

ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ВИПАРОВУВАННЯ МАГНІЮ ЕЛЕКТРОННИМ ПРОМЕНЕМ У ВАКУУМІ

О.В. Горностай, В.О. Осокін, С.Є. Литвин, Л.А. Крушинська, М.А. Хохлов, Ю.А. Хохлова

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11

РЕФЕРАТ

Магнієві покриття розглядаються як перспективний клас біодеградованих функціональних шарів для модифікації поверхні матеріалів, що використовуються для отримання імплантатів завдяки здатності іонів магнію стимулювати процеси регенерації кісткової тканини та остеоінтеграції. В статті наведено результати досліджень особливостей формування магнієвих плівок (покриттів) товщиною 0,6...3,6 мкм методом електронно-променевого фізичного осадження з парової фази (ЕВ–PVD) у вакуумі. Метод ЕВ–PVD забезпечує високу чистоту плівок та точний контроль параметрів осадження. Метою роботи було встановлення впливу конструкції випарника та геометрії направленої парового потоку на структуру, морфологію й елементний склад магнієвих плівок, осаджених на поверхню кремнієвих і мідних підкладок шляхом випаровування із відкритого (лункового) та каналного вольфрамових випарників. Температура підкладок варіювалась від 40 до 98 °С, а час напilenня від 60 до 720 с. Встановлено, що застосування каналного випарника забезпечує більш стабільний процес випаровування та локалізоване осадження покриттів з вищою ефективністю використання матеріалу, що випаровується. Показано, що орієнтація підкладки відносно потоку магнієвої пари істотно впливає на морфологію сформованих плівок: на вертикальних підкладках утворюються більш дрібнозернисті структури з вузьким розподілом зерен за розмірами, тоді як на горизонтальних — більш крупнозерниста мікроструктура. Визначено, що зниження швидкості випаровування до $1,24 \text{ мг} \cdot \text{с}^{-1}$ у поєднанні з направленим паровим потоком сприяє формуванню магнієвих плівок з однорідною субмікронною мікроструктурою із середнім розміром зерна близько 0,3 мкм. Рентгенофазовий аналіз підтвердив утворення кристалічної магнієвої фази з переважною текстурою (002), що потенційно може позитивно впливати на корозійну поведінку покриттів. Бібліогр. 12, табл. 3, рис. 5.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: електронний промінь, парова фаза, магній, кремній, мідь, покриття

ВСТУП

Магній є природним компонентом кісткової тканини та характеризується високою біосумісністю, а його модуль пружності є ближчим до кістки людини порівняно з традиційними металевими імплантативними матеріалами. Завдяки біодеградації з вивільненням іонів Mg^{2+} здатен стимулювати процеси регенерації кісткової тканини та сприяти остеоінтеграції [1]. Разом з тим використання масивних магнієвих імплантатів обмежується їх низькими механічними характеристиками та схильністю до швидкої неконтрольованої корозії. Для підвищення міцності магній зазвичай легують, однак це може призводити до утворення інтерметалідних фаз, формування локальних гальванічних пар та підвищення швидкості корозії, а також потенційних ризиків, пов'язаних із біологічною дією окремих легуючих елементів. У зв'язку з цим перспективним підходом є використання магнію у вигляді поверхневих покриттів на традиційних імплантативних матеріалах, зокрема титанових сплавах. Такий підхід дозволяє поєднати високі механічні властивості та довготривалу стабільність металевої основи з біологічними перевагами магнію, а також частково зменшити ефект екранування напружень (stress shielding),

характерний для жорстких металевих імплантатів [1, 2]. Упродовж останніх років значний інтерес дослідників привертають тонкі магнієві плівки та магній-вмісні покриття, отримані методами фізичного осадження з парової фази (ЕВ–PVD) [3–9]. Однією з основних тем сучасних робіт є аналіз морфології та мікроструктури магнієвих плівок. У роботі [3], досліджено оптичні та структурні властивості Mg-плівок товщиною 100...1280 нм та показано, що тонкі плівки (~100 нм) характеризуються підвищеною пористістю, тоді як при збільшенні товщини формується стовпчаста структура.

МЕТА РОБОТИ

— дослідження особливостей формування тонких магнієвих плівок при електронно-променевому випаровуванні магнію з відкритого (лункового) та каналного вольфрамових випарників, а також встановлення впливу геометрії направленої парового потоку (ПП) на морфологію, структуру та елементний склад конденсатів.

ВИКОРИСТАНІ МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Випаровування магнію з подальшим осадженням отриманого парового потоку проводили на лабораторній електронно-променевій установці УЕ-142. Для відпрацювання методики осадження магнієвих плівок використовували модельні (тестові) підкладки з монокристалічного кремнію та мідної фольги.

Авторське право © Автор(и)

© Видавець ТОВ «ВИДАВНИЧИЙ ДІМ» ПАТОН», 2026

Ця стаття у відкритому доступі за ліцензією CC BY-NC-ND

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Основні дослідження морфології, мікроструктури та елементного складу виконували на кремнієвих підкладках, які завдяки низькій шорсткості поверхні та стабільності геометричних розмірів є зручним об'єктом для оптичної, електронної мікроскопії рентгеноспектрального аналізу елементного складу та рентгенофазового аналізу. Мідну фольгу застосовували як допоміжний технологічний елемент для кріплення кремнієвих підкладок і візуального контролю локалізації парового потоку під час відпрацювання режимів осадження. Оскільки результати дослідження структури та складу магнієвих покриттів були отримані саме на кремнієвих підкладках, які були розміщені в горизонтальному (Г) і вертикальному (В) положеннях, тому у подальшому викладі наведено результати лише для них.

