

Сучасні порошкові композиційні матеріали для комутаційної та зварювальної техніки

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

Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН
України, Київ, e-mail: helenhommer@gmail.com

Розглянуто основні галузі застосування порошкових композиційних матеріалів металоматричного типу на основі міді та срібла з тугоплавким наповнювачем в комутаційній та зварювальній техніці. Надано технологічні схеми виробництва, регламентовані характеристики та мікроструктури цих матеріалів.

Ключові слова: порошкові композиційні матеріали на основі срібла, порошкові композиційні матеріали на основі міді, комутаційна та зварювальна техніка.

Наразі важко уявити галузь техніки, де не використовують композиційні матеріали (КМ). Широке їх застосування зумовлено високим рівнем експлуатаційних властивостей, що значно перевищує такий для металів та сплавів, поєднанням високої міцності та жорсткості, опору втомному руйнуванню з жаростійкістю та зносостійкістю [1—3].

В комутаційній та зварювальній техніці найбільше поширення отримали порошкові КМ металоматричного типу на основі міді та срібла, зміцнені частинками тугоплавких металів та хімічних сполук. Завдяки унікальним поєднанням властивостей металоматричні КМ використовують як контакти та електроди, що працюють в умовах сукупного поєднання високих температур, механічних напружень, ударних навантажень, у різних газових середовищах. Матриця забезпечує високий рівень тепло- та електропровідності, а тугоплавка фаза — високу твердість, ерозійну, механічну та термічну стійкість. Такі системи відносять до типу псевдосплавів, які отримують переважно методом порошкової металургії. Поняття "псевдосплав" зазвичай заведено розуміти як гетерогенну систему, що представлена компонентами, які не взаємодіють або слабо взаємодіють один з одним у широкому інтервалі температур, зберігаючи, таким чином, у суміші свої індивідуальні властивості [4].

Композиційні матеріали на основі міді або срібла та тугоплавких металів VIa групи (Cr, Mo, W) знайшли застосування як дугогасильні контакти для комутації великих токів (25 кА і вище) в мережах великої напруги (до 570 кВ) [5—8]. Дугогасильні контакти є найбільш відповідальною частиною комутаційних апаратів, що приймають на себе дію електричної дуги замикання та розмикання [9—11]. Для ефективної роботи ці контакти повинні мати добру електро- та теплопровідність, високі температури плавлення та кипіння, великі значення роботи виходу електронів та потенціалу іонізації, значну втомну міцність і стійкість до окиснення за високих температур, низькі значення контактного опору, малу розчинність газів та інші властивості [4, 10].

Метали з доброю електро- і теплопровідністю Ag, Cu, Au, Pt та інші мають низькі температури плавлення та рекристалізації, високу схильність до зварювання, малу міцність та низьку термостійкість, завдяки чому їх використання є вкрай обмеженим. Тугоплавким металам W, Mo, Re, Ta, Nb притаманні високі механічні характеристики, але недостатні електро- та теплопровідність. Сплавлювання легко- та тугоплавких металів зазвичай пов'язане з технологічними труднощами, що зумовлені суттєвою різницею їх фізико-хімічних характеристик [12, 13]. До того ж під час плавлення має місце часткове розчинення елементів у рідкій та твердій фазах, що може призводити до втрати їх індивідуальних властивостей [14]. Виробництво порошкових псевдосплавів є прикладом ефективного використання методу порошкової металургії, що дозволяє регулювати властивості матеріалу досить економними та відносно простими засобами за рахунок відповідного вибору вихідної сировини та технологічної схеми виготовлення.

Технологія отримання цих матеріалів містить етапи змішування та пресування порошків, подальшу термічну обробку (спікання) та доуцільнення для отримання максимальної щільності, близької до теоретичної (рис. 1) [15—17].

Попередньо спресована механічна суміш порошків може спікатися в твердому стані або в присутності рідкої фази (твердо- і рідкофазне спікання — ТФС і РФС відповідно). Переваги ТФС (рис. 1, *ліворуч*) полягають у тому, що склад композита не обмежений вмістом легкоплавкої фази. Але зазвичай за один цикл не вдається досягти максимальної щільності та потрібна деформаційна або термодеформаційна обробка. Технологія РФС (рис. 1, *центральна частина*) дозволяє пришвидчити процеси дифузії компонентів у матеріалі та забезпечує можливість його максимального ущільнення в процесі спікання.

