

© 2013 Гречанюк В.Г.

Київський національний університет будівництва і архітектури

КОРОЗИЄСТІЙКІ КОМПОЗИЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ НА ОСНОВІ МІДІ Й ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВЕ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЇХ СТВОРЕННЯ

Вивчені структурні особливості і властивості конденсованих композиційних матеріалів на основі міді, вольфраму, молібдену і хрому. Встановлено, що характерною особливістю цих конденсованих матеріалів є шарувата структура з ієрархією шарів на макро-, мікро- і субмікрорівнях. Для конденсованих матеріалів на основі міді та хрому відзначені утворення і розпад пересичених твердих розчинів на основі хрому. Наведено приклади практичного застосування конденсованих з парової фази композиційних матеріалів мідь-молібден, мідь-вольфрам, мідь-хром для виготовлення електричних контактів.

Ключові слова: електронно-променевого випаровування-конденсація, обладнання, технологія, структура, властивості, використання.

Традиційними методиками створення композиційних матеріалів (КМ) для електричних контактів є методи порошкової металургії [1–7]. Однак останнім часом широке застосування знайшов електронно-променевий метод випаровування-конденсації матеріалів у вакуумі. Перша згадка про цей метод належить до початку 70-х років ХХ ст. [8]. Електронний промінь має найбільший коефіцієнт поглинання енергії порівняно з іншими відомими концентрованими потоками енергії, такими як лазер і плазма, у зв'язку з чим його ефективність при металообробці найбільша. Електронно-променевого високошвидкісного випаровування з наступною конденсацією у вакуумі використовується для виготовлення тонких (до 5 мкм) плівок для радіотехніки, мікроелектроніки, обчислювальної техніки тощо [9]. Товсті плівки (більше 5 мкм), створені цим методом, використовуються як захисні і зносостійкі покриття [10–15]. Осаджені у вакуумі покриття за рівнем зносостійкості і температурної стабільності значно перевершують відповідні гальванічні.

Незважаючи на широкий вибір матеріалів для електричних контактів різного призначення, проблема виробництва високонадійних електричних контактів так до кінця і не розв'язана, оскільки вимоги, до матеріалу контактів, залежать від типу комутаційного апарату і змінюються в міру його вдосконалення та заміни новим. Задовольнити ці вимоги можуть матеріали, що характеризуються оптимізованою структурою і відповідним комплексом властивостей, які забезпечують формування в робочому шарі вторинної структури з підвищеними електроеро-

зійною і корозійною стійкістю, терміном служби і надійністю контактів.

Для підвищення ерозійної стійкості електричних контактів комутаційних апаратів перспективно видається розробка багатокомпонентних покриттів із сплавів на основі міді, легованих оловом, хромом, алюмінієм, оксидом алюмінію, нікелем тощо, отриманих методом електронно-променевого випаровування-конденсації в вакуумі [16;17]. Процеси випаровування і конденсації дозволяють конструювати матеріал на атомно-молекулярному рівні. У зв'язку з цим значний науковий і практичний інтерес має використання високошвидкісного електронно-променевого випаровування та подальшої конденсації металів і неметалів у вакуумі для виробництва масивних конденсованих КМ для електричних контактів. Лабораторні зразки товщиною 1–2 мм дисперсно-зміцненого і мікрошаруватого типів матеріалів з 1970-х років досліджуються в Інституті електрозварювання НАН України [18], в Київському національному університеті будівництва і архітектури [19], в Королівському авіаційному науково-дослідному інституті Міністерства оборони Великої Британії [20] і в ряді інших науково-дослідних лабораторій. Однак про серійний випуск подібних матеріалів досі нічого невідомо.

Перш ніж приступити до розробки електронно-променевої технології виготовлення КМ для електричних контактів, необхідно реалізувати ряд прикладних і наукових завдань, одним з яких є економічна доцільність. За вартістю електроконтактні матеріали, створені випаровуванням і наступною конденсацією у вакуумі, мають бути

порівнянні з подібними матеріалами, що виготовляються методами порошкової металургії. Найбільший інтерес викликає розробка й використання для електричних контактів КМ, які не містять дорогоцінних металів. За експлуатаційною надійністю конденсовані електроконтактні матеріали не повинні поступатися спеченим порошковим композиціям. Для цього необхідно вирішити питання вибору складів і структури матеріалів електричних контактів, оптимізації їх фізико-механічних характеристик, розробки технологічних умов і створення промислової технології виготовлення КМ. Матеріали, отримані методами порошкової металургії без дорогоцінних металів, досить широко використовуються у виробництві контактів комутаційних апаратів. Порошкові КМ таких контактів містять 20–80 % (мас.) тугоплавких компонентів, а як легкоплавку складову використовують мідь. Технологічними добавками можуть бути нікель і кобальт, функціональними – деякі оксиди, бор та інші елементи і хімічні сполуки. У промисловості в основному застосовують КМ з вмістом вольфраму до 32,98 % (мас.) і молібдену до 12 % (мас) [3–21].