Схема розміщення вольфрамового випарника відносно тестових підкладок представлена на рис. 1. Паровий потік орієнтували каналом випарника на тестові підкладки. Випаровування магнію проводили в трьох порівняльних варіантах: нагрівом електронним променем вольфрамового лункового випарника з магнієм, розташованим у лунці Ø12 мм (варіант-I) і нагрівом каналного вольфрамового випарника [10] Ø12 мм з вихідним каналом Ø4,5 мм довжиною 10 мм з різною швидкістю випаровування (V_v) (варіантах-II та III). У варіанті-I магній нагрівався прямим електронним променем, у варіантах-II та III — магній нагрівався за рахунок радіаційного нагріву від корпусу випарника.

Температуру вольфрамового випарника та тестових підкладок вимірювали за допомогою хромель-алюмелевої термопари К-типу. Під час контролю температури випарника термопару розміщували між корпусом вольфрамового випарника

ка та опорною плитою, що забезпечувало безперервний контроль температури корпусу випарника протягом усього процесу електронно-променевого випаровування. Температуру підкладок визначали шляхом розміщення термопари в центральній частині горизонтальної або вертикальної мідної тестової підкладки. Вимірювання температури проводили безперервно в режимі реального часу протягом усього процесу осадження покриттів.

В якості вихідних матеріалів для випаровування використовували магній чистотою не менше 99,85 %. Тестові підкладки були виготовлені з кремнію — монокристалічного 99,999 % (ГОСТ 19658–81) та мідної фольги М00 99,98 % (ГОСТ 859–2001). Кількість матеріалу, що випаровувався під час експерименту, контролювали порівнянням маси Mg між експериментами. Вимірювання маси використаних матеріалів проводили на лабораторних аналітичних вагах ANG 100C високого класу точності (ГОСТ 24104–88) з ціною поділки 0,0001 г (0,1 мг). Товщину покриття розраховували за величиною приросту маси з урахуванням площі осадження та густини магнію відповідно до співвідношення:

$$h = \Delta m / \rho S,$$

де h — товщина покриття; Δm — приріст маси підкладки після осадження; ρ — густина магнію 1,74 г/см³; S — площа покриття.

Дослідження морфології поверхні та елементного складу магнієвих плівок на тестових підкладках проводилися за допомогою скануючого електронного мікроскопу, CamScan 4D (Великобританія) з рентгенівською приставкою INCA-200 Energy. Зображення поверхні плівок Mg отримані також на оптичному мікроскопі (Polyvar Met). Рентгено-фазовий аналіз (РФА) проводили на дифрактометрі ДРОН-4-07 у відфільтрованому CuK_α випромінюванні при геометрії знімку по Бреггу–Брентано в кутовому інтервалі 10–90° з кроком 0,05 мкм і експозицією в точці 1 с.

Цифрові зображення поверхні магнієвих плівок, отримані методом оптичної мікроскопії, обробляли із застосуванням програмного забезпечення Image-Pro Plus. За результатами комп'ютерного аналізу визначали розміри кристалітів методом випадкових січних (хорд), розраховували середній хордовий розмір кристаліту та будували гістограми розподілу кристалітів за розмірами. Статистичну обробку експериментальних даних і побудову гістограм виконували із застосуванням пакету програмного забезпечення Statgraphics.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

В табл. 1–3 показані технологічні параметри випаровування магнію. При указаних технологічних параметрах проведених експериментів температура випарника T_w змінювалась в залежності від

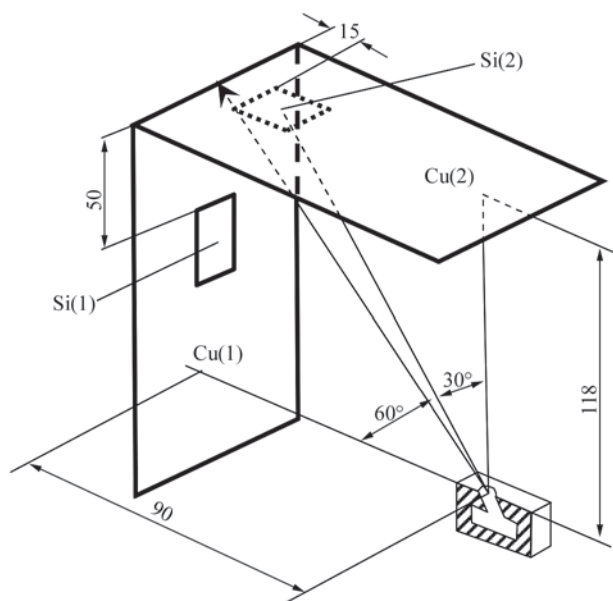


Рис. 1. Схема розміщення мідних та кремнієвих тестових підкладок відносно вольфрамового випарника: відповідно горизонтально розташованих Cu (2) та Si (2) та вертикально розташованих Cu (1) та Si (1)

варіантів випаровування і типу випарника. При випаровуванні магнію з вольфрамового лункового випарника Ø12 мм нагрітим прямим електронним променем $T_{\text{в}}$ зростала з 280 до 760 °С при тривалості процесу (t) від 60 до 300 с. Випарували 811,6 мг (варіант-I). Водночас нагрів електронним променем каналного вольфрамового випарника Ø12 мм з вихідним каналом Ø4,5 мм довжиною 10 мм приводив до зростання $T_{\text{в}}$ з 487 до 600 °С за $t = 300 \dots 680$ с, при випаровуванні 1075,4 мг (варіант-II) і з 340 до 535 °С за $t = 120 \dots 435$ с, та випаровуванні 537,6 мг магнію (варіант-III). Для порівняння впливу швидкості випаровування магнію на структуру та морфологію магнієвих покриттів температуру вольфрамового випарника змінювали в діапазоні 475...500...525 °С. У роботі отримано магнієві плівки товщиною від 0,6 до 3,6 мкм. Товщину покриттів визначали за приростом маси підкладок. Зі збільшенням тривалості осадження товщина магнієвих плівок закономірно зростала.

