

**Удосконалення обладнання для отримання  
конденсованих із парової фази електроконтактних  
матеріалів із покращеними експлуатаційними  
характеристиками**

М. І. Гречанюк, І. М. Гречанюк, О. В. Хоменко, В. Г. Затовський

Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України,  
Київ, e-mail: [29min@ipms.kiev.ua](mailto:29min@ipms.kiev.ua)

*Наведено результати оптимізації промислового обладнання для отримання методом високошвидкісного випаровування-конденсації у вакуумі композиційних матеріалів електротехнічного призначення на основі міді та металів VIa групи. Розглянуто основні характеристики парофазних конденсатів та перспективи їх застосування в якості електричних контактів різного призначення.*

**Ключові слова:** високошвидкісне випаровування-конденсація, композиційні матеріали, фізико-хімічні властивості, електричні контакти.

Електронно-променеве високошвидкісне випаровування з наступною конденсацією у вакуумі є одним із складових технологічного процесу, який застосовується при отриманні тонких (до 5 мкм) плівок для радіотехніки, мікроелектроніки, обчислювальної техніки та ін. [1], а також товстих (більше 5 мкм), що використовуються в якості ефективних захисних і зносостійких покриттів [2, 3]. Прогнозна оцінка світового виробництва металевих матеріалів з різними технологічними процесами (традиційної металургії та осадження з парової фази, включаючи тонкі плівки, одержувані способом магнетронного розпилення металевих мішеней) свідчить про подальше зростання виробництва нових матеріалів, отриманих осадженням парової фази у вакуумі.

Незважаючи на очевидні переваги, вакуумні покриття не завжди економічно виправдані, оскільки коефіцієнт їх використання зазвичай не перевищує 20%. Нездоланні труднощі при випаровуванні з одного джерела матеріалів на основі міді або срібла з добавками тугоплавких металів в тому чи іншому співвідношенні, відповідному складу сучасних електроконтактних матеріалів, виникають через різницю в пружності пари компонентів.

Значний науковий і практичний інтерес представляє застосування високошвидкісного електронно-променевого випаровування з наступною конденсацією металів і неметалів у вакуумі для отримання масивних композиційних матеріалів (КМ) — тобто товстих конденсатів для електричних контактів на основі міді та тугоплавких металів VIa групи — W, Mo та Cr. При впровадженні нових технологій завжди виникає ряд прикладних та наукових задач, однією з яких є економічна. За вартістю електроконтактні матеріали, одержувані способом випаровування з наступною конденсацією у вакуумі, повинні бути порівняні з подібними матеріалами, що виготовляють за допомогою порошкової металургії.

© М. І. Гречанюк, І. М. Гречанюк, О. В. Хоменко, В. Г. Затовський, 2016

Найбільший інтерес представляє розробка і застосування для електричних контактів КМ, які не містять дорогоцінних металів, зокрема конденсатів на основі міді та металів VIa групи. За експлуатаційною надійністю конденсовані електроконтактні матеріали не повинні поступатися спеченим порошковим композиціям. З цією метою проведено удосконалення конструкцій промислового обладнання на НПП „ЕЛТЕХМАШ” (м. Вінниця), яке дозволяє виготовляти КМ на основі міді та тугоплавких металів (зокрема, W, Mo, Cr) із покращеними характеристиками для заміни срібловмістних матеріалів електроконтактного призначення при роботі на повітрі.

В роботі описано нове покоління електронно-променевого устаткування — установка Л5 та характеристики парофазних матеріалів на основі міді та тугоплавких металів, отриманих на цьому обладнанні, і запропоновано основні напрямки використання цих матеріалів з урахуванням їхніх властивостей.

Удосконалена електронно-променева установка, яка отримала назву Л5, представлена на рис. 1. Устаткування обладнано системою диференціального відкачування з робочої камери і камери гармат, що дозволяє суттєво підвищити надійність роботи електронно-променевих нагрівачів, особливо при випаровуванні кераміки; високовольтним джерелом зі стабілізацією прискорюючої напруги при зміні навантажень або напруги в мережі. Блоки управління розгортками електронних пучків забезпечують до 1600 варіантів розгортки. Крім того, установку оснастили електронним блоком для отримання конденсованих матеріалів мікрошаруватого типу і блоками контролю якості і швидкості подачі зливу, що випаровується.