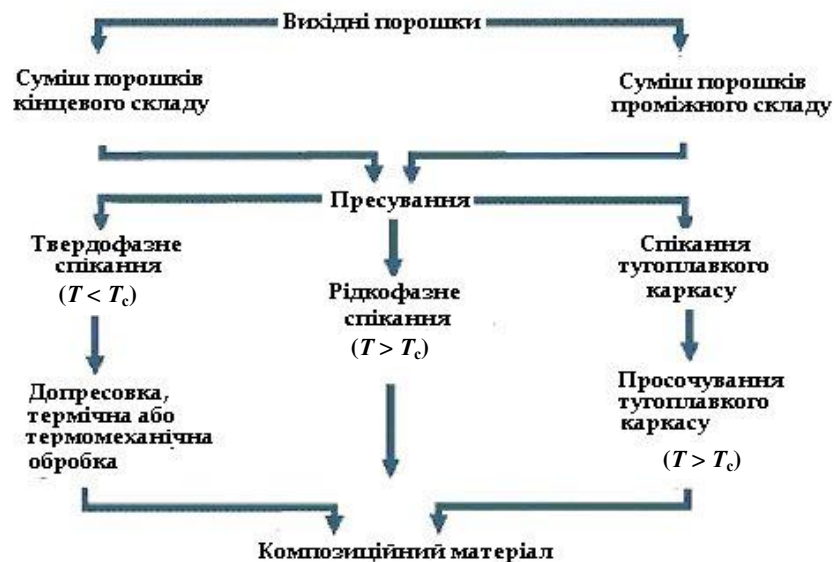


Рис. 1. Технологічна схема отримання КМ Cu (Ag)—Cr (Mo, W) (T_s — температура плавлення легкоплавкої фази).

Атмосфера спікання залежить від призначення виробів і зазвичай є відновлювальною чи дегазуючою (водень, вакуум). Для покращення змочування рідкою фазою поверхні тугоплавкої фази в процесі РФС використовують легуючі добавки: Fe, Co, Ni, Ti, Zr та інші (до 1—3% (мас.)) [4, 18, 19]. Ця технологія обмежує вміст рідкої фази (не більше 50% за об'ємом) для запобігання втрати форми виробу. Оптимальним технологічним заходом є просочування розплавами Cu—Ag або їх сплавами тугоплавкого каркасу, зформованого з додаванням легкоплавкого компонента або без нього (рис. 1, *праворуч*). Такий процес не вимагає обмеження об'єму рідкої фази та може забезпечити щільність, близьку до теоретичної. Крім того, надлишок рідкої фази під час просочення може бути використаний як перехідний провідний шар на зворотній поверхні контактів для приварювання до струмоведучих частин установки.

Стосовно КМ часто виявляють кореляцію між службовими характеристиками контактів, зменшенням частинок тугоплавкої фази до мікронного та субмікронного розмірів [20—22]. У зв'язку з цим перспективною технологією отримання КМ Cu (Ag)—Cr (Mo, W) є гаряче динамічне пресування, під час якого механічна суміш порошків кінцевого складу за одну операцію зазнає високошвидкісного пресування та термічної обробки в вакуумі. В результаті такої комплексної обробки забезпечують дегазацію порошків, зберігають їх дисперсність, формують високощільний матеріал з підвищеними міцністю і твердістю та задовільним рівнем електропровідності [23].

У виробництві технічні характеристики КМ зазвичай регламентуються за складом, щільністю, питомим електричним опором та твердістю (табл. 1—3). Вибір матеріалу та технологічної схеми отримання визначається умовами експлуатації контактів. Для всіх матеріалів є характерною загальна тенденція до зростання твердості та ерозійної стійкості і зниження тепло- та електричної провідності зі збільшенням вмісту тугоплавкої фази. Природа тугоплавкого наповнювача, схема отримання КМ також впливають на характер змін його властивостей.

Композиційні матеріали Ag—WC мають більшу твердість і менший питомий електроопір у порівнянні з КМ Ag—W у аналогічному концентраційному інтервалі вмісту матриці. Також схема просочення забезпечує отримання високощільного матеріалу з великими значеннями твердості, тепло- та електропровідності в порівнянні з матеріалами, отриманими за схемою ТФС з допресуванням (табл. 1). Для КМ W—Cu є характерним суттєве покращення міцностних характеристик зі зменшенням розмірів зерен вольфраму (табл. 3). Для структури порошкових КМ Cu (Ag)—Cr (Mo, W) є притаманною наявність двох і більше фаз на основі тугоплавкого та легкоплавкого компонентів з частинками від субмікронних розмірів до 300—500 мкм (рис. 2). Залежно від вимог до рівня тепло- та електропровідності, а також до ерозійної стійкості та механічного зношування КМ може складатися з каркасу провідної фази з диспергованими в ній тугоплавкими частинками або з тугоплавкого каркасу, капіляри якого є заповненими легкоплавкою фазою. Можливе також одночасне існування двох взаємопроникаючих каркасів легко- та тугоплавкої складових.