Експериментальна частина

Вихідними матеріалами для виготовлення конденсованих з парової фази КМ служили зливки міді \varnothing 98,5 мм і довжиною 500 мм, зливки молібдену і вольфраму \varnothing 68,5 мм і довжиною 500 мм після електронно-променевого переплаву. Зливки хрому \varnothing 68,5 мм і довжиною 300 мм отримані індукційним переплавом в секційному кристалізаторі електролітичного хрому в середовищі очищеного аргону. Чистота всіх вихідних матеріалів, що випаровувалися, була не нижче 99,9 %. Для виробництва електроконтактних матеріалів, конденсованих з парової фази, використовували промислову електронно-променеву установку, розроблену науково-виробничим підприємством "Елтехмаш" (м. Вінниця, Україна) (рис. 1).

Установка являє собою складний агрегат, що містить робочу камеру 1, камери гармат 2, системи живлення, управління, забезпечення вакууму (рис.2). У нижній частині робочої камери розташовані чотири механізми 8 з мідними водоохолоджувальними тиглями, два з яких діаметром 100 мм, два інших – 70 мм. Довжина штоків нижніх механізмів така, що дозволяє розміщувати в тиглях зливки довжиною до 800 мм. До бічної частини робочої



Рис.1. Загальний вигляд промислової електронно-променевої установки ЛЛ-5

камери 1 пристикована камера гармат 2. Чотири електронно-променеві гармати, розташовані зверху і знизу, призначені безпосередньо для підігріву підкладки, інші чотири – для випаровування вихідних матеріалів.

Технологічний процес осадження композиційних матеріалів проводили так. Підкладку 3, виконану у вигляді диска діаметром 1000 мм, закріплювали на механізмі підвіски й обертання виробу 7. Поверхню підкладки, на яку здійснювалася конденсація, обробляли до 9–10-го класу чистоти. Для легкого відділення сконденсованого матеріалу від підкладки на останню попередньо осаджували тонкий (10–15 мкм) розділовий шар з кальцій фториду CaF_2 . У два з чотирьох мідних водоохолоджуваних тиглі 5 діаметром 100 мм поміщали зливки міді з сумарним вмістом легуючих добавок цирконію й ітрію (до 0,1 % мас.), які вводяться для прискорення процесу випаровування. У два інших тиглі, діаметром 70 мм, поміщали зливки молібдену (вольфраму або хрому) для одержання композиційних матеріалів Cu-Mo, Cu-W, Cu-Cr, що використовуються для розривних, ковзаючих, вакуумних контактів. Блок камер вакуумували. Після досягнення глибини вакууму $(1,3-4) \cdot 10^{-2}$ Па включали електронно-променеві гармати. За їх допомогою підкладка, на яку здійснювалася конденсація пари, нагрівалася до температури 700 ± 20 °С. Паралельно прогрівали поверхню вихідних зливок, доводячи їх до розплавлення й випаровування. Тривалість технологічного процесу одержання листових заготовок КМ товщиною 2–4 мм і діаметром 1000 мм у залежності від необхідної товщини заготовки становить 3–5 годин. Конденсат відділяється від підкладки, рубається на заготовки, які