Морфологія поверхні і елементний склад магнієвих плівок (варіант-I), на сформованих на кремнієвих підкладках розміщених горизонталь-

но та вертикально мідних підкладках, представлені на рис. 2, а, б.

Процес випаровування магнію з відкритого вольфрамового лункового випарника Ø12 мм при електронно-променевому нагріві характеризувався нестабільністю та періодичним викидом крапель розплаву, що може бути пов'язано з локальним перегрівом металу та інтенсивним пароутворенням.

Аналіз елементного складу магнієвих плівок показав, що найменший вміст кисню спостерігається у покриттях, сформованих на горизонтально розташованих підкладках із використанням каналного випарника: 2,21...2,43 ат.%. Для вертикально розташованих підкладок вміст кисню був вищим і становив 4,46...15,42 ат.%, що може бути пов'язано з особливостями падіння парового потоку, менш рівномірним осадженням і формуванням більш відкритої морфології плівки. Для зразка, отриманого з лункового випарника на горизонтальній підкладці, вміст кисню становив 4,74 ат.%, що приблизно у 2 рази перевищує відповідні значення для горизонтальних підкладок, отриманих із застосуванням каналного випарника. Це вказує на доцільність використання каналного випарника

Таблиця 1. Технологічні параметри випаровування магнію з вольфрамового лункового випарника при швидкості випаровування $V_{\text{в}} = 2,71 \text{ мг} \cdot \text{с}^{-1}$

Варіант-I					
$t, \text{с}$	60	120	180	240	300
$T_{\text{в}}, ^\circ\text{C}$	280	550	607	620	760
$T_{\text{п}}, ^\circ\text{C}$	40	69	74	81	88
$P, 10^{-3} \text{ Па}$	1,80	5,86	6,08	5,62	1,64

Таблиця 2. Технологічні параметри випаровування магнію з каналного вольфрамового випарника при швидкості випаровування $V_{\text{в}} = 1,58 \text{ мг} \cdot \text{с}^{-1}$

Варіант-II								
$t, \text{с}$	300	360	420	480	540	600	660	680
$T_{\text{в}}, ^\circ\text{C}$	487	554	560	568	579	581	589	600
$T_{\text{п}}, ^\circ\text{C}$	64	75	81	84	88	92	96	98
$P, 10^{-4} \text{ Па}$	8,5	8,8	7,9	7,4	6,6	6,4	5,9	5,7

Таблиця 3. Технологічні параметри випаровування магнію з каналного вольфрамового випарника при швидкості випаровування $V_{\text{в}} = 1,24 \text{ мг} \cdot \text{с}^{-1}$

Варіант-III							
$t, \text{с}$	120	180	240	300	360	420	435
$T_{\text{в}}, ^\circ\text{C}$	340	360	400	460	495	525	535
$T_{\text{п}}, ^\circ\text{C}$	62	64	71	78	81	88	90
$P, 10^{-4} \text{ Па}$	7,4	7,2	6,1	5,6	5,7	5,5	5,3

Примітка: t — тривалість процесу; $T_{\text{в}}, ^\circ\text{C}$ — температура вольфрамового випарника Mg(W); $T_{\text{п}}, ^\circ\text{C}$ — температура підкладки; $P, 10^{-4} \text{ Па}$ — рівень вакууму.

