

УДК 621.762

**О.І. Хоменко, О.В. Хоменко, Г.А. Баглюк***Інститут проблем матеріалознавства НАН України***ОСОБЛИВОСТІ СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ ТА ВЛАСТИВОСТІ КОМПОЗИТУ  
Cu-50 % МАС.Сr, ОТРИМАНОГО МЕТОДАМИ РІДКОФАЗНОГО СПІКАННЯ ТА  
ГАРЯЧОГО ШТАМПУВАННЯ**

*Встановлено оптимальні режими отримання композиту Cu-50 % мас. Сr для електричних дугогасильних контактів, що працюють в екстремальних умовах, методами рідкофазного спікання та гарячої штамповки, які дозволяють підвищити механічні характеристики у порівнянні із промисловими зразками. Проведена кількісна оцінка регулярності розподілу частинок хрому у мікроструктурі та визначено високу виразність наявності функціонального зв'язку між цим показником та питомою електропровідністю і механічними характеристиками матеріалу.*

*Ключові слова:* композити Cr-Cu, дугогасильні контакти, мікроструктура, кількісна металографія, електропровідність, механічні характеристики

**А.И. Хоменко, Е.В. Хоменко, Г.А. Баглюк****ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ И СВОЙСТВА КОМПОЗИТА  
Cu-50 % МАС.Сr, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДАМИ ЖИДКОФАЗНОГО СПЕКАНИЯ И  
ГОРЯЧЕЙ ШТАМПОВКИ**

*Установлены оптимальные режимы получения композита Cu-50 % мас. Сr для электрических дугогасительных контактов, работающих в экстремальных условиях, методами жидкофазного спекания и горячей штамповки, которые позволяют повысить механические характеристики по сравнению с промышленными образцами. Проведена количественная оценка регулярности распределения частиц хрома в микроструктуре и определена высокая вероятность наличия функциональной связи между этим показателем и удельной электропроводностью и механическими характеристиками материала.*

*Ключевые слова:* композиты Cr-Cu, дугогасительные контакты, микроструктура, количественная металлография, электропроводность, механические характеристики.

**A.I. Khomenko, E.V. Khomenko, G.A. Baglyuk****FEATURES OF STRUCTURE FORMATION AND PROPERTIES OF Cu-50 % MASS Cr  
COMPOSITE, OBTAINED BY MEANS OF LIQUID-PHASE SINTERING AND HOT  
STAMPING**

*This article is dedicated to the problem of correlation between geometrical parameters of microstructure of Cu - 50 % mass Cr composite material used for electrical arcing contacts and its physical properties such as specific electrical conductivity and mechanical strength, hardness and plasticity. Existing incoming inspection test procedure cannot guarantee spable work of arcing contacts under extremal conditions of electric arc effect. The optimal modes of such composite obtaining are specified to exceed appropriate properties of industrial materials. The quantitative estimation of regularity of distribution of Cr particles in the material microstructure. A high probability of functional dependence between regularity index, specific electrical conductivity and mechanical strength is established.*

*Keywords:* Cr-Cu coposites, arcing contacts, microstructure, quantitative metallography, electrical conductivity, mechanical properties.

**Вступ.** Розширення області застосування вакуумних комутуючих пристроїв, що здійснюють управління та відключення електричних мереж високої напруги (10 кВ і більше) в штатному та аварійному режимах, відбувається одночасно з ростом вимог до параметрів комутаційних вузлів та матеріалів, які використовуються в цьому обладнанні [1]. Зокрема, характеристики дугогасильних вакуумних контактів, основна функція яких є дугогасіння високовольтного електричного розряду у вакуумі, залежать головним чином від регулярності розподілення тугоплавкої та легкоплавкої фаз та міцності адгезійного зв'язку на границях між ними в мікроструктурі матеріалу, що використовується при їх виробництві.