Отримання КМ з ультрадисперсними частинками тугоплавкої фази пов'язано з технологічними труднощами, що зумовлені необхідністю

Т а б л и ц я 1. Основні властивості КМ Ag—W, Ag—WC та Ag—Mo (за матеріалами фірми “DODUCO” [24])

Матеріал	Вміст срібла, % (мас.)	Щільність, г/см ³	Питома електропровідність		Твердість HV10
			% IACS	МСм/м	
AgW (50/50) SIWODUR 50-1	48—52	13,0—13,4	45	26	120—140
AgW (40/60) SIWODUR 60-1	38—42	14,0—14,4	41	24	140—160
AgW (30/70) SIWODUR 70-1	28—32	15,0—15,4	34	20	160—190
AgW (20/80) SIWODUR 80-1	18—22	15,8—16,3	31	18	180—230
AgWC (60/40) SIWODUR C 40-1	58—62	11,6—11,9	41	24	130—160
AgWC (50/50) SIWODUR C 50-1	48—52	12,0—12,4	38	22	140—170
AgWC (40/60) SIWODUR C 60-1	38—42	12,4—12,8	36	21	150—180
AgWC (84/16C2) SIWODUR C16/C2-2	80—84	9,8	60	35	55
AgWC (73/27C3) SIWODUR C16/C3-2	68—72	9,6	36	21	50
AgMo (50/50) SILMODUR 50-1	48—52	9,9—10,2	34	20	120—140
AgMo (40/60) SILMODUR 60-1	38—42	9,9—10,2	31	18	130—170
AgMo (30/70) SILMODUR 70-1	28—32	10,0—10,4	29	17	140—180

Примітка. В закінченні назви марки КМ позначено метод виготовлення: 1 — просочення; 2 — ТФС з подальшою допресовкою.

захисту порошків від окиснення, отримання рівномірного розподілу компонентів у суміші, збереження потрібної дисперсності структури та досягнення максимально можливої щільності [27—29]. Це потребує додаткових підготовчих технологічних операцій, наприклад плакування тугоплавкого компонента елементами з міжфазною активністю для покращення адгезійних характеристик на границі матриці з тугоплавкою фазою [30], тривалого високоенергетичного розмелення для механічного легування та отримання композиційних порошків проміжного складу [31], спільного відновлення кисневмісних сполук туго- і легкоплавких компонентів [32].

Під час вибору складу для контактів також приймають до уваги специфічні вимоги, що визначаються умовами роботи деталей контактів. Зокрема, для відключення великих струмів у вакуумі необхідно, щоб матеріал дугогасильних контактів містив мінімальну кількість газоутворюючих домішок, таких як кисень, водень та азот (табл. 3). Разом з тим, змінюючи склад КМ, можна контролювати емісійні властивості контактів з метою забезпечення зрізу струму поблизу нульового значення (рис. 3).

Т а б л и ц я 2. Основні властивості КМ Cr—Cu та якісна оцінка службових характеристик дугогасильних контактів з них (за матеріалами фірми "Plansee Group" [25])

Характеристика	Матеріал			
	CC-98	CC-75	CC-70	CC-57
Вміст Cr, % (мас.)	2	25	30	43
Вміст Cu, % (мас.)	98	75	70	57
Вміст O, % (мас.)	0,150	0,650	0,675	0,700
Вміст H, % (мас.)	0,005	0,005	0,005	0,010
Вміст N, % (мас.)	0,015	0,100	0,105	0,110
Щільність, г/см ³	8,70	8,05	7,90	7,60
Твердість HV30	110	70	75	85
Електропровідність	++++	++++	+++	++
Стійкість до оплавлення	o	+++	++++	++++
Здібність до переривання струму	o	++++	++++	++++
Струм переривання	o	++	+++	++++
Зносостійкість	o	++	+++	++++
Стійкість до зварювання	o	+++	+++	++++

Примітка. + + + + — відмінно; + + + — дуже добре; + + — добре; o — матеріал використовують як підкладку для контакту зі струмоведучими частинами вакуумної камери.

Т а б л и ц я 3. Основні властивості КМ W—Cu (за матеріалами фірми "Plansee Group" [25])

Матеріал	Состав, % (мас.) ¹		Щільність, г/см ³	Питома електропровідність, МСм/м	Твердість HV30	Міцність на стискання, МПа	Стійкість до оплавлення ²	Розмір зерна W, мкм
	W	Cu						
A15Ni	85	15	15,7	17	205	250	****	До 50
A20Ni	80	20	15,2	18	200	200	***	До 50
A20NiF	80	20	15,2	18,5	190	240	***	20□25
FG20	80	20	15,2	18,5	220	350	****	48
A25NiF	75	25	14,5	21	190	160	**	20—25
A30Ni	70	30	14,0	23	135	60	**	До 50

Примітка. 1 — всі склади КМ додатково леговані Ni (менше 1% (мас.)). 2 — **** — відмінно, *** — дуже добре, ** — добре.