Розташування основних вузлів установки наведено на рис. 2, а, а схему технологічного процесу, що реалізується на ній, — на рис. 2, б. Технічні параметри установки представлено у табл. 1. В якості вихідних матеріалів для отримання конденсованих з парової фази КМ служать зливки міді, молібдену і вольфраму після електронно-променевого переплаву, зливки хрому, отримані індукційним переплавом в секційному кристалізаторі, або електролітичного хрому в середовищі очищеного аргону. Осадження композиційних матеріалів на установці Л5 проводиться наступним чином. Підкладку 3, виконану у вигляді диска діаметром 1000 мм, закріплювали на механізмі підвіски і обертання виробу 7. Поверхню підкладки 3, на яку здійснювалася конденсація, обробляли по 9—10 класу чистоти. Для легкого відділення сконденсованого матеріалу від підкладки останню нагрівали до  $700 \pm 20$  °С і попередньо осаджували тонкий (10—15 мм) розділовий шар із фтористого кальцію. Для осадження КМ (Cu—Zr, Y—Cr)—Mo використовували зливки молібдену і малолегованого сплаву Cu—Cr, отриманого методом електронно-променевої плавки на установці Л4, на поверхню яких, як у випадку чистої міді, розміщали наважки з цирконію і ітрію.

Градентні КМ систем Cu—Mo, Cu—W, Cu—Cr в інтервалі концентрацій тугоплавкої складової до 50% (мас.) отримували на стаціонарній підкладці з Ст3 розміром 400x600x20 мм з попередньо нанесеним розділовим шаром з CaF<sub>2</sub> випаровуванням чистих молібдену, вольфраму, хрому. Тривалість технологічного процесу одержання листових заготовок КМ товщиною 2—4 мм і діаметром 1000 мм в залежності від необхідної



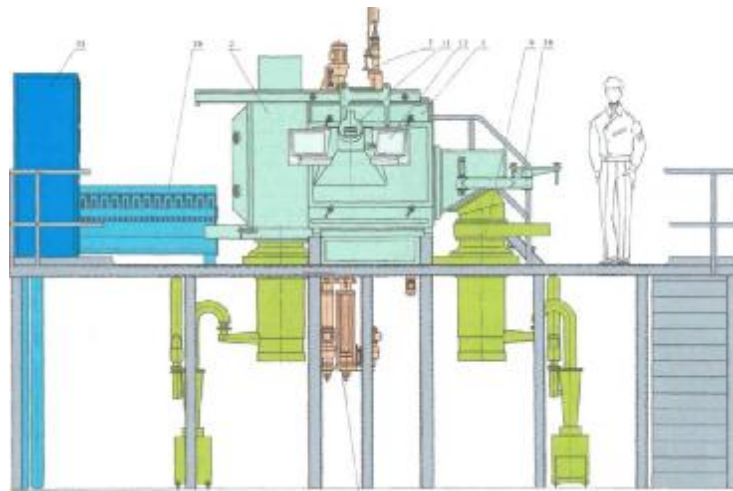
Рис. 1. Зовнішній вигляд промислової електронно-променевої установки Л5 для одержання парофазних конденсатів на основі міді та металів VIa групи.

товщини заготовки становить 3—5 год. Конденсат відділяють від підкладки, розрізають на заготовки, які потім напаяють на контакто-тримачі або електроди для контактного зварювання.