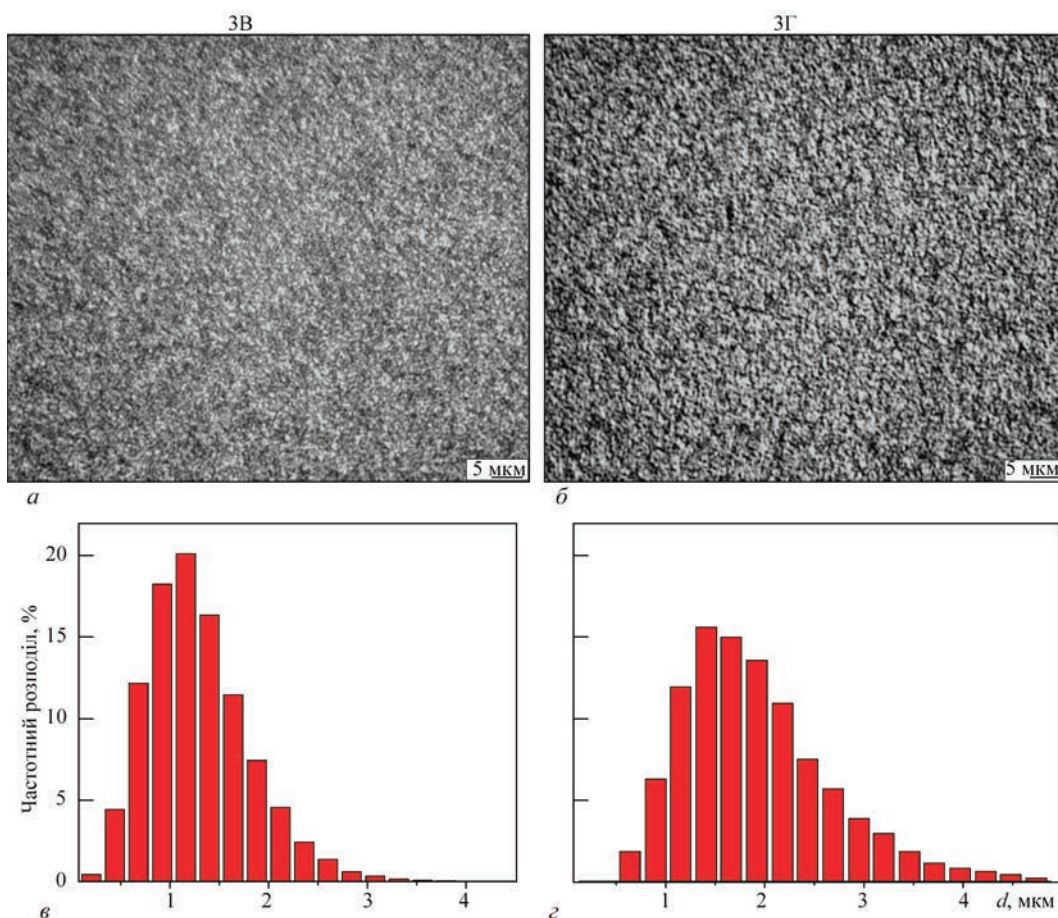


Рис. 2. Оптична мікроскопія поверхні плівки Mg, отриманої на кремнієвій підкладці при випаровуванні з лункового випарника зі $V_v = 2,71 \text{ мг} \cdot \text{с}^{-1}$ (варіант-1) та відповідно гістограми розподілу кристалітів за розмірами: а, б — вертикальне розміщення підкладки; б, з — горизонтальне розміщення підкладки

для формування більш однорідних магнієвих плівок із нижчим рівнем окиснення.

Розподіл розмірів кристалітів (рис. 2, в) має правосторонню асиметрію, характерну для процесів зародження та росту тонких плівок при вакуумній конденсації. Понад 56 % кристалітів зосереджено в інтервалі $0,44 \dots 1,16 \text{ мкм}$. Середній випадковий хордовий розмір зерна становить $1,15 \text{ мкм}$. Для плівки на горизонтальній підкладці 3Г (рис. 2, б) максимум розподілу кристалітів знаходиться в інтервалі $1,41 \dots 1,92 \text{ мкм}$. Розподіл також характеризується правосторонньою асиметрією та наявністю окремих кристалітів розміром до $5,7 \text{ мкм}$. Середній випадковий хордовий розмір зерна становить $1,97 \text{ мкм}$, що свідчить про формування більш крупнозернистої структури порівняно з плівкою на вертикальній підкладці.

Поверхня магнієвої плівки на вертикальній підкладці 4В (рис. 3, а) характеризується дрібнозернистою структурою. Розподіл розмірів кристалітів (рис. 3, в) має характер, близький до логнормального: більшість кристалітів знаходиться в діапазоні $0,2 \dots 2,0 \text{ мкм}$, тоді як окремі структурні елементи досягають $3,5 \dots 4,5 \text{ мкм}$. Середній випадковий хордовий розмір зерна становить $1,28 \text{ мкм}$. Для плівки на горизонтальній підкладці 4Г (рис. 3, б) понад 60 %

кристалітів зосереджено в інтервалі $1,5 \dots 3,0 \text{ мкм}$. Структура характеризується більшими розмірами кристалітів порівняно зі зразком 4В. Середній випадковий хордовий розмір зерна становить $3,54 \text{ мкм}$, що свідчить про формування більш крупнозернистої структури за даних умов осадження. Середній випадковий хордовий розмір зерна $3,54 \text{ мкм}$.

Середній розмір кристалітів магнію на кремнієвому зразку 5В (рис. 4, а, в), розрахований за методом випадкових січних на основі масштабної мікроструктури, становить $0,301 \text{ мкм}$ (субмікронний діапазон). Такий дрібнозернистий розподіл характерний для матеріалів з високою однорідністю. Найбільш інтенсивна фракція лежить у межах $0,210 \dots 0,290 \text{ мкм}$ (сумарно понад 33 % кристалітів) (рис. 4, в). Основна маса кристалітів (> 90 %) зосереджена в інтервалі від $0,130$ до $0,490 \text{ мкм}$. Присутній незначний «хвіст» великих кристалітів до $0,850 \text{ мкм}$. Розподіл асиметричний, зсунутий у бік малих розмірів, що є класичним ознакою логнормального розподілу. Такий тип структури характерний для процесів вакуумної конденсації, де швидкість зародкоутворення переважає над швидкістю росту кристалів на початкових етапах осадження. Структура характеризується переважанням субмікронних