До недоліків КМ цього класу слід віднести те, що з підвищенням вмісту тугоплавкого компонента погіршується можливість механічної обробки, а зі збільшенням легкоплавкого компонента зростає тенденція до зварювання зі струмами короткого замикання. Крім того, необхідно брати до уваги, в яких середовищах відбувається дугогасіння. Так, під час роботи контактів AgW в кисневмісних середовищах на їх поверхні утворюються вольфрамати срібла (Ag₂WO₄), що підвищує перехідний опір [33]. У праці [34] показано, що в присутності слабких електромагнітних полів, котрі виникають, наприклад, з розмиканням дугогасильних Ag—W

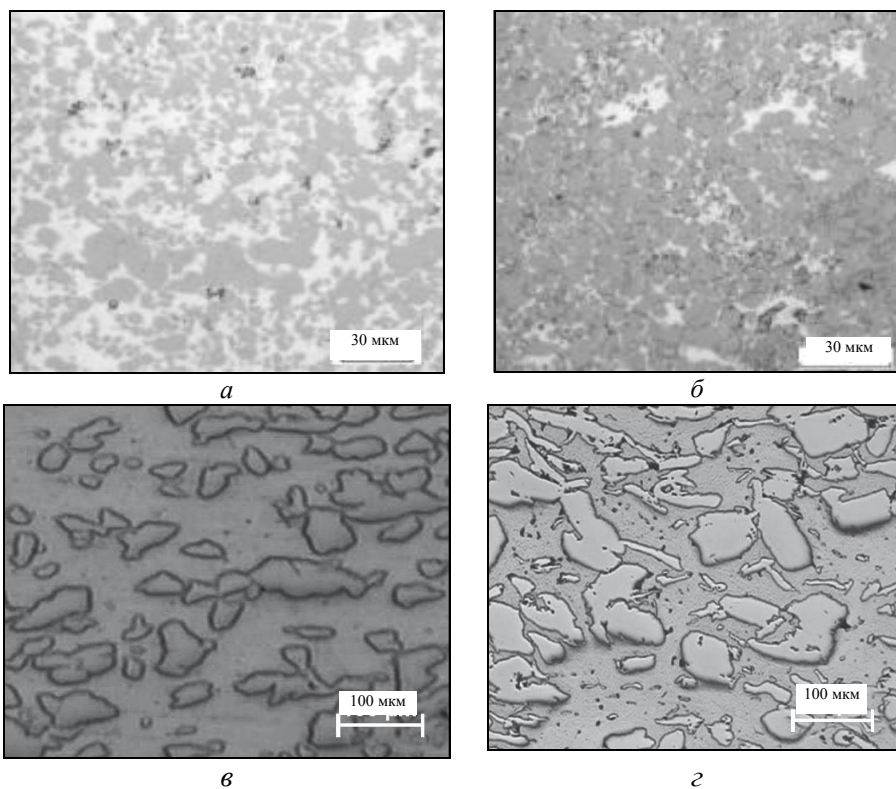


Рис. 2. Типові мікросруктури КМ SIWODUR75-1 (Ag/W 25/75) (а), SILMODUR65 (Ag/Мо 35/65) (б), CC-75 (Cu/Cr 75/25) (в) та CC-57 HMA (Cu/Cr 57/43) (г) (за матеріалами фірми "DODUCO" [24, 26]).

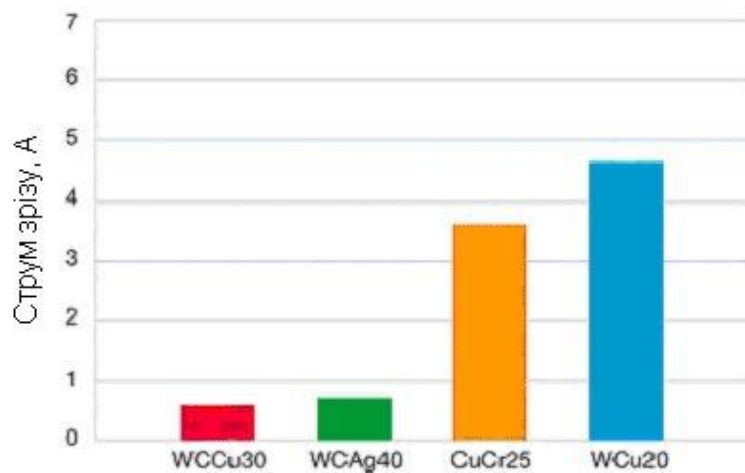


Рис. 3. Струм зрізу для різних контактних матеріалів під час випробування вакуумного контактора 24 кА/24 кВ з максимальним струмом 30 А [26].