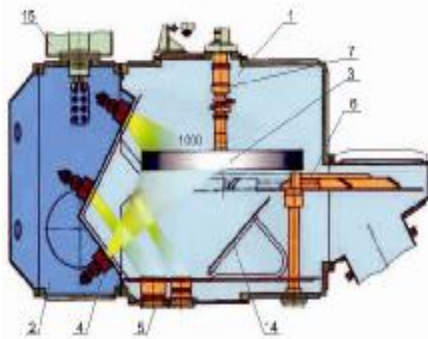
Блок камер складається з робочої камери, де відбувається процес осадження матеріалів, які випаровуються, на виріб (підкладку) при вакуумі  $(6—10) \cdot 10^{-2}$  Па; камери гармат, відокремленої від технологічної камери водоохолоджуємою мідною плитою, на якій розміщено чотири нагрівача для випаровування матеріалів з тиглів, два нагрівача для нагріву виробу знизу і два — для нагріву зверху. Електроживленням забезпечуються всі вісім електронних нагрівачів в будь-якому поєднанні.

З правого боку технологічної камери вмонтовано камеру, куди ховається заслінка на час наплення. Знизу камери заслінки пристиковано два високовакуумних паромасляних насоса, що забезпечують необхідний ступінь вакууму в технологічній камері. На передній кришці технологічної камери, яка відкривається, встановлено оглядову систему для спостереження за процесом випаровування матеріалів з тиглів. Позаду технологічної камери розташовано дві оглядові системи для спостереження за нагріванням виробів знизу або зверху. Поруч з оглядовими системами знаходяться пульти управління електронними нагрівачами. Знизу технологічної камери пристиковано блок тиглів, до складу якого входять чотири мідних водоохолоджуваних тигля і чотири механізми подачі зливків, що випаровуються. Завантаження зливків, що випаровуються, в механізми проводиться зверху через тиглі. Заслінка призначена для екранування виробів під час розігріву матеріалів, що випаровуються, до встановлення стабільного режиму випаровування. Пристрій механізму підвіски і обертання виробу забезпечує зміну швидкості обертання виробу і замір температури у восьми точках виробу (підкладки), на який наноситься покриття.

Замір температури проводиться термопарами, електричний сигнал яких знімається ротокодом. Управління вакуумною системою здійснюється з мнемосхеми шафи управління. На дисплей, розташований на головному пулті, виводиться інформація про стан вакууму в магістралях



*a*



*б*

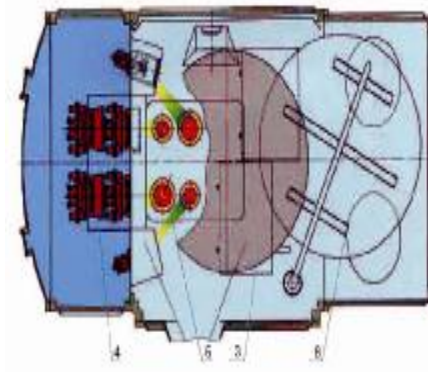
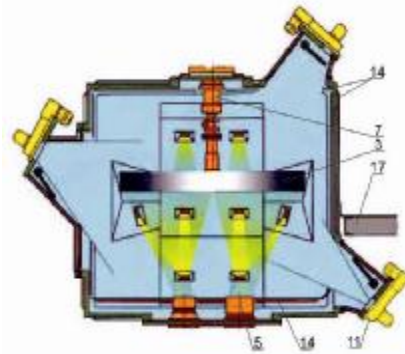


Рис. 2. Розташування основних вузлів установки Л5 (*a*) та схематичне відображення технологічного процесу отримання конденсату (*б*): 1 — технологічна камера; 2 — камера гармат; 3 — підкладка; 4 — електронні гармати; 5 — блок тиглів; 6 — заслінка; 7 — механізм закріплення і обертання виробу; 8 — механізм подачі злиwkів; 9 — вакуумна система; 10 — система охолодження; 11 — оглядова система; 12, 13 — пульт та шафи управління; 14 — екрани; 15 — високовольтний ввід; 16 — маніпулятор.

вакуумної системи, насосах і камерах. Конструкція вакуумної системи забезпечує аварійне закриття затворів високовакуумних насосів при падінні вакууму в камерах нижче 1,33 Па, а також аварійне перекриття трубопроводів при раптовому припиненні подачі електроенергії.