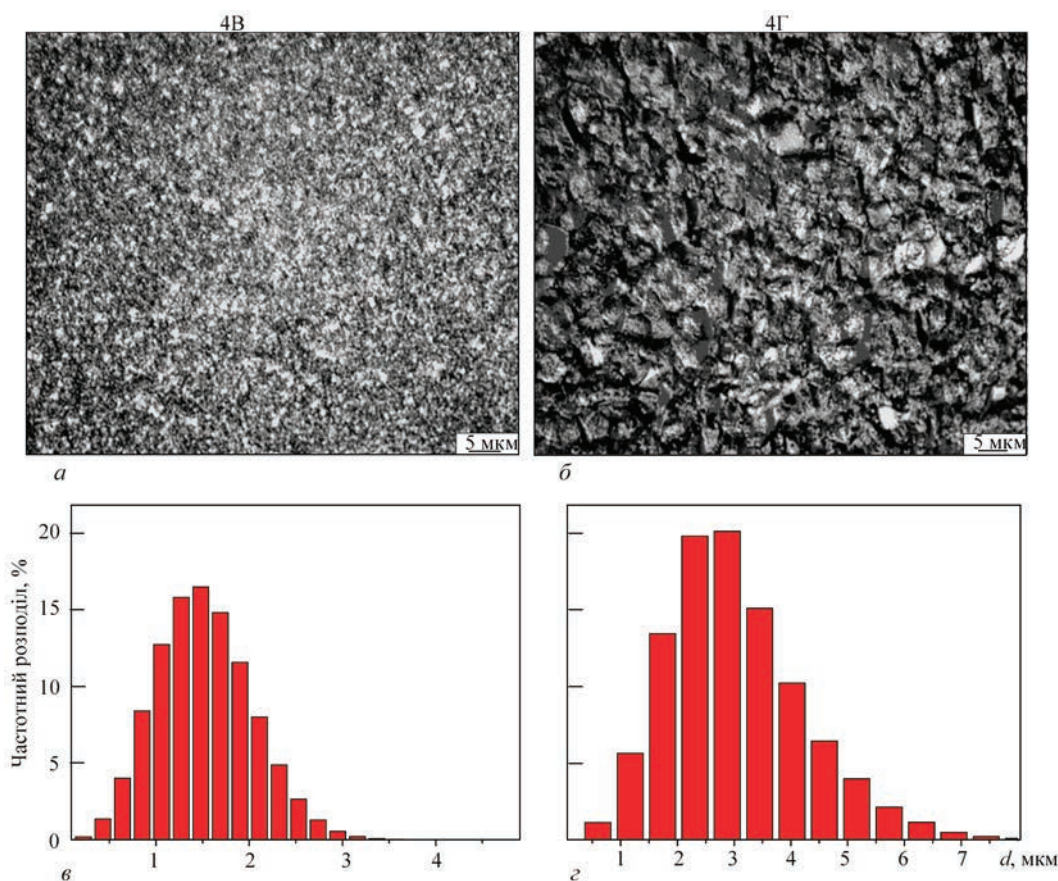


Рис. 3. Оптична мікроскопія поверхні плівки Mg, отриманої на кремнієвій підкладці при випаровуванні з каналного випарника зі $V_v = 1,58 \text{ мг} \cdot \text{с}^{-1}$ (варіант-II) та відповідно гістограми розподілу кристалітів за розмірами: а, в — вертикальне розміщення підкладки; б, г — горизонтальне розміщення підкладки

кристалітів і відносно вузьким розподілом без вираженої другої крупнозернистої фракції. Основна маса кристалітів (понад 80 %) на кремнієвому зразку 5Г (рис. 4, б, г) зосереджена в межах від 1,0 до 2,5 мкм, що свідчить про відносно вузький розподіл розмірів зерен і формування однорідної дрібнозернистої структури магнієвої плівки. Зерна мають переважно рівновісну, полігональну (округлу) форму. Чітко виражені міжкристалітні границі (світлі та темні контури), що свідчить про сформовану полікристалічну структуру плівки. Розподіл часток за площею рівномірний, без явних великих дефектів конгломерації чи протяжних тріщин. Сформувався суцільний шар, що складається з щільно упакованих полігональних зерен з середнім розміром 1,77 мкм.

Встановлено, що морфологія магнієвих плівок, отриманих методом електронно-променевого випаровування у вакуумі, суттєво залежать як від конструкції випарника, так і від орієнтації підкладки відносно парового потоку. Для всіх досліджених зразків характерний асиметричний розподіл розмірів кристалітів із переважанням дрібних зерен та наявністю незначної кількості крупніших структурних елементів, що є типовим для процесів вакуумної конденсації.

Порівняння середнього випадкового хордового розміру зерна показало, що на вертикальних підкладках формуються структури з більш вузьким розподілом зерен за розмірами, ніж на горизонтальних. Для плівок серії (I) середній розмір кристалітів становив 1,15 мкм на вертикальній підкладці та 1,97 мкм на горизонтальній; для серії (II) — відповідно 1,28 та 3,54 мкм; для серії (III) — 0,301 та 1,77 мкм. Таким чином, у всіх випадках вертикальне розташування підкладки приводило до зменшення середнього розміру кристалітів у 1,7–6 разів порівняно з горизонтальним розташуванням.

Отримані результати свідчать, що орієнтація підкладки відносно джерела випаровування істотно впливає на умови росту магнієвої плівки. Для вертикальних підкладок формуються більш дрібнозернисті структури, що, ймовірно, пов'язано зі зменшенням щільності потоку конденсованих атомів та нижчою температурою підкладки внаслідок особливостей її просторового розміщення відносно випарника. Горизонтальне розташування підкладки, навпаки, сприяє формуванню більш крупних кристалітів і структур з менш вузьким розподілом зерен за розмірами. Серед досліджених режимів найбільш дрібнозерниста структура була отримана для зразка 5В (рис. 4, а, в), де середній випадковий хордовий розмір зерна становив лише 0,301 мкм. Це