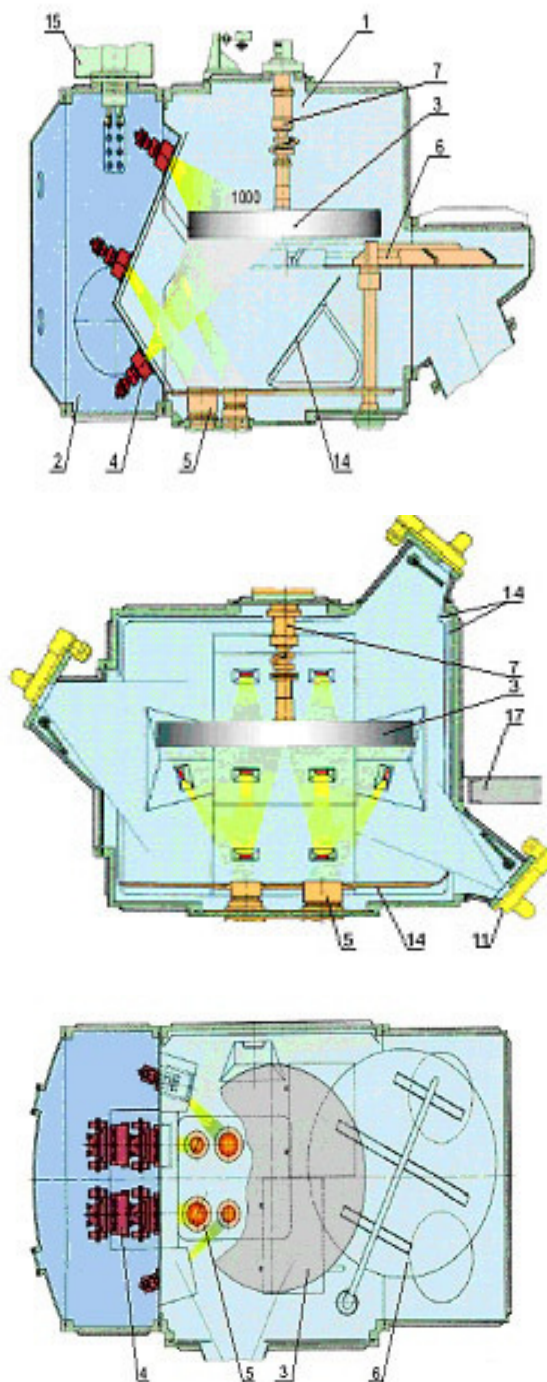


Рис. 2. Схема промислової електронно-променевої установки Л-5 для виготовлення матеріалів і сплавів: 1 – робоча камера, 2 – камера гармат, 3 – виріб; 4 – електронні гармати, 5 – блок тиглів; 6 – заслінка, 7 – механізм підвіски і обертання виробу, 8 – механізми подачі зливків; 9 – вакуумна система; 10 – система охолодження; 11 – оглядова система; 12 – пульт управління, 13 – шафи управління; 14 – екрани; 15 – високовольне введення; 16 – маніпулятор, 17 – майданчик обслуговування

потім напаяють на контактотримачі або заготівки електродів для контактного зварювання.

Технічні характеристики електронно-променевої установки Л-5 наведені в табл. 1.

Найбільше промислове застосування мають конденсовані з парової фази КМ системи Cu-Mo, що отримали назву МДК, для розривних і ковзаючих електричних контактів [22]. Матеріали МДК, сертифіковані й випускаються відповідно до технічних умов ТУ У 20113410.001-98 України. Фізико-механічні властивості конденсованих матеріалів Cu-Mo свідчать, що зазначені матеріали відрізняються достатньо високою твердістю, міцністю, електропровідністю і задовільною пластичністю (табл. 2).

Визначальний вплив на властивості й експлуатаційні характеристики матеріалів електричних контактів має структурний фактор вихідних матеріалів. Так, підвищення дисперсності КМ у системах Ag-Me, Ag-MeO збільшує електроерозійну стійкість слабко-струмових і середньонавантажених контактів з цих матеріалів [23].

У зв'язку із зазначеним, поверхня конденсатів і перетини зразків паралельні й перпендикулярні парового потоку, злами матеріалу (після механічних випробувань), а також поверхня і перетини контактів комутаційних апаратів (після стендових і натурних випробувань) піддавалися мікроструктурним дослідженням. Встановлено вплив шорсткості поверхні підкладки на морфологію поверхні й особливості структури конденсату в його перетинах. Для мідно-молібденовому конденсату властива шаруватість з ієрархією макро-, мікро- і субмікрорівнів і різною структурою шарів. При цьому для шарів, збагачених міддю, характерна переважно ізотропна структура, що складається з розорієнтованих полігональних зерен (рис. 3, а) або з частинок сфероїдальної і чечевицеподібної форм, диспергованих у матриці на основі міді (рис. 3, б). Для шарів, збагачених молібденом, характерна анізотропна (стовбчаста) структура (рис. 3, в). Структура і хімічний склад узгоджуються з особливостями зміни фізико-механічних властивостей. Збільшенню вмісту молібдену і підвищенню ролі стовбчастої структури відповідає зростання міцності і твердості, але зниження пластичності. Комутаційні випробування показали, що в такому градієнтному матеріалі зміни

Таблиця 1

Технічні характеристики промислової електронно-променевої установки Л-5

№ п/п	Параметр	Величина
1	Встановлена потужність, кВт	480
2	Напруга живильної трифазної мережі промислової частоти 50 Гц, В	380
3	Прискорююча напруга електронних гармат, кВ	20
4	Кількість електронних гармат, шт.	8
5	Номінальна потужність електронних гармат, кВт	60
6	Діаметр підкладки, на яку здійснюється напилення, мм	до 1000
7	Товщина конденсату, мм	0,1–5
8	Швидкість конденсації, мкм/хв для металу для кераміки	до 50 до 5
9	Кількість тиглів* діаметром 100 мм, шт. Кількість тиглів діаметром 70 мм, шт.	2 2
10	Довжина зливків, що випаровуються, мм	500
11	Швидкість подачі зливків, мм/хв.	0,28–280
12	Вантажопідйомність механізму підвіски і обертання виробу, кг, не більше	100
13	Маса установки (орієнтовно), т	20
14	Площа, яку займає установка, м ²	80
15	Рівень робочого вакууму в технологічній камері, Па	$6 \cdot (10^{-3} - 10^{-2})$
16	Тиск охолоджувальної води, Па	$(3-4) \cdot 10^5$
17	Витрата охолоджуючої води (при $t = 15$ °С), м ³ /год.	12