В даний час загальновізнано, що композити Cu-Cr із змістом хрому від 35 до 60 % мають найбільш оптимальний комплекс властивостей для їх використання в якості вакуумних дугогасильних контактів. Наразі в технічних умовах різних виробників вакуумних контактів контролюючими параметрами є хімічний склад, питомий електроопір та твердість матеріалу (наприклад: „Материалы ЭРХ25Д75-МП и ЭРХ25Д50-МП. Диски однослойные из материала хром-медь. ТУ 14-22-146-2002. Производитель: АО «ПОЛЕМА», РФ” [Електрон. ресурс]. - Режим доступу: <http://www.polema.net/kontakty-cr-cu-w-cu.html>). Зазначені характеристики безпосередньо не пов'язані з характером розподілу основних фаз в мікроструктурі матеріалу і його ерозійною та механічною зносостійкістю, і їх контроль не забезпечує повної гарантії

успішної роботи дугогасильних контактів [2].

В наукових принципах створення нових дугогасильних матеріалів, закладених ще школою І.М. Францевича [3], визначені основні шляхи підвищення їх властивостей за рахунок формування особливого типу мікроструктури - взаємопроникних каркасів легкоплавкої і тугоплавкої складових із рівномірним розподілом компонентів, що забезпечує високу дугогасильну здатність матеріалу та зменшує ймовірність розвитку повторного запалювання електричної дуги та переходу її в стаціонарну форму. Досягнення такої мети потребує широких можливостей керування структурою та цілого спектру методів контролю за ними на кожному етапі технологічного циклу отримання матеріалів.

Метою даної роботи є визначення умов формування структури порошкового композиту Cu-50 % мас. Сг методами рідкофазного спікання та гарячої штамповки та дослідження взаємозв'язку між геометричними параметрами мікроструктури композитів Cu-Cr та його фізичними характеристиками.

**Експериментальні результати та їх обговорення.** В роботі використовували порошки електролітичної міді марки ПМС-1 та відновленого гідридом кальцію хрому марки ПХ1. Хімічний склад порошків визначали хімічним і спектральним методами, вміст кисню, азоту та водню - методом відновної екстракції (ГОСТ 27417-98), гранулометричний склад порошків та мікроструктуру отриманих композитів вивчали методами стереометричної металографії [4] за допомогою комп'ютерної програми аналізу зображень "AMIC" [5]. Питомий електроопір зразків визначали методом подвійного моста постійного струму (на кожному зразку не менше 5 разів). Механічні випробування на розтяг проводили згідно ДСТУ EN 10002-1:2006 на базі 20 мм із діаметром робочої частини 3 мм зі швидкістю переміщення - 1 мм / хв, похибка визначення механічних характеристик становила 1% від абсолютного значення, точність вимірювання деформації - 10-20% та 5% від абсолютного значення при деформаціях менших та більших 5%, відповідно. В якості геометричних параметрів мікроструктури використовували середній діаметр Фере [6], визначаючи його як середнє арифметичне всіх лінійних розмірів проєкцій частинок на січну лінію, яка проводилася під різними кутами до зображення в інтервалі від 0 до 360° з кроком 2°. Аналогічно розраховували середньостатистичну відстань між частинками, розглядаючи міжчастинковий простір як другу фазу. Об'єм статистичної вибірки замірів становив  $\geq 1024$  для кожного із зразків, що забезпечує рівень статистичної похибки на рівні 2 % [4].

Основний склад домішок у міді (% мас.): O-0,3; S-0,02; Fe-0,05; Pb-0,01; As-0,005; Sb-0,01; C-0,09, S $\leq$ 0,1; Si-0,01; H $\leq$ 0,002. Частинки електролітичної міді у вихідному стані мають розгалужену дендритну форму (рис.1, а) і середній розмір 42,5 мкм.