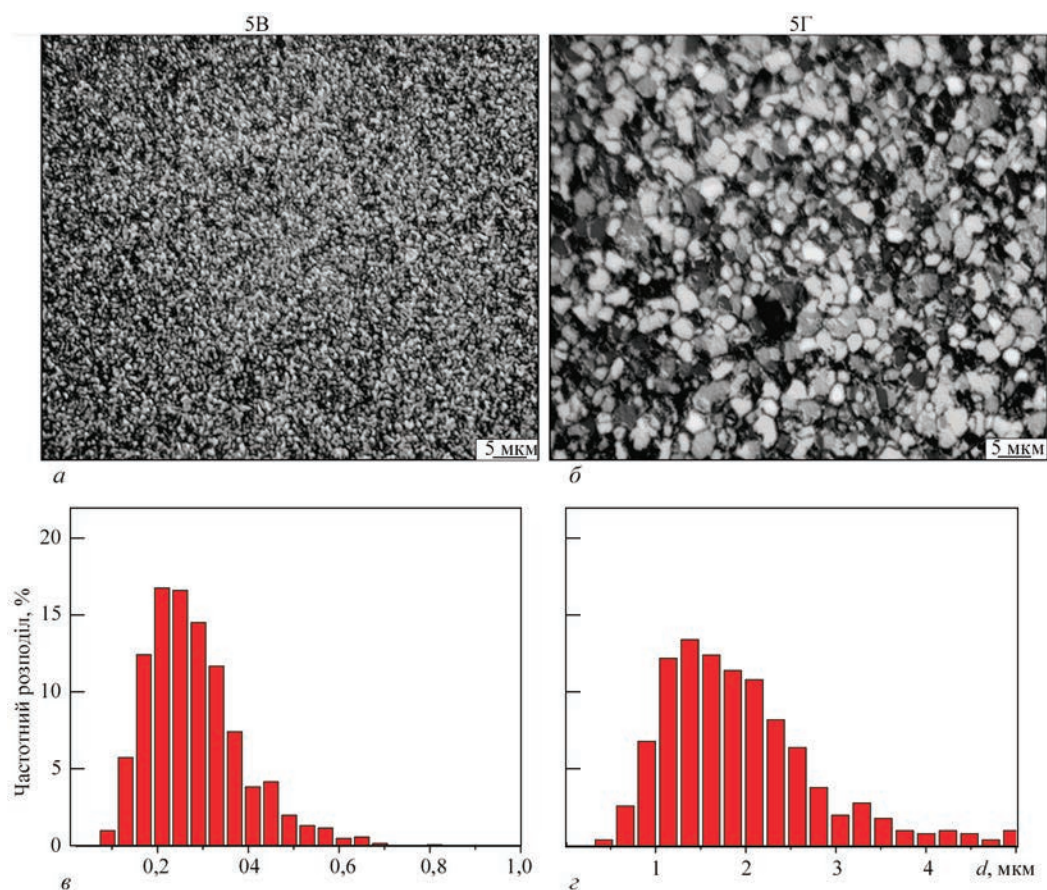


Рис. 4. Оптична мікроскопія поверхні плівки Mg, отриманої на кремнієвій підкладці при випаровуванні з каналного випарника зі $V_v = 1,24 \text{ мг} \cdot \text{с}^{-1}$ (варіант-III) та відповідні гістограми розподілу кристалітів за розмірами: а, б — вертикальне розміщення підкладки; б, г — горизонтальне розміщення підкладки

свідчить про можливість формування субмікронних магнієвих конденсатів шляхом оптимізації швидкості випаровування та геометрії осадження. Водночас найбільші кристаліти спостерігалися на горизонтальній підкладці 4Г, для якої середній розмір зерна досягав 3,54 мкм. Загалом проведені дослідження показали, що конструкція випарника з каналом для формування направленного парового потоку та вибір просторового розташування підкладки є ефективними інструментами керування структурним станом магнієвих плівок у процесі EB-PVD осадження.

Температура вольфрамового випарника визначає тиск насиченої пари магнію та інтенсивність парового потоку, що, у свою чергу, впливає на швидкість росту магнієвої плівки. Зі зростанням температури випарника збільшується потік атомів Mg до підкладки, однак мікроструктури плівки формується не лише швидкістю осадження, а й температурою підкладки, кутом падіння парового потоку, товщиною шару та залишковим тиском у камері. За низької рухливості адатомів можливе формування дрібнозернистої або пористої структури, тоді як підвищення температури підкладки сприяє поверхневій дифузії, укрупненню кристалітів і формуванню щільнішого шару. Отримані результати узгоджуються із загальними поло-

женнями структурно-зонних моделей росту вакуумних конденсатів. З урахуванням температури плавлення Mg ($T_m \approx 923 \text{ K}$) та температури підкладки 313...373 K, гомологічна температура осадження становила $T_s/T_m \approx 0,34 \dots 0,40$. Отримані умови осадження знаходяться у перехідній області між зонами 1 і 2 структурно-зонної моделі Мовчана-Демчишина [11]. Отримана дрібнозерниста морфологія магнієвих плівок узгоджується з обмеженою поверхневою дифузією адатомів за таких умов осадження.

Результати рентгенофазового аналізу зразків з плівками магнію, отриманих з мінімальною ($1,24 \text{ мг} \cdot \text{с}^{-1}$) рис. 5, б і максимально ($2,71 \text{ мг} \cdot \text{с}^{-1}$) рис. 5, а швидкістю випаровування підтвердив формування кристалічної магнієвої фази з гексагональною ґраткою. Для обох зразків характерна наявність інтенсивного рефлексу Mg(002), що свідчить про переважну орієнтацію кристалітів магнію вздовж базисної площини. У зразку 5Г співвідношення інтенсивностей рефлексів Mg(002) та Mg(101) вказує на більш виражену (002)-текстуру порівняно зі зразком 3Г. При цьому порівняння зразків 3Г та 5Г (рис. 5, б) показало, що використання нижчої швидкості випаровування магнію у поєднанні з формуванням направленного парового