** Тиглі взаємозамінні й можуть бути розташовані в будь-якій послідовності.

Таблиця 2

Фізико-хімічні та механічні властивості КМ Cu-Zr-Y-Mo

Хімічний склад матеріалів, % (мас.)	Комутуючий струм, А	Питомий електричний опір ρ , мкОм·м	Мікротвердість H_v , МПа мю	Механічні властивості			
				до відпалу		після відпалу, 900 °С, 1 година	
				σ_b , МПа	δ , %	σ_b , МПа	δ , %
Cu–3–5 %Mo	До 100	0,021–0,022	1000–1500	300–430	10,3–7,3	295–420	17,6–9,5
Cu–6–8 %Mo	До 500	0,022–0,024	1500–1650	440–630	7,25–3,4	425–600	9,45–4,9
Cu–9–12 %Mo	До 1200	0,024–0,028	1650–1800	635–785	3,25–1,8	605–730	4,85–3,9
AgCdO 15, "CI Rau", Germany	до 250	0,024–0,026	1150–1200	–	–	–	–

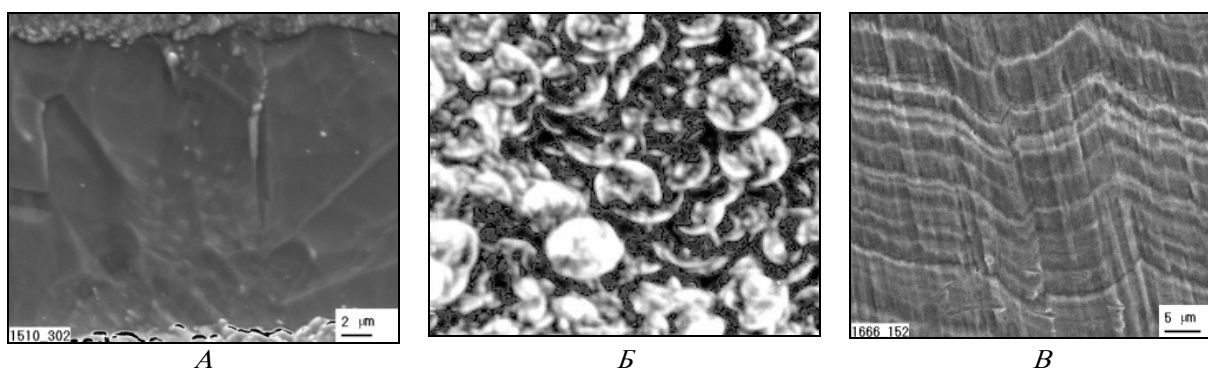


Рис. 3. Структура композиційних матеріалів Cu-Mo

хімічного складу шарів можуть обмежувати зону термічного впливу розряду.

У контактах, виготовлених з парофазних конденсатів, у ряді типів комутаційних апаратів спостерігаються менші обсяги вторинної структури, що відповідає підвищенню стійкості в порівнянні з порошковими контактами (рис. 4).

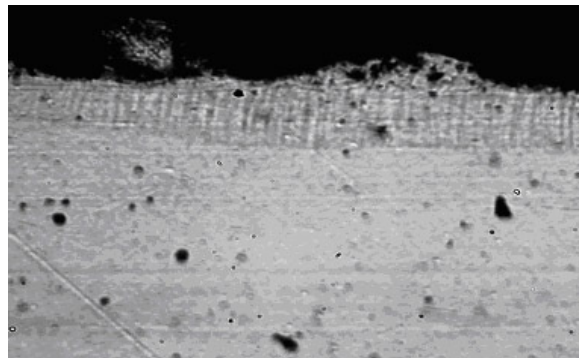


Рис. 4. Типова структура зовнішнього шару матеріалу Cu-8,1-12 %Mo після комутаційних випробувань (x150)

При використанні контактів з матеріалів у системі W-Cu продуктами окиснення найчастіше є оксиди WO_3 та Cu_2O [7,24]. Їх питомий електричний опір змінюється в досить широких межах: для WO_3 – від 1 (при сильному відхиленні) до $1 \cdot 10^{-12}$ Ом / см (при стехіометричному складі), для Cu_2O – відповідно від $1 \cdot 10$ до $1 \cdot 10^{-8}$ Ом / м. При комутації струму на повітрі утворення оксидів спостерігаються і в робочому шарі контактів з псевдосплавів Mo-Cu. Молибден і мідь розчиняються обмежено [25], тоді як їх оксиди взаємодіють і утворюють стійкі сполуки $CuMoO_4$, $Cu_3Mo_2O_9$ та інші [26; 27]. При температурі вище $700^\circ C$ виникає легкоплавка евтектика в системі MoO_3 - Cu_2O . Встановлено, що оксидна плівка, що має склад евтектики в цій системі, легко розтікається по поверхні контакту, заповнюючи нерівності [26; 27]. Відшаровуючись після кристалізації від поверхні контакту через слабку адгезію, плівка сприяє ефекту "самоочищення" і зниження рівня перехідного опору контактної пари [21].