контактів, спостерігається формування так званих конусів Тейлора на поверхні вольфрама, які підвищують ймовірність пробою після повторного запалювання дуги. Припускається, що поверхневий натяг рідкого вольфраму в кисневмісному середовищі може мати значення

на декілька порядків більше, ніж у вакуумі, оскільки подібні експерименти з іншими металами (Ta, Mo, Nb, Cu) на повітрі та вольфрамом у вакуумі не виявили присутність конусів Тейлора. Композиційний матеріал AgMo характеризується більш стабільним контактним опором на повітрі порівняно з КМ AgW завдяки тому, що оксиди молібдену менш стабільні та в процесі комутації виникає ефект самоочищення поверхні робочого шару.

У зварювальній техніці порошкові КМ на основі міді створюють особливу групу матеріалів, що їх часто використовують для стикового зварювання вставок ливарних форм оплавленням та опором, для точкового зварювання чорних металів і нержавіючої сталі, рельєфного зварювання ливарних форм та ін. В загальному випадку зварювальні електроди повинні мати високу тепло- та електропровідність, високі жароміцність, твердість і температуру рекристалізації, а також малу схильність до масопереносу через контакт електрод—деталь. Часто цим вимогам задовольняють гартована мідь або її сплави з добавками Cr, Cd, Ni, Be, Si та ін. (бронзи) [35, 36]. Але під час зварювання металів з малою провідністю, що мало деформуються, матеріалів різної товщини, різnorodних або товстостінних виникає потреба в електродах з підвищеною твердістю, міцністю та жаростійкістю у поєднанні з відносно низькою електропровідністю ($\leq 75\%$ від міді). В подібних умовах часто використовують комбіновані електроди, що складаються з електрода-вставки з тугоплавкого металу (W, Mo) або КМ на його основі, розташованого у мідній основі з системою охолодження. Така конструкція забезпечує суттєво більший строк служби порівняно з суцільно мідними електродами. Для зварювальних електродів вибирають КМ W(WC)—Cu з вмістом тугоплавкої складової 55% (мас.) і вище (табл. 4). Композиційні

Т а б л и ц я 4. Технічні властивості ДЗКМ на основі міді торгової марки ТОВ “Диском-сварка” (Росія) [40]

Характеристика матеріалу	Тип ДЗКМ						
	Cu—Al—C—O		Cu—Ti—C—O				Cu—Al—Ti—C—O
	C16.101	C16.106	C16.201	C16.202	C16.204	C16.205	C16.404
Щільність, г/см ³	8,70	8,57	8,69	8,55	8,67	8,55	8,65
Твердість НВ 5/750/30	185	140	159	147	218	228	193
Електропровідність, % ІАСС	50,0	85,0	73,0	79,0	56,0	55,0	65,0
Теплопровідність, Вт/м·К	185	—	302	305	265	230	271
Границя міцності зі стисканням, МПа	1010	1410	1170	1040	1060	1070	955
Відносна осадка до руйнування, %	36,0	59,0	45,0	42,0	27,5	26,5	30,0
Границя міцності з розтягненням: за 20 °С за 500 °С	717	492	490	510	740	785	700
	154	—	118	128	199	233	220
Відносне подовження, % за 20 °С за 500 °С	8,7	15,0	17,0	10,2	8,7	6,5	10,9
	5,2	—	13,2	6,5	5,1	4,0	7,3
Температура рекристалізації, °С	930	870	930	880	960	970	940

Т а б л и ц я 5. Технічні характеристики КМ “ельконайт” фірми “СМW” Inc. (США) [38]

Матеріал Elkonite (позн. СМW Inc.)	Склад, % (мас.)	Щільність, г/см ³	Питома електропровідність, % IACS	Питома теплопровідність (20 °С), Вт/м·К	Границя міцності зі згинанням, МПа	Твердість за Роквеллом
1W3	55W : 45Cu	12,50	53	310	758	77 HRB
3W3	68W : 32Cu	13,93	50	280	896	90 HRB
5W3	70W : 30Cu	14,18	48	280	965	95 HRB
10W3	75W : 25Cu	14,84	43	260	1030	98 HRB
10W53	75W : 25Cu	14,79	28	150	1380	109 HRB
30W3	80W : 20Cu	15,56	41	250	1170	103 HRB
TCS	50WC : 50Cu	11,26	45	290	1100	94 HRB
TC10	56WC : 44Cu	11,64	42	280	1240	100 HRB
TC20	70WC : 30Cu	12,65	30	240	1380	37 HRC



Рис. 4. Зміни твердості різних матеріалів на основі міді залежно від температури відпалу [40].

матеріали такого типу використовують також як електроди для електроерозійної обробки та інколи називають загальним терміном "елконіт" ("ельконіт", "ельконайт", "елконайт") [37, 38].