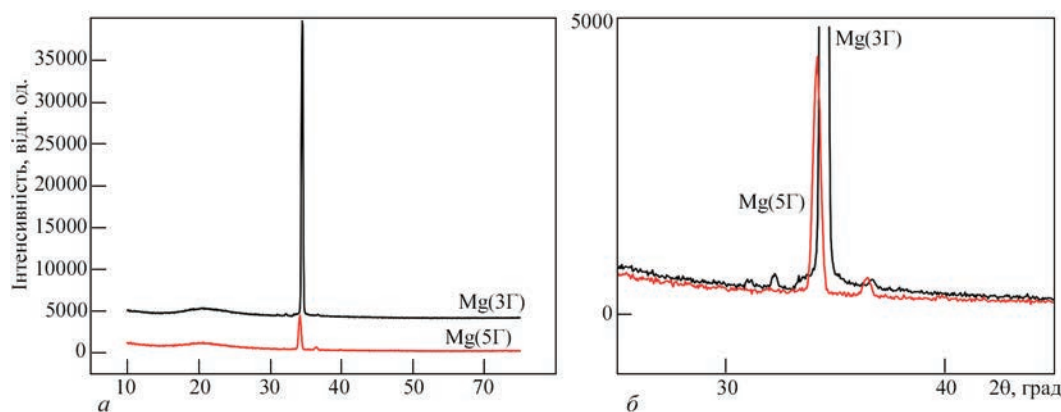


Рис. 5. Рентгенівська дифракція поверхні плівок Mg, отриманих на горизонтально розташованій кремнієвій підкладці з лункового випарника при $V_b = 2,71 \text{ мГ} \cdot \text{с}^{-1}$ (варіант-I, 3Γ), з каналного вольфрамового випарника при $V_b = 1,24 \text{ мГ} \cdot \text{с}^{-1}$ (варіант-III, 5Γ): а — загальний вигляд рентгенівського спектру; б — його збільшений варіант

потоків сприяє отриманню більш однорідної дрібнозернистої структури магнієвої плівки.

Отримані результати узгоджуються з загальними закономірностями вакуумної конденсації, згідно з якими зменшення швидкості осадження збільшує час поверхневої дифузії адатомів і може сприяти формуванню більш впорядкованої структури покриття. Виявлена переважна Mg(002)-орієнтація може мати значення для подальшого використання таких покриттів як функціональних Mg-вмісних шарів на титанових імплантатах. Оскільки корозійна поведінка магнію є кристалографічно залежною, переважна орієнтація базисних площин Mg паралельно поверхні підкладки може бути одним із факторів, що сприяють більш рівномірній та потенційно повільнішій корозії покриття [12].

Робота виконувалась за рахунок зовнішнього інструменту допомоги Європейського Союзу для виконання зобов'язань України у Рамковій програмі Європейського Союзу з наукових досліджень та інновацій «Горизонт 2020» згідно договору № РН/42-2024/0010 від 17.09.2024 р.

ВИСНОВКИ

1. Експериментально апробовано схему електронно-променевого випаровування магнію із застосуванням лункового та каналного вольфрамових випарників. За швидкості випаровування $1,24 \dots 2,71 \text{ мГ} \cdot \text{с}^{-1}$, температури підкладок $40 \dots 98 \text{ }^\circ\text{C}$ та температури випарника $280 \dots 760 \text{ }^\circ\text{C}$ отримано магнієві плівки товщиною $0,6 \dots 3,6 \text{ мкм}$. Встановлено, що використання каналного випарника забезпечує формування направленного парового потоку без утворення крапельної фази, сприяє отриманню більш однорідних магнієвих плівок із нижчим вмістом кисню та є більш перспективним для формування функціональних магнієвих покриттів методом EB-PVD.

2. Встановлено, що орієнтація підкладки відносно направленного парового потоку є одним із технологічних параметрів, який визначає морфологію

магнієвих плівок. Вертикальне розташування підкладки забезпечує формування більш дрібнозернистої структури із середнім розміром зерна $0,30 \dots 1,28 \text{ мкм}$ з вузьким діапазоном розподілу зерен за розмірами, тоді як для горизонтальних підкладок цей показник становив $1,77 \dots 3,54 \text{ мкм}$. Зміна геометрії системи «випарник–підкладка» дозволяє керувати структурним станом магнієвих покриттів, зокрема їх морфологією та розподілом зерен за розмірами.

3. Рентгенофазовим аналізом підтверджено формування кристалічної магнієвої фази з переважною текстурною орієнтацією Mg(002). Показано, що застосування каналного випарника забезпечує більш виражену текстуру Mg(002) порівняно з лунковим випарником, що в поєднанні з результатами морфологічного аналізу свідчить про формування більш однорідної дрібнозернистої структури магнієвих плівок, що створює передумови для подальших досліджень їх корозійних і функціональних властивостей у складі біодеградованих покриттів для медичних виробів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ/REFERENCES

- Wang, S., Zhao, X., Hsu, Y. et al. (2023) Surface modification of titanium implants with Mg-containing coatings to promote osseointegration. *Acta Biomaterialia*, **169**, 19–44. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2023.07.048>
- Yu, Y., Jin, G., Xue, Y. et al. (2017) Multifunctions of dual Zn/Mg ion co-implanted titanium on osteogenesis, angiogenesis and bacteria inhibition for dental implants. *Acta Biomaterialia*, **49**, 590–603. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2016.11.067> (20260526004)
- Bueno-García, Á., Prieto, P., Ferrer, I.J. et al. (2025) Modelling the optical properties of magnesium thin films determined by ellipsometry and reflectometry. *Thin Solid Films*, **817**, 140658. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2025.140658>
- Abejón, D., Prieto, P., Kim, J.K. et al. (2024) Isothermal hydrogen absorption process of Pd-capped Mg films traced by ion beam techniques and optical methods. *J. of Magnesium and Alloys*, **12**(9), 3675–3684. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jma.2024.09.019>
- Fan, W., Li, S., Ren, W. et al. (2024) Synthesis of $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{:Mg}$ thin films by electron beam evaporation and postannealing.