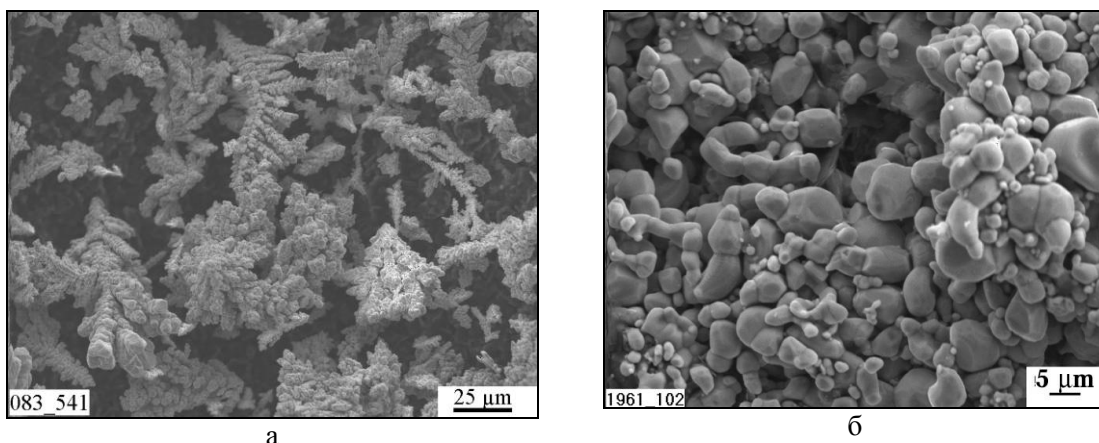


Рис.1. Загальний вигляд частинок порошків електролітичної міді (а) та відновленого хрому (б)

Масова частка домішок у відновленому порошку хрому становить (% мас.): O-0,3 N - 0,007, H-0,003, C-0,06, Si 0,09, Fe-0,15, Ca-0,1, Ni -0,1. Порошок електролітичного хрому складається переважно з конгломератів, що представляють собою зростлі в замкнуті або лінійні ланцюжки зерна із середнім розміром 9 мкм (рис.1, б). Гранулометричний склад порошку характеризується вузьким розподілом частинок за розмірами в межах від 8 до 20 мкм (рис. 2, а).

Гістограма розподілу частинок порошку міді характеризується відносно широким розкидом частинок за розмірами, сягаючи максимального значення більш ніж 150 мкм (рис. 2, б). Суттєва

різниця в гранулометричному складі та формі частинок міді та хрому ускладнюють їх змішування при використанні стандартних кульових барабанів. Зокрема, після змішування порошків протягом 8-24 год у барабані зі стальними кулями у ваговому співвідношенні порошків та куль від 1:6 до 1:10 в умовах заповнення робочої ємності порошками з кулями від 50 до 70 % об'єму, отримана суміш розшаровується при струшуванні та транспортуванні.

