyuk, V.G., Grechanyuk, N.I., Chornovol, V.O. et al. (2022) Copper and molybdenum-based nanocrystalline materials. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*, **44**(7), 927–942.
- Bukhanovski, V.V., Minakova, R.V., Grechanyuk, I.N. et al. (2011) Effect of composition and heat treatment on the structure and properties of condensed composites of the Cu–W system. *Metal Sci. and Heat Treatment*, **53**(1–2), 14–23.
- Grechanyuk, N.I., Konoval, V.P., Grechanyuk, V.G. (2021) Properties of Cu–Mo materials produced by physical vapor

- deposition for electrical contacts. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 60(3–4), 183–190.
12. Grechanyuk, N.I., Grechanyuk, V.G. (2018) Precipitation-strengthened and microlayered bulk copper- and molybdenum-based nanocrystalline materials produced by high-speed electron-beam evaporation-condensation in vacuum: Structure and phase composition. *Ibid.*, 56(11–12), 633–646.
  13. Grechanyuk, N.I., Kucherenko, P.P., Melnik, A.G. et al. (2016) New electron beam equipment and technologies for producing of advanced materials using vacuum melting and evaporation methods developed at SPE «Eltechnach». *The Paton Welding J.*, 5–6, 48–55. DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/tpwj2016.06.08>
  14. Grechanyuk, N.I., Baglyuk, G.A., Kucherenko, P.P. et al. (2017) Laboratory electron-beam multipurpose installation L-2 for producing alloys, composites, coatings, and powders. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 56(1), 113–121.
  15. Maissel, L., Glang, R. (1977) *Handbook of thin film technology*. 2<sup>nd</sup> Ed., McGraw-Hill, New York, USA.
  16. Zhou, P., Kevin, O. (2018) The corrosion of copper and copper alloys. Ed. by K. Wandelt. *Encyclopedia of Interfacial Chemistry: Surface Sci. and Electrochemistry*, 6, 478–489. DOI: <http://10.1016/B978-0-12-409547-2.13429-8>
  17. Grechanyuk, V.G. (2006) *Physical chemistry and chemistry of silicates*. Kandor, Kyiv [in Ukrainian].

## FEATURES OF THE STRUCTURE AND PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES OF COPPER PRODUCED BY THE METHOD OF ELECTRON BEAM EVAPORATION AND CONDENSATION IN VACUUM

V.G. Hrechanyuk<sup>1</sup>, M.I. Hrechanyuk<sup>2</sup>, O.V. Khomenko<sup>2</sup>, I.M. Hrechanyuk<sup>1</sup>, V.I. Hots<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Kyiv National University of Construction and Architecture of MESU.

31 Povitroflotskyi Prosp., 03037, Kyiv, Ukraine. E-mail: [eltechnic777@ukr.net](mailto:eltechnic777@ukr.net)

<sup>2</sup>I.M.Frantsevych Institute of Materials Science Problems.

3 Omelyan Pritsak Str., 03680, Kyiv, Ukraine.

The structure and physico-chemical properties of copper, produced by the method of electron beam evaporation and condensation in vacuum were studied. A substrate from steel of St3 grade heated to  $700 \pm 15$  °C was used for metal deposition. An intermediate pool from Cu–Zr–Y alloy was applied in the experiments. Evaluation of the properties of condensed copper, compared to cast one, showed a small difference in the values of specific electric resistance, and a certain increase of the level of mechanical characteristics, that is, probably, associated with the differences in its intragranular block structure. A 1.5 times increase of the condensate hardness was found in the case, when the intermediate pool was used, which is related to Zr and Y microalloying. Gravimetric studies of condensed copper corrosion in water revealed a significant influence on this process of such factors as presence of hardness salts in tap water and high specific electric resistance of distilled water. The greatest changes in the sample weight were observed in the first 10 hours of corrosion testing, and then process stabilization and monotonic decrease of sample weight took place. In tap water copper is characterized by the highest corrosion resistance, weight losses being two times higher under dynamic testing conditions than this value for static testing. Under dynamic conditions, the medium movement prevents salt deposition, and electric resistance increase becomes slower. Analysis of corrosion polarization diagrams confirmed the slowing down of corrosion processes in tap water, compared to distilled water. Results of measurement of surface electric resistance of the samples before and after testing showed that the initial corrosion period with a relatively fast weight change, is characterized by an abrupt increase of electric resistance of the sample surface, which points to a predominant formation of copper oxide (I); and reduction of the dynamics of electric resistance change in the next testing periods is due to stabilization of the processes of film growth with copper oxide formation (II). Ref. 17, Tabl. 4, Fig. 9.

*Key words: electron beam evaporation; vacuum; copper; condensates; mechanical characteristics; corrosion resistance*

Надійшла до редакції 21.12.2022



# Forum of Mechanical Engineers

XXIII міжнародна науково-технічна конференція  
**Прогресивна техніка,  
технологія та інженерна освіта**  
(в рамках ФОРУМУ ІНЖЕНЕРІВ-МЕХАНІКІВ)  
30.05-01.06 2023 р.  
*Присвячується 125-річчю КПІ  
ім. Ігоря Сікорського  
та 125-річчю механіко-машинобудівного інституту*



**Контакти:**  
Навчально-науковий механіко-машинобудівний інститут КПІ ім. Ігоря Сікорського  
пр-т Перемоги, 37, корп. № 1,  
кім. 251, м. Київ, 03056, Україна  
(044) 204-95-37, (068) 659-47-95,  
[conf-mmi@ukr.net](mailto:conf-mmi@ukr.net)  
[conf.mmi.kpi.ua](http://conf.mmi.kpi.ua)