- J. of Magnesium and Alloys*, 17(19), 4931. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17194931>
6. Zreiqat, H., Valenzuela, S., Nissan, B. et al. (2005) The effect of surface chemistry modification of titanium alloy on signalling pathways in human osteoblasts. *Biomaterials*, **26**, 7579–7586
 7. Kim, B.S., Kim, J.S., Park, Y.M. et al. (2013) Mg ion implantation on SLA-treated titanium surface. *Materials Science and Engineering C*, **33**, 1554–1560.
 8. Osokin, V.O., Didikin, G.G., Gornostai, O.V. et al. (2026) Features of the influence of annealing of NaCl-Fe composite materials produced by EB-PVD. *The Paton Welding J.*, **1**, 15–21. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2026.01.02>
 9. Khokhlov, M., Gornostai, O., Maksymchuk, I. et al. (2025) Magnesium-based alloys with functional silver and copper nanocoatings obtained by EB-PVD method for orthopedic applications. In: *Proc. of 15th Inter. Conf. on Nanomaterials: Applications & Properties (NAP)*, Bratislava, Slovakia, 2025, NRA13-1-NRA13-5. DOI: <https://doi.org/10.1109/NAP68437.2025.11216241>
 10. Movchan, B.A., Yakovchuk, K.Yu. (2012) *Device and method of electron beam evaporation and directed deposition of vapor flow on substrate in vacuum*. Pat. 98085, C23C 14/24, C23C 14/28, C23C 14/30; No. a2011 06568 [in Ukrainian].
 11. Movchan, B.A., Demchishin, A.V. (1969) Structure and properties of thick condensates of nickel, titanium, tungsten, aluminum oxides, and zirconium dioxide in vacuum. *Physics of Metals and Metallography*, **28**, 83–90.
 12. Gerashi, E., Alizadeh, R., Langdon, T.G. (2022) Effect of crystallographic texture and twinning on the corrosion behavior of Mg alloys: A review. *J. of Magnesium and Alloys*, **10**, 313–325. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jma.2021.09.009>

TECHNOLOGICAL ASPECTS OF ELECTRON BEAM EVAPORATION OF MAGNESIUM IN VACUUM

O.V. Gornostai, V.O. Osokin, S.Ye. Lytvyn, L.A. Krushynska, M.A. Khokhlov, J.A. Khokhlova

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine

ABSTRACT

Magnesium coatings are considered a promising class of biodegradable functional coatings for the surface modification of implant materials owing to the ability of magnesium ions to stimulate bone tissue regeneration and enhance osseointegration. This paper presents the results of investigations into the formation features of magnesium films (coatings) with a thickness of 0.6...3.6 μm deposited by electron beam physical vapor deposition (EB-PVD) under vacuum. The EB-PVD process provides high-purity films and precise control of deposition parameters. The aim of this study was to determine the influence of evaporator design and the geometry of the directed vapor flux on the structure, morphology, and elemental composition of magnesium films deposited onto silicon and copper substrates by evaporation from open (crucible-type) and channel-type tungsten evaporators. The substrate temperature varied from 40 to 98 $^{\circ}\text{C}$, while the deposition time ranged from 60 to 720 s. The use of the channel-type evaporator was found to provide a more stable evaporation process and localized coating deposition with higher evaporation material utilization efficiency. It was demonstrated that the orientation of the substrate relative to the magnesium vapor flux significantly affects the morphology of the deposited films: vertically oriented substrates promote the formation of finer-grained structures with a narrower grain size distribution, whereas horizontally oriented substrates result in a coarser-grained microstructure. Reducing the evaporation rate to 1.24 mg s^{-1} , combined with a directed vapor flux, was shown to promote the formation of homogeneous magnesium films with a homogeneous submicron microstructure and an average grain size of approximately 0.3 μm . X-ray diffraction analysis confirmed the formation of a crystalline magnesium phase with a predominant (002) orientation, which may potentially improve the corrosion behavior of the coatings. 12 Ref., 3 Tabl., 5 Fig.

KEYWORDS: electron beam, vapor phase, magnesium, silicon, copper, coatings

ORCID

O.B. Горностай — <https://orcid.org/0000-0003-4961-7397>, В.О. Осокін — <https://orcid.org/0000-0002-0632-7739>, С.Є. Литвин — <https://orcid.org/0000-0001-6113-5038>, Л.А. Крушинська — <https://orcid.org/0009-0000-6050-9130>, М.А. Хохлов — <https://orcid.org/0000-0002-8180-3459>, Ю.А. Хохлова — <https://orcid.org/0000-0002-2145-973X>

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів

АВТОР ДЛЯ ЛІСТУВАННЯ

О.В. Горностай

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: gornostai.o.v@gmail.com

РЕКОМЕНДОВАНЕ ЦИТУВАННЯ

О.В. Горностай, В.О. Осокін, С.Є. Литвин, Л.А. Крушинська, М.А. Хохлов, Ю.А. Хохлова (2026) Технологічні аспекти випаровування магнію електронним променем у вакуумі. *Сучасна електрометалургія*, **03**, 11–18. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2026.03.02>

ГОЛОВНА СТОРІНКА ЖУРНАЛУ

<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/sem>

Отримано 22.06.2026

Отримано у переглянutoму вигляді 06.07.2026

Затверджено до друку 14.07.2026

Оприлюднено 24.07.2026