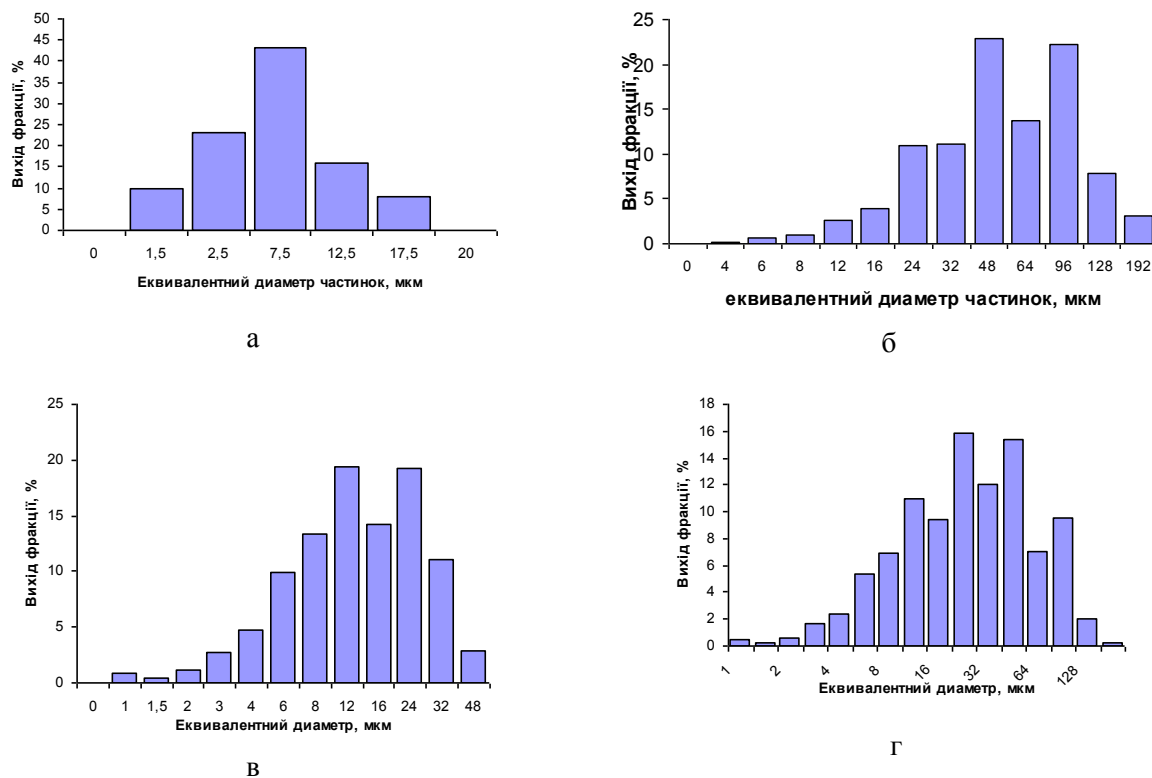


Рис. 2. Гранулометричний склад порошку хрому у вихідному стані (а) та міді до розмелу (б) і після розмелу у вібромліні протягом 30 (в) та 60 хв (г).

Для отримання суміші з рівномірним розподілом складових попередньо порошок міді розмелювали у вібраційному млині потужністю 5,5 кВт, обсягом робочої камери 10 дм<sup>3</sup>, частотою коливань 3000 хв<sup>-1</sup> та числом обертів 2900 хв<sup>-1</sup>. В якості розмельних тіл використовували сталі кулі з діаметрами 8-22 мм; завантаження млина шихтою складало не більше 70 % його об'єму, масове співвідношення куль і шихти складало 10:1. Встановлено, що оптимальний час розмелу становить 30 хв. (рис.2, г). Подовження часу диспергування приводить до збільшення розмірів частинок, очевидно, за рахунок їхньої агломерації. Після розмелу порошку вміст кисню в ньому збільшується з 0,2 до 0,48%, а вуглецю - зменшується з 0,09 до 0,04%, що ймовірно, пов'язано з руйнуванням захисної плівки на поверхні частинок (в стані поставки порошок стабілізований вуглецевовмісними плівками). З метою зниження вмісту кисню в міді проводили її відновлювальний відпал у водні при температурі 180±20°C протягом 2 год, що привело до зниження вмісту кисню у порошок до 0,2% мас.

Змішування попередньо розмеленого порошку міді з хромом проводили у кульовому млині, футерованому сталлю, при ваговому співвідношенні суміші і сталевих куль 1:1 і об'ємному співвідношенні робочої камери млина і суміші 3:1, всуху. Встановлений мінімальний час змішування, при якому не виявлено розшарується при пресуванні - 6 годин, при цьому середній розмір частинок у суміші становив 13-14 мкм. Середній вміст хрому в 10 пробах, взятих із суміші, відповідав заданому (45-50% мас).