Найбільш ефективні області застосування КМ Cu-Mo: міський транспорт (трамваї, тролейбуси, потяги, метрополітен); ліфтове господарство (пасажирські й вантажні ліфти); портові, корабельні крани та інші підйомно-транспортні механізми; електрокари всіх типів; гірничо-шахтне обладнання, промислові та побутові електротехнічні пристрої, що

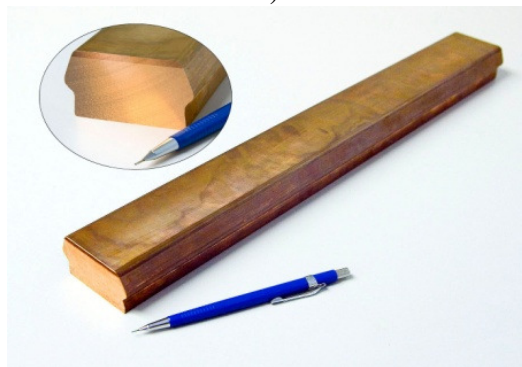
містять реле, пускачі, контактори, рубильники тощо; міжміський електротранспорт (електровози, тепловози). На сьогодні вироблено понад 15 т електричних контактів із матеріалів МДК, з яких виготовлено понад 1,5 млн. шт. електричних контактів 376 типорозмірів відповідно до технічних умов ТУ У 31.20113410-003-2002.

Загальний вид розривних контактів зображений на рис 5, а. Композиційні матеріали МДК успішно використовують для виготовлення ковзних контактів (рис. 5, б) [28; 29]. Їх експериментальна і промислова апробація здійснена Вроцлавським політехнічним інститутом і Люблинським мідно-рудним підприємством (Польща). За довговічністю зазначені контакти перевищують контакти на основі карбоновмісних матеріалів приблизно у 8–12 разів.

Композиційні матеріали на основі вольфраму і міді, що виготовляють методами порошкової металургії, традиційно використовують як потужнострумові електричні контакти масляних, маломасляних, елегазових вимикачів, а останнім часом і деяких типів вакуумних. Альтернативою порошковим матеріалами в останньому випадку можуть служити парофазні –мідно-вольфрамові композити.



а)



б)

Рис. 5. Загальний вигляд контактів: розривних (а) і ковзаючого (б), виготовлених із матеріалу Cu-Mo

Проведено дослідження композиційних матеріалів системи Cu-W в інтервалі концентрації вольфраму до 32,98 % (мас.). При вивченні Cu-W композицій встановлено, що у процесі конденсації на нерухомому підкладку формується градієнтний шаруватий матеріал, для якого характерна ієрархія шарів з різноманітною структурою.

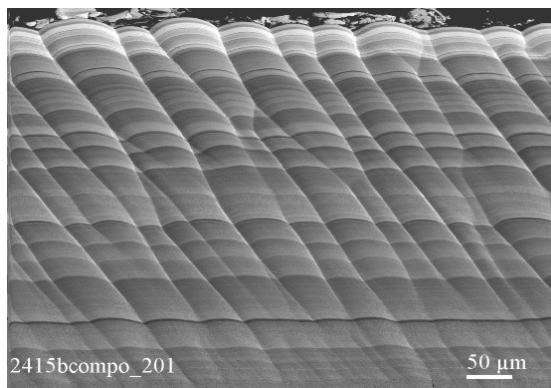


Рис. 6. Типова структура конденсованих з парової фази КМ Cu-W із вмістом вольфраму 32,98 % (мас.)

При вмісті вольфраму 32,98 % (мас.) у шарах переважає стовпчаста структура, яка нерідко поєднує шари не тільки різних ієрархічних рівнів, а й усю товщину конденсату (рис. 6). Діаметр стовпців не перевищує 100 мкм. Матеріал стовпців є композиційним з розміром частинок вольфраму в матриці на основі міді менше 1 мкм. Отже, парофазний конденсат на основі міді й вольфраму шаруватий, градієнтний з реалізацією ефекту дисперсного зміцнення. Зміна механічних властивостей конденсованого мідно-вольфрамового матеріалу у вихідному і відпаленому станах при випробуванні на розтяг у залежності від вмісту вольфраму показала, що з підвищенням концентрацій вольфраму до 32,98 % (мас.) спостерігається збільшення значень границі міцності у вихідному стані від 346 до 676 МПа, після відпалу – від 342 до 568 МПа, границі плинності – від 221 до 644 МПа у вихідному стані та після відпалу – від 235 до 518 МПа. Ці залежності зростають пропорційно процентному вмісту вольфраму як для зразків у вихідному стані, так і для зразків після відпалу. При цьому відносне подовження зразків за концентрації вольфраму ~32,98 % (мас.) знижується від 29,3 % до 0,7 % у вихідному стані та від 30,2 % до 2,2 % – після відпалу.