Варіюванням складу можна суттєво підвищувати міцність КМ, зберігаючи високий рівень електропровідності. Відносно новим класом для електродів контактного зварювання є дисперсно-зміцнені композиційні матеріали (ДЗКМ) на основі порошкової міді з диспергованими в ній частинками тугоплавких фаз — оксидів та карбідів (Al_2O_3 , TiO_2 , Cr_2O_3 , SiO_2 , SiC та ін.) [39—41]. Застосування методу високоенергетичного розмелення порошків з механічним легуванням міді оксидами дозволило отримати КМ з високим рівнем характеристик міцності та температурою рекристалізації, близькою до температури плавлення міді (табл. 5). Термічна стабільність та дисперсність оксидів забезпечують більшу жаростійкість ДЗКМ порівняно з хромистими та хромоцирконієвими бронзами (рис. 4).

Останнім часом виявлено кореляцію між службовими характеристиками контактів і не тільки зменшенням частинок тугоплавкої фази до мікронного та субмікронного розмірів, а й регулярністю розташування цих частинок [42—47]. Цікаво, що під час гарячого динамічного пресування КМ складу Cr—Cu попереднє доущільнення може негативно вплинути на кінцеві характеристики контактів. Дослідження у цьому напрямку, а також вивчення впливу якості границь зерен легкоплавкої матриці наразі тривають.

Висновки

Порошкові композиційні матеріали металоматричного типу на основі міді з тугоплавким наповнювачем відносяться до класу псевдосплавів і

можуть ефективно працювати в умовах високих температур, механічного та електроерозійного зносу і впливу різних середовищ. Завдяки унікальності їх властивостей ці матеріали використовують для виробництва дугогасильних контактів високовольтних вимикачів і для виготовлення зварювальних електродів для контактного зварювання.

Головні технологічні схеми виробництва, що застосовують методи порошкової металургії, містять попереднє змішування порошків вихідних компонентів проміжного чи кінцевого складу з подальшим спіканням за температури нижче чи вище температури плавлення легкоплавкої складової. Виробництво нанодисперсних КМ пов'язане з певними складнощами, що викликані необхідністю захисту порошків від окиснення, отримання рівномірного розподілу компонентів у суміші, збереження дисперсності структури та одержання максимально можливої щільності.

Відносно новим класом КМ для електродів контактного зварювання є дисперсно-зміцнені матеріали на основі порошкової міді з диспергованими в ній оксидами та карбідами (Al_2O_3 , TiO_2 , Cr_2O_3 , SiO_2 , SiC та ін.) з підвищеним рівнем міцності та жаростійкості.

Дослідження мікроструктури металоматричних КМ для електричних контактів і електродів, що базуються на методах кількісної металографії, відкривають нові перспективи для експрес-оцінки якості отриманого матеріалу.

1. *Композиционные материалы*. В 8 т. / Под ред. Л. Браутмана и Р. Крока. Т. 3. Применение композиционных материалов в технике. — М. : Машиностроение, 1978. — 511 с.
2. *Тучинский Л. И.* Композиционные материалы, получаемые методом пропитки. — М. : Металлургия, 1986. — 208 с.
3. *Композиционные материалы: (Справ.)* / Под общ. ред. В. В. Васильева, Ю. М. Тарнопольского. — М. : Машиностроение, 1990. — 510 с.
4. *Гнесин Г. Г.* Спеченные материалы для электротехники и электроники: (Справ.) / [Г. Г. Гнесин, В. А. Дубок, Г. Н. Братерская и др.]. — М. : Металлургия, 1981. — 344 с.
5. *Евдокунин Г. А.* Современная вакуумная коммутационная техника среднего напряжения / Г. А. Евдокунин, Г. Тилер. — СПб : Изд-во Сизова М. П., 2000. — 114 с.
6. *Вакуумная коммутационная техника и компоненты для сетей среднего напряжения*. Siemens. [Електронний ресурс]. — Режим доступу: https://w3.siemens.com/powerdistribution/global/SiteCollectionDocuments/en/mv/indoor-devices/vacuum-switching-technology-and-components_ru.pdf
7. *Slade P. G.* Electric contacts for power interruption. A review // Proc. 19 Int. conf. on Electric Contact Phenom. — Nuremberg (Germany), 1998. — P. 239—245.
8. *Contact Materials for Electrical Engineering*. Electrical Contacts Wiki. [Електронний ресурс]. — Режим доступу: http://www.electrical-contacts-wiki.com/index.php/Contact_Materials_for_Electrical_Engineering.
9. *Bregel T.* On the application of W/Cu materials in the fields of power engineering and plasma technology / [T. Bregel, W. Krauss-Vogt, R. Michal and K. E. Saeger] // IEEE Trans. Comp., Hybrids, Manufact. Technol. — 1991. — **14**. — P. 8—13.
10. *Намитоков К. К.* Электроэрозионные явления. — М. : Энергия, 1978. — 456 с.
11. *Минакова Р. В.* Вторичная структура в рабочем слое электрических контактов из композиционных материалов и их функциональные свойства / [Р. В. Минакова, Е. В. Хоменко, Г. Е. Копылова и др.] // Электрические контакты и электроды. — К. : Ин-т пробл. материаловедения НАН Украины, 2012. — С. 38—47.