**Таблиця 1. Технічні параметри установки Л5**

Параметр	Величина
Встановлена потужність, кВт	280
Напруга живильної трифазної мережі промислової частоти 50 Гц, В	380
Прискорююча напруга електронних гармат, кВ	20
Кількість і номінальна потужність електронних гармат, кВт	8x60
Діаметр напилюваної підкладки, мм	до 1000
Товщина конденсату, мм	0,1—5
Швидкість конденсації, мкм / хв для металу	до 50 до 5
Кількість тиглів *, шт. діаметром 100 мм діаметром 70 мм	2 2
Довжина зливків, що випаровуються, мм	500
Швидкість подачі зливків, мм / хв	0,28—280
Вантажопідйомність механізму підвіски і обертання виробу, кг, не більше	100
Маса установки (орієнтовно), т	20
Площа, яку займає установка, м <sup>2</sup>	80
Рівень робочого вакууму в технологічній камері, Па	6(10 <sup>-3</sup> —10 <sup>-2</sup> )

\*Тиглі взаємозамінні и можуть бути розташовані в любій послідовності.

Система охолодження служить для розподілу і подачі охолоджуючої води до вузлів і конструкцій установки.

Управління механізмами установки, а також роботою чотирьох електронних нагрівачів, що забезпечують випаровування матеріалів з тиглів, проводиться з пультів, розташованих на передніх дверях камери нанесення покриттів.

Електронний нагрівач являє собою пристрій, призначений для створення спрямованого пучка електронів та управління ім. Всі пристрої можна розділити на два основних вузла: катодний вузол і анодний блок, до складу якого входить електромагнітна система відхилення електронного променя. За допомогою регульованого магнітного поля, створюваного електромагнітом, можна відхилити потік електронів в потрібному напрямку, а також розгорнути по заданій програмі. Матеріали, що випаровуються у вигляді зливків, завантажуються при відкритій передній кришці камери напилення в механізми подачі зливків і опусканням штоків механізмів встановлюються в початкове положення для випаровування. Підкладка за допомогою маніпулятора завантажується в камеру напилення і закріплюється на штоку механізму обертання. Тигельна заслінка розміщується під підкладкою з метою перекриття парового потоку матеріалів з тиглів на час розігріву і виведення режиму випаровування на необхідний рівень. В залежності від прийнятої технології включаються електронні нагрівачі для нагріву підкладки (оснастки) зверху чи знизу. Зливики в тиглях розігріваються і виводяться на режим випаровування чотирма електронними нагрівачами. Після досягнення заданих параметрів напилення на підкладку або заготовки, що покривають (температури підкладки, контрольованої термопарами,

швидкості обертання і струмів променів електронних нагрівачів, які здійснюють випаровування матеріалів з тиглів) відкривається тигельна заслінка і проводиться осадження на підкладку або заготівку, що покривають, відповідно до технологічної інструкції. Після закінчення процесу напилення вимикаються електронні нагрівачі, виріб витримується в камері певний час для охолодження, в камеру напускається атмосферне повітря і проводиться вивантаження виробу.

Найбільше промислове застосування знайшли конденсовані з парової фази КМ систем  $\text{Cu—Zr—Y—Mo}$  та  $\text{Cu—Cr—Zr—Y—Mo}$  для розривних електричних контактів. Матеріали, які отримали, належать до класу МДК, сертифіковані і випускаються згідно з технічними умовами ТУ У 20113410.001-98, ISO-2009. Зазначені матеріали відрізняються досить високою електропровідністю, твердістю, міцністю і задовільною пластичністю (табл. 2). Основні переваги парофазних конденсатів класу МДК полягають в наступному:

- матеріали МДК отримують за один технологічний цикл, тому вони дешевше аналогів, одержуваних методами порошкової металургії, в 1,5—1,7 рази і суттєво (2—3 рази) дешевше срібловмісних контактів;

- за експлуатаційної надійності МДК не поступаються матеріалам на основі срібловмісних композицій;

- підтримують максимальну величину комутаційного струму до 1200 А;

- матеріали МДК добре обробляються різанням, штампуванням, шліфуванням, свердлінням, легко паяються будь-якими з відомих способів пайки з використанням стандартних срібловмісних і припоїв, що не містять срібла.