Для електричних контактів вакуумних дугогасних камер застосовують матеріали Cu-

Cr із вмістом хрому 35–50 % (мас.). Можливість використання конденсованих КМ у цій системі зумовлена особливостями хімічного складу і морфології вторинної структури, що утворюється на робочій поверхні порошкових контактів уже при тренуванні вакуумних дугогасних камер. У нерівноважних умовах впливу дугового розряду в робочому шарі збільшується взаємна розчинність міді та хрому і відбувається розпад твердих розчинів з формуванням дисперсної структури. Таке саме явище спостерігається в конденсованих матеріалах на основі міді та хрому. Конденсати Cu-Cr у початковому стані вмісту хрому 35–50 % мають шарувату структуру з ієрархією розмірів шарів: наявні шари макро-, мікро- і субмікрорівней. Останні два рівні об'єднуються анізотропією нормального росту, сприяючи формуванню стовпчастою в межах кількох шарів конденсату (рис. 7). Широка концентраційна область існування стовпчастої структури дозволяє зробити припущення про єдину природу масопереносу в цій області й нерівноважний характер матеріалу конденсату.

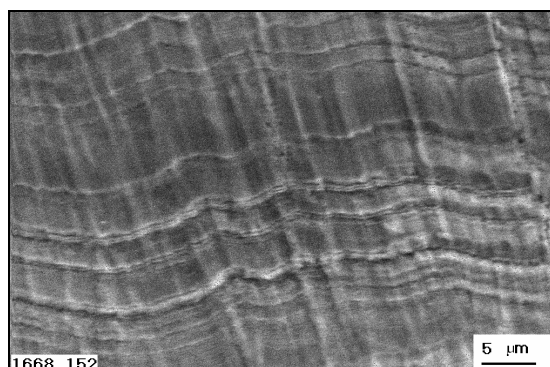
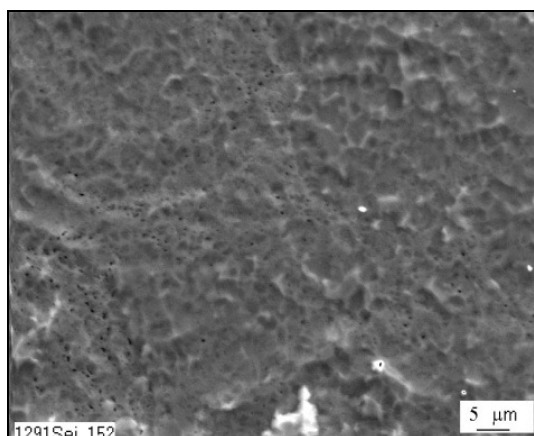


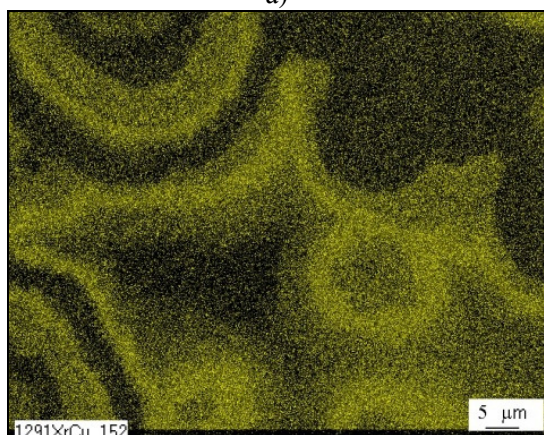
Рис. 7. Типова структура конденсованого з парової фази КМ Cu-Zr-Y-Cr із вмістом хрому 35–50 % (мас.)

Дійсно, під впливом температури і часу в перетині шару, перпендикулярному стовпцям, утворюється зерниста, полігональна структура (рис. 8, а) з ознаками розпаду пересиченого твердого розчину (рис. 8, б).