12. *Лившиц Б. Г.* Физические свойства металлов и сплавов. — М. : Metallurgia, 1980. — 295 с.
13. *Порошковая технология: материалы, технология, свойства, области применения: (Справ.) / И. М. Федорченко, И. Н. Францевич, И. Д. Радомысельский.* — Киев : Наук. думка, 1985. — 624 с.
14. *Захаров А. М.* Диаграммы состояния двойных и тройных систем. — М. : Metallurgia, 1990. — 240 с.
15. *Plansee Group.* Сферы компетенции. Технологии: [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.plansee.com/en/About-us-Expertise-Technology-118.htm>
16. *Hula R. Ch.* Silver coated tungsten carbide powders for composite electrical contact application / R. Ch. Hula, Ch. Edmaier // Powder Metallurgy Progress. — 2000. — 9, No. 1. — P. 34—41: [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.imr.saske.sk/pmp/issue/1-2009/PMP_Vol09_No1_p034-041.pdf.
17. *Slade P.* Electric interruption: A review // Proc. 19 Int. conf. on Electric Contact Phenom. Nuremberg (Germany). — 1998. — P. 239.
18. *Найдич Ю. В.* Контактные явления в металлических расплавах. — К. : Наук. думка, 1972. — 196 с.
19. *Авраамов Ю. С.* Новые композиционные материалы на основе несмешивающихся компонентов: получение, структура и свойства / Ю. С. Авраамов, А. Д. Шляпин. — М. : МГИУ, 1999. — 206 с.
20. *Смага Н. Н.* Метод изготовления и результаты испытаний мелкодисперсных металлокерамических композиций для контактов электрических аппаратов / Н. Н. Смага, Б. А. Юдин, Е. В. Марков // Электротехнические металло-керамические изделия. — М. : ВНИИЭМ, 1965. — С. 61—68.
21. *Корниенко В. П.* Мелкозернистые композиционные контакты для низковольтной аппаратуры / В. П. Корниенко, Б. А. Юдин, В. Н. Колесников // Электрические контакты и электроды. — Киев : Наук. думка, 1977. — С. 70—79.
22. *Rieder W. F.* The influence of composition and Cr-particle size of Cu/Cr contacts on chopping current, contact resistance and breakdown voltage in vacuum interrupters / [W. F. Rieder, M. Schusseck, W. Glatzle, E. Kny] // IEEE Trans. Components Hybrids and Manufact. Tech. — 1989. — 12, No 2. — P. 273—283.
23. *Laptiev A.* Solid State impact sintering in vacuum of composites based on copper and silver / [A. Laptiev, O. Tolochyn, O. Khomenko, L. Kryachko] // Proc. 27th conf. on Electrical Contacts, June 22—26, 2014, Dresden, Germany. — P. 457—462.
24. *Tungsten and Molybden Based Materials.* Powered by Doduco: [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.electrical-contacts-wiki.com/index.php/Tungsten_and_Molybdenum_Based_Materials
25. *Plansee Group* [Электронный ресурс].- Режим доступа: <http://www.plansee.com/ru/Products-Electrical-contacts-Copper-chromium-CuCr-59.htm>
26. *Plansee Group* [Электронный ресурс].-Режим доступа: <http://www.plansee.com/ru/Products-Electrical-contacts-Tungsten-copper-WCu-58.htm>
27. *Найдич Ю. В.* Исследование процесса уплотнения при жидкофазном спекании под давлением в системе вольфрам—медь / Ю. В. Найдич, И. А. Лавриненко, В. А. Евдокимов // Порошковая металлургия. — 1974. — № 1. — С. 34—39.
28. *Паничкина В. В.* Жидкофазное спекание высокодисперсных смесей вольфрам—медь / В. В. Паничкина, М. М. Сиротюк, В. В. Скороход // Там же. — 1982. — № 6. — С. 27—31.
29. *Grill R.* WC/Ag contact materials with improved homogeneity / [R. Grill, P. Klausler, F. E.-H. Mueller et al.] // Proc. 16th Int. Plansee seminar. Reutte, 2005. — P. 200—211.