Механічну суміш порошків хрому та міді пресували під тиском 300-400 МПа для отримання пресовок циліндричної форми з діаметром 30 мм та висотою 10 мм. З метою отримання високощільних зразків спікання пресовок проводили при температурах вище температури плавлення міді, а саме - 1200 °C протягом 1 години в атмосфері водню з точкою роси -20 °C. Після спікання зразки мали густину не більше, ніж 84-86 % від теоретичної. Нагрівання зразків до температури основного спікання проводили зі швидкостями 10, 25 та 50 °C/хв. Охолодження з

температури ізотермічної витримки у всіх випадках проводили разом з піччю. Після рідкофазного спікання всі зразки мали густину 84–86 % від теоретичної. З метою доведення матеріалу до максимальної щільності зразки доущільнювали при кімнатній температурі на гідравлічному пресі під тиском 500–600 МПа, після чого піддавали відпалу при температурі  $600 \pm 10$  °C в аргоні протягом 15–30 хв. для зняття механічних напружень.

Рентгенівський аналіз, проведений на установках УРС-50ІМ і ДРОН-2 в випромінюванні  $\text{Cu K}_\alpha$  показав наявність тільки ліній чистого хрому - (110)  $2\theta = 44^\circ 24'$  і (200)  $2\theta = 64^\circ 36'$ , (211)  $2\theta = 89^\circ 54'$ , (220)  $2\theta = 98^\circ 12'$  та чистої міді - (111)  $2\theta = 43^\circ 24'$ , (200)  $2\theta = 50^\circ 30'$ , (220)  $2\theta = 74^\circ 12'$ , (311) -  $2\theta = 89^\circ 48'$  і (222)  $2\theta = 95^\circ 12'$ , що відповідає рівноважному стану [7]. Якісне порівняння розмірів і кількості рефлексів на лініях, що відносяться до ГЦК-мідної і ОЦК-хромової кристалічних ґраток свідчить про те, що ГЦК-складова на основі міді представлена зернами-колоніями з розміром на рівні 100 мкм і більше. Мікроструктура зразків характеризується певними відмінностями в залежності від швидкості нагрівання зразків до температури ізотермічної витримки (рис.4).

Мікроструктурний аналіз показав збільшення середнього розміру частинок хрому та зменшення відстані між ними в мікроструктурі спечених зразків із уповільненням швидкості нагріву зразків, що вказує на суттєвий вплив цього параметру на міграцію границь хрому та міді в процесі рекристалізації та коалесценції зерен в неізотермічних умовах спікання (табл.1). Необхідно відмітити, що для зразків, які нагрівали з найменшою швидкістю, притаманні близькі значення середнього розміру частинок та середньої відстані між ними, що на перший погляд може бути ознакою регулярної структури, однак, як показали наступні дослідження, це не так.

Кількісну оцінку регулярності розміщення хромової фази в мікроструктурі зразків визначали при використанні комп'ютерної програми для аналізу зображень „AMIC” [4], розраховуючи фрактальну розмірність Мінковського [8] та запропонований авторами показник регулярності [9].