Вимірювання твердості за Віккерсом у залежності від вмісту хрому показали її лінійний характер у межах концентрації 0–70 % (мас.). За концентрації 35–50 % Cr твердість змінюється в межах 2069–2503 МПа. Під час випробування на розтяг границя міцності збільшується до 550 МПа за вмісту хрому 40 % (мас.), пластичність при цьому



а)



б)

Рис. 8. Особливості структури КМ Cu-Cr з вмістом хрому 35–50 % (мас.): а – зерниста полігональна структура виявлена у вторинних електронних променях; б - ознаки розпаду пересиченого твердого розчину; зображення в рентгенівських променях міді

зменшується. Вивчено структурні особливості руйнування під час випробування на розтяг. Встановлено, що основним типом руйнування є інтеркристалітне. Його роль зростає зі збільшенням вмісту хрому і кількості джерел руйнування (надрізів на поверхні зразків, дефектів на межах розподілу в матеріалі, зумовлених наявністю домішок у ньому). Композиційні матеріали Cu-W і Cu-Cr використовують для виготовлення контактів дугогасних камер [30]. Проведено промислову апробацію технології виготовлення комбінованих контактів з конденсованих матеріалів на основі міді й вольфраму (хрому) на підприємстві "Елтехмаш" (Україна). Вроцлавським технічним університетом (Польща) здійснено апробування комутаційної стійкості таких контактів і отримані позитивні результати. Загальний вид контактів для дугогасних камер зображено на рис. 9.



Рис. 9. Загальний вигляд контактів для дугогасних камер

Висновки

Отже, наведені дані свідчать про можливість широкого застосування електронно-променевого методу випаровування-конденсації для створення КМ для електричних контактів різного призначення. Зазначений метод дозволяє конструювати матеріал на атомно-молекулярному рівні із заданою дисперсністю і розподілом фаз по його товщині. Електронно-променева технологія абсолютно екологічно чиста, оскільки під час виробництва матеріалів не відбувається ніяких шкідливих викидів у навколишнє середовище. Композиційні матеріали, виготовлені методом електронно-променевого випаровування-конденсації, мають такі переваги: їх створюють за один технологічний цикл, вони в 1,5–1,7 рази дешевші від аналогів, сформованих методами порошкової металургії, й майже в 4 рази дешевше від срібловмісних контактів. За експлуатаційною надійністю парофазні композити не поступаються матеріалам на основі срібловмісних композицій, витримують максимальну величину комутаційного струму до 1200 А, добре обробляються різанням, штампуванням, шліфуванням, свердлінням, легко паяються будь-якими відомими способами пайки з використанням стандартних припоїв. Сучасне електронно-променеве обладнання дозволяє виробити щорічно до 15 т конденсованих композиційних матеріалів, з яких можна виготовити близько 1,5 млн. шт. електричних контактів 376 типорозмірів відповідно до технічних умов ТУ У 31.20113410-003-2002.