Найбільш ефективні області застосування МДК:

- міський транспорт (контакти, що використовуються в міських трамваях, тролейбусах, потягах, метро);

- ліфтове господарство (пасажирські й вантажні ліфти);

- портові, корабельні крани та інші підйомно-транспортні механізми;

- електрокари всіх типів;

- гірничо-шахтне устаткування та ін.

Досліджено і рекомендовано для впровадження у виробництво корозійно-стійкий матеріал МДК-3Х, який характеризується в 1,5—2 рази більш високою корозійною стійкістю в порівнянні з матеріалом МДК і має добрі перспективи при використанні у якості контактів гірничо-шахтного устаткування, де вологість досягає більш 80% у присутності агресивних газів  $\text{CO}_2$  і  $\text{SO}_2$  (рис. 3, а).

Досить перспективним є використання матеріалів МДК в якості заміника берилієвої бронзи. На відміну від берилієвої бронзи, КМ марки МДК не втрачають міцності до температури нагріву 900 °С.

Зазначені КМ також можуть бути використані як високоелектропровідні пружинні сплави, сплави, стійкі до радіаційного розпушування, як покриття на дзеркалах силової металооптики та ін. Сучасне електронно-променево обладнання дозволяє виробляти до 15 т на рік конденсованих з парової фази КМ, з яких можна виготовити близько 800 тисяч електричних контактів і електродів різного призначення.

Матеріали системи  $\text{Cu—Zr—Y—Mo—C}$  (МДК-3С) із вмістом вуглецю до 3% (об.) успішно використовуються для виготовлення ковзних

**Таблиця 2. Фізико-хімічні і механічні властивості конденсатів на основі системи Cu—Zr—Y—Mo**

Матеріал	Хімічний склад, % (мас.)	Густина $\gamma$ , кг/м <sup>3</sup>	Питомий електричний опір $\rho$ , мкОм·м	Мікротвердість $HV_{30}$ , МПа	Механічні властивості					
					До відпалу			Після відпалу, 300 °С, 1 год, вакуум		
					$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %
МДК-1	Cu—Zr—Y—3—5Mo	8980—9000	0,021—0,022	1000—1500	210—370	300—430	10,3—7,3	200—360	295—420	17,6—9,5
МДК-2	Cu—Zr—Y—5,1—8Mo	9000—9050	0,022—0,024	1500—1650	380—530	440—630	7,25—3,4	365—510	425—600	9,45—4,9
МДК-3	Cu—Zr—Y—8,1—12Mo	9050—9100	0,024—0,028	1650—1800	550—750	635—785	3,25—1,8	520—695	605—730	4,85—3,9
МДК-3Х	Cu—Cr—Zr—Y—8,1—12Mo	9050—9100	0,026—0,030	1650—1800	560—760	641—792	3,21—1,7	531—699	618—742	4,70—3,6

контактів (рис. 3, б). Їх експериментальна та промислова апробація здійснена Вроцлавським політехнічним інститутом (Польща). По довговічності зазначені контакти перевершують контакти на основі вуглецевих матеріалів приблизно в 12—24 рази.

Композиційні матеріали на основі міді та вольфраму традиційно використовуються в якості сільнострумових електричних контактів масляних, елегазових вимикачів, а останнім часом вони знайшли застосування в деяких типах вакуумних пристроїв. Альтернативою порошковим матеріалами служать парофазні композити W—Cu. Ці матеріали вже знайшли промислове застосування для виготовлення контактів деяких масляних вимикачів.