30. Amirjan M. Evaluation of microstructure and contiguity of W/Cu composites prepared by coated tungsten powders / M. Amirjan, K. Zangeneh-Madar, N. Parvin // *Refractory Metals Hard Mater.* — 2009. — 27. — P. 729—733.
31. Пат. 6375708 B1. US. Alloy for electrical contacts and electrodes and method of making / [Leonid P. Dorfman, Michael J. Scheithauer, Muktesh Paliwal et al.]. — Оpubл. 23.04.2002.
32. Пат. 7172725 B2. US. W—Cu alloy having homogeneous microstructure and manufacturing method thereof / [Moon-Hee Hong, Ja-Ho Choi, Seoung Lee et al.]. — Оpubл. 6.02.2007.
33. Wingert P. S. The effect of Ni on the switching performance of AgW based on contacts // *Proc. 39th IEEE Holm. Cong.* — 1993. — P. 111—115.
34. Batrakov A. V. Electrodynamic phenomena in exploding tungsten electrical contacts / A. V. Batrakov, S. A. Popov, D. I. Proskurovsky // *Proc. 42th IEEE Holm. conf.*, 1996. — P. 129—136.
35. Гуляев А. И. Технология и оборудование контактной сварки. — М. : Машиностроение, 1985. — 254 с.
36. *Технология и оборудование контактной сварки* / Под общ. ред. Б. Д. Орлова. — М. : Машиностроение, 1986. — 352 с.
37. *Toshiba materials Co Ltd.* Elconite. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.toshiba-tmat.co.jp/eng/list/ta_elc.htm
38. *Contacts Metals Welding.* Typical properties of elkonite materials. [Электронный ресурс]— Режим доступа: <http://www.tjsnow.com/supplies/cmw/w49f.pdf>
39. Kos M. Pressing of partially oxide-dispersion-strengthened copper using the ECAP process / [M. Kos, J. Ferenc, M. Bruncko et al.] // *Mater. Techn.* — 2014. — 48, is. 3. — P. 370—384.
40. *Диском-сварка.* Наноструктурные материалы и изделия из них. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://discom-svarka.ru/dukml/>
41. Аношин В. А. Жаропрочные материалы на основе меди. Способы получения. Свойства. Применение / [В. А. Аношин, В. М. Илюшенко, Р. В. Минакова и др.] // *Электрические контакты и электроды.* — Киев : Ин-т пробл. материаловедения НАН Украины. — 2010. — С. 212—219.
42. Пат. на корисну модель 96309. Спосіб визначення показника регулярності мікроструктури / О. І. Хоменко, Г. А. Баглюк. — Оpubл. 26.01.2015. — Бюл. № 2.
43. Хоменко О. І. Кількісний показник регулярності мікроструктури матеріалу / О. І. Хоменко, Г. А. Баглюк // *Наук. нотатки : Міжвуз. зб. (за галузями знань "Технічні науки")*. — Луцьк : ЛНТУ. — 2015. — Вип. 49. — С. 155—159.
44. Хоменко О. І. Оцінка якості матеріалів електротехнічного призначення, отриманих гарячим штампуванням, за їхньою мікроструктурою / О. І. Хоменко, О. В. Хоменко, Г. А. Баглюк // *Обработка материалов давлением : Сб. науч. трудов.* — Краматорск : ДГМА, 2015. — № 2 (41). — С. 153—157.
45. Хоменко О. І. Показники, що доповнюють дані кількісної металографії для аналізу фізичних характеристик матеріалів / О. І. Хоменко, О. В. Хоменко, Г. А. Баглюк // *Математические модели и вычислительный эксперимент в материаловедении.* — К. : Ин-т пробл. материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины. — 2015. — Вип. 17. — С. 35—42.
46. Хоменко А. И. Корреляция физических свойств и геометрических параметров микроструктуры композиционных материалов состава Cr—Cu для вакуумных дугогасительных контактов / А. И. Хоменко, Е. В. Хоменко, Г. А. Баглюк // *Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка: Материалы 12-й междунар. конф., Минск, 25—27 мая 2016.* — С. 177—180.

47. *Khomenko A.* Investigation of correlation between physical properties and microstructure geometrical parameters of Cr—Cu composites material used for vacuum arcing contacts / [A. Khomenko, E. Khomenko, B. Miedzinski, A. Kozlowski] // Mining – Informatics, Automation and Electrical Engineering, Nr. — 2016. — 2 (526). — P. 29—32.

Современные порошковые композиционные материалы для коммутационной и сварочной техники

В. Г. Затовский, Е. В. Хоменко, А. И. Хоменко

Рассмотрены основные области применения порошковых композиционных материалов металломатричного типа на основе меди и серебра с тугоплавким наполнителем в коммутационной и сварочной технике. Представлены технологические схемы производства, регламентированные характеристики и микроструктура этих материалов.

Ключевые слова: порошковые композиционные материалы на основе серебра, порошковые композиционные материалы на основе меди, коммутационная и сварочная техника.

Modern powder composite materials for switching and welding equipment

V. G. Zatovsky, O. V. Khomenko, O. I. Khomenko

The main areas of application of powder composite materials of metal-matrix type based on copper and silver with a refractory filler in switching and welding equipment are considered. The technological schemes of production, regulated characteristics and microstructure of these materials are presented.

Keywords: copper-based powder composite materials, switching and welding equipment.