Список літератури

1. Францевич И. Н. Электрические контакты, получаемые методом порошковой металлургии / И.Н.Францевич // Порошковая металлургия. – 1980. – № 8. – С. 36–47.
2. Раховский В. И. Разрывные контакты электрических аппаратов / В.И. Раховский, Г.В. Левченко, О.К. Теодорович – М.: Металлургия, 1966. – 295 с.
3. Денесенко В.О. Структура і фізико-хімічні властивості композиційних матеріалів на основі міді та вольфраму, отриманих методом електронно-променевого випаровування / В.О. Денесенко, Р.В. Мінакова, В.Г. Гречанюк [та ін.] // Науковий вісник Чернівецького університету. – 2008. – Вип. 422. – С. 26–33.
4. Минакова Р. В. Композиционные материалы для контактов и электродов / Р.В. Минакова, М.Л. Грекова, А.П. Кресанова [и др.] // Порошковая металлургия. – 1995. – № 7/8. – С. 32–52.
5. Тучинский Л. И. Композиционные материалы, получаемые методом пропитки / Л.И. Тучинский – М.: Металлургия, 1998. – 206 с.
6. Композиционные материалы : (справ.) / под ред. Д. М. Карпиноса. – К. : Наук. думка, 1985. – 591 с.
7. Материалы в приборостроении и автоматике: (справ.) / под ред. Ю. М. Пятина. – М. : Машиностроение, 1982. – 527 с.
8. Зуев И. В. Обработка материалов концентрированными потоками энергии / И.В. Зуев – М. : МЭИ, 1998. – 162 с.
9. Технология тонких пленок: (справ.) / под ред. Л. Майселла и З. Гленга. – М. : Сов. радио, 1997. – Т. 1.– 662 с. – Т. 2. – 764 с.
10. Ройх И. Л. Защитные вакуумные покрытия на стали / И.Л. Ройх., Л.Н. Колтунова – М.: Машиностроение, 1997. – 297 с.
11. Самсонов Г. В. Тугоплавкие покрытия / Г.В. Самсонов, А.П. Эпик – М. : Металлургия, 1973. – 398 с.
12. Шиллер З. Электронно-лучевая технология / З. Шиллер., Г Гайзиг, З Панцер – М. : Энергия, 1980. – 528 с.
13. Мовчан Б. А. Жаростойкие покрытия, осаждаемые в вакууме / Б.А. Мовчан, И.С. Малашенко – К.: Наук. думка, 1983. – 230 с.
14. Повышение качества поверхности и планирование металлов: (справ.) / под ред. А. Кушнера. – М. : Металлургия, 1984. – 376 с.
15. Bunshah R. F. Vacuum epeporation – history Recent developments and application / R.F. Bunshah // Zeitschrijt jur Metallkunde. – 1984. – 75, No. 11. – P. 840–846.
16. Косторжицкий А. И. Многокомпонентные вакуумные покрытия / А.И. Косторжицкий, О.В. Лебединский – М. : Машиностроение, 1987. – 207 с.
17. Ильинский А. И. Структура и прочность слоистых и дисперсно-упрочненных пленок / А.И. Ильинский – М. : Металлургия, 1986. – 140 с.
18. Мовчан Б. А., Гречанюк Н. И. Новые материалы и покрытия, получаемые по электронно-лучевым технологиям / Б.А. Мовчан, Н.И. Гречанюк : Сб. трудов ЭЛТ-88 (31 мая–4 июня 1988 г., Варна, Болгария). – Варна, 1988. – С. 1005–1023.
19. Гречанюк В.Г. Структура и коррозионная стойкость композиционных материалов на основе меди и молибдена, полученных методом электронно-лучевой технологи / В.Г. Гречанюк, В.А. Денисенко // Современная электрометаллургия. – 2008. – № 4. – С.27–29.
20. Фаткуллин О. Х. Новые конструкционные порошковые материалы и их применение / О.Х. Фаткуллин // Итоги науки и техники. Порошковая металлургия. – М. : ВИНТИ, 1991. – Т. 5. – С. 140–177.
21. Гречанюк В.Г. Коррозионная стойкость композиционных материалов медь-молибден для электрических контактов / В.Г. Гречанюк, В.А. Денисенко, И.Ф. Руденко [и др.] // Электрические контакты и электроды. – К.: Ин-т пробл. Материаловедения НАН Украины, 2008. – С.130–133.
22. Гречанюк В.Г. Структура і корозійні властивості композиційних матеріалів (Cu-Y-Zr)-Mo в дистильованій воді / В.Г. Гречанюк // Современная электрометаллургия. – 2011. – Вип. 555. – С. 35–39.
23. Leis P. Der einjklus des kontaktmaterials auf die austildundvon plasmastrahlen / P. Leis, K. Schuster // Elekctric. – 1979. – 33, No. 10. – S. 514–516, 559.
24. Slade P. E. Arc erosion oj tungsten based contact materials. A review / P.E. Slade // Internat. J. of Refractory and Hard Metals. – 1986. – 5, No. 4. – P. 208–214.
25. Двойные многокомпонентные системы на основе меди / под ред. Н. Х. Абрикосова. – М. : Наука, 1979. – 35 с.
26. Mackey T. Subsolidns phase diadram of

- Cu₂O–CuO–MoO system / T. Mackey, I. Ziolkowski // J. Solid. Stat. Chem. – 1980. – No. 31. – P. 135–143.
27. Mackey T. Phase relation in the cupric molybdates – cuprous molybdates system / T. Mackey, I. Ziolkowski // Ibid. – 1990. – P. 145–151.
28. Miedzinski B. Performance of copper-molybdenum contacts when used for inductive DC load / B. Miedzinski, G. Wisniewski, V.N. Shoffa, N.I. Grechanyuk N. I. // Электрические контакты и электроды. – К.: Ин-т пробл. материаловедения НАН Украины, 2004. – С. 19–23.
29. Miedzinski B. Erosion of copper-molybdenum composition under DC load of a small power / B. Miedzinski G. Wisniewski, A. Godzinski [et al.]// Там же. – С. 23–28.
30. Пат. 86434 України. Композиційний матеріал для електричних контактів і електродів та спосіб його отримання / М. І. Гречанюк, І. М. Гречанюк, В. О. Денисенко, В. Г. Гречанюк. – Опубл. 27.04.2009 р.

Summary

V. G. Grechanyuk

KORROSIVE-RESISTANT COMPOSITE MATERIALS BASED ON COPPER AND ELECTRON-BEAM EQUIPMENT TO OBTAIN THEM

The structural characteristics and properties of condensed composite materials based on copper, tungsten, molybdenum and chromium were studied. It has been established that a characteristic feature of these condensed materials are layered structure with a hierarchy of layers at the macro, micro and submikrourovnyah. For condensed materials based on copper and chromium the formation and decay of supersaturated solid solutions based on chromium are outlined. Examples of practical applications of condensed vapor phase composite materials copper-molybdenum, copper-tungsten, copper-chromium for the manufacture of electrical contacts have shown.

Key words: electron-beam evaporation-condensation, equipment, technology, structure, properties, application.