В рамках співпраці науково-виробничого підприємства "Елтехмаш" (м. Вінниця), Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України (м. Київ), Київського національного університету будівництва і архітектури та Вроцлавського технологічного університету (Польща) були випробувані парофазні конденсати із вмістом вольфраму 32—52% (мас.). З цих матеріалів виготовлено дугогасні контакти для вакуумної дугогасильної камери МВК-400 (виробництво Китай), яка є конструкційною частиною переривника низької напруги на 1000 В, 400 А,

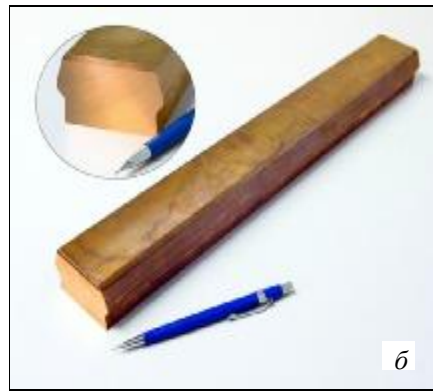
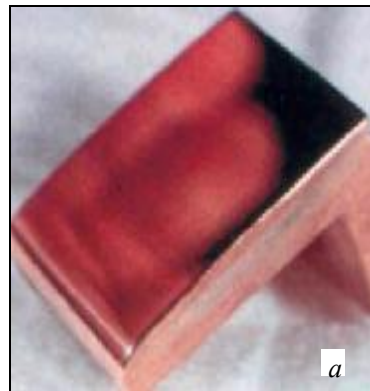


Рис. 3. Загальний вигляд розривних (а) та ковзних (б) контактів, виготовлених відповідно з МДК-3 та МДК-3С.



Рис. 4. Електроди для зварювання живих тканин.



Рис. 5. Загальний вигляд електродів для контактного зварювання.



Рис. 6. Мундштуки надзвукового електродугового металізатора.

50 Гц і використовується в основному у вугільних шахтах. Всі вакуумні камери успішно пройшли випробування.

Освоєно також виробництво електродів з матеріалу МДК-3 для зварювання живих тканин та для контактного зварювання (рис. 4, 5). Налагоджено промисловий випуск мундштуків надзвукового електродугового металізатора (рис. 6). Мундштуки, виготовлені з матеріалу МДК-3, дозволили підвищити ресурс роботи металізатора в 2—3 рази в порівнянні з аналогічними

деталлями, виготовленими з мідно-вольфрамового конденсату. Застосування КМ МДК-3 дозволяє також вирішити проблему ремонту мундштуків, що приводить до значної економії міді.

Високошвидкісне випаровування-конденсація є абсолютно екологічно чистим методом отримання КМ, оскільки при виробництві матеріалів не відбувається ніяких шкідливих викидів у навколишнє середовище.

1. *Технология тонких пленок*: (Справ. в 2-х т.) / Под ред. Л. Мойсела и З. Гленга. — М. : Сов. радио, 1977.
2. *Bunshah R. F. Vacuum evaporation — history recent developments and application // Zeitschrift fur Metalkunde.* — 1984. — **75**, No. 11. — P. 840—846.
3. *Мовчан Б. А. Электронно-лучевая плавка и испарение в современной металлургии и машиностроении // Сварка и специальная электроталлургия.* — Киев : Наук. думка, 1984. — 264 с.



**Усовершенствование электронно-лучевой установки  
для получения конденсированных из паровой фазы  
электроконтактных материалов с улучшенными  
эксплуатационными характеристиками**

Н. И. Гречанюк, И. Н. Гречанюк, Е. В. Хоменко, В. Г. Затовский

*Представлены результаты усовершенствования промышленного оборудования для получения методом высокоскоростного испарения-конденсации в вакууме композиционных материалов электротехнического назначения на основе меди и металлов VIa группы. Рассмотрены основные характеристики парофазных конденсатов и перспективы их применения в качестве электрических контактов различного назначения.*

**Ключевые слова:** *высокоскоростное испарение-конденсация, композиционные материалы, физико-химические свойства, электрические контакты.*

**Improvement of the electron beam installation for condensed  
vapor electric contact materials with improved technical  
performance**

N. I. Grechanyuk, I. N. Grechanyuk, O. V. Khomenko, V. G. Zatovskii

*Results improvement of industrial equipment for high-speed method of evaporation-condensation in the vacuum of composite materials for electrical purposes based on copper and metals VI a group represented. The main characteristics of vapor phase condensate and prospects of their use as electrical contacts for different purposes are considered.*

**Keywords:** *high-speed evaporation-condensation, composite materials, physical and chemical properties, electrical contacts.*