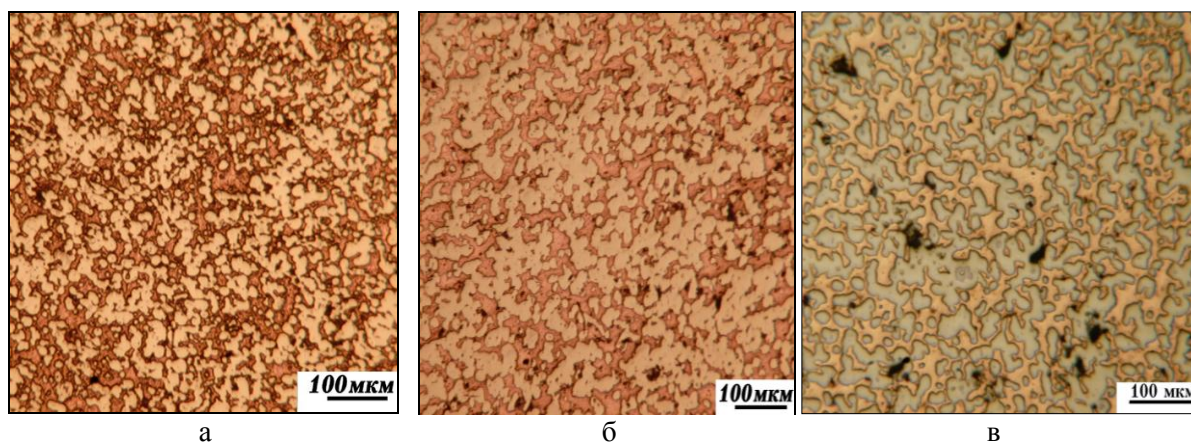


Рис. 4. Мікроструктура спечених зразків, швидкість нагрівання яких до температури основного спікання становить 50 (а), 25 (б) і 10 °C/хв (в).

Таблиця 1

Характеристики регулярності розподілення частинок хромової фази в мікроструктурі спечених зразків в залежності від швидкості нагрівання зразків до температури ізотермічної витримки

Швидкість нагрівання зразків, град/хв	Середній-розмір хромових частинок, мкм	Середня відстань між частинками, мкм	Фрактальна розмірність мікроструктури	Показник регулярності мікроструктури
50	$18,5 \pm 0,4$	$128,9 \pm 12,6$	1,87	0,980
25	$37,6 \pm 0,8$	$43,3 \pm 0,8$	1,93	0,847
10	$45,6 \pm 1,1$	$51 \pm 3,0$	1,89	0,840

Визначення зазначених показників проводили шляхом нанесення на зображення мікроструктури уявної регулярної ортогональної сітки з однаковим розміром комірки. При розрахунках фрактальної розмірності сітку поступово згущували до мінімального розміру та підраховували кількість комірок, до яких потрапляли частинки хрому  $N(\zeta)$ , визначаючи розмірність Мінковського за формулою:  $D = \lim_{\zeta \rightarrow 0} \log N(\zeta) / \log (1 / \zeta) = \lim_{\zeta \rightarrow 0} \log N(\zeta) / -\log \zeta$ . [8]. За теорією фракталів цей параметр має характеризувати самоподібність мікроструктури матеріалу, який, зокрема для композиту Cu-50Cr, складається з каркасних елементів тугоплавкої та легкоплавкої фаз. При розрахунках показника регулярності розмір комірки ортогональної сітки приймають рівним найменшій відстані між центрами частинок. В цьому випадку відношення кількості комірок, що перетинають частинки, до загальної кількості комірок у сітці однозначно характеризує ступінь наближення структури, що її аналізують, до ідеальної регулярної. Тоді чим ближча реальна структура до регулярної, тим ближчий до одиниці показник регулярності. Для позбавлення чутливості даного показника до дисперсності хрому його нормували до середнього розміру частинок.

Розрахунки фрактальної розмірності показали відсутність явного зв'язку між змінами цього параметру та швидкості нагріву зразків і пов'язаними з цим мікроструктурними змінами, що робить її малоінформативним в даних умовах (див. табл.1). На відміну від цього, показник регулярності є чутливим до цих параметрів, і його зростання вказує на наближення мікроструктури спечених зразків до більш регулярної.

Згідно результатів механічних та електричних випробувань найвищою електропровідністю та найкращий рівень механічних характеристик мають зразки з мікроструктурою з найбільш регулярним розташуванням хромової фази в мідній матриці (табл.2). Коефіцієнти кореляції між характеристикою регулярності мікроструктури зразків та їх властивостями становлять 0,96...1, що вказує на достатньо високу вірогідність функціонального зв'язку між цими параметрами.

Для досягнення максимальної густини матеріалу спечені зразки із максимальним рівнем властивостей піддавали гарячій штамповці при температурі  $850 \pm 20$  °C, яка згідно рекомендаціям [9], знаходиться в межах 0,7-0,8 від температури плавлення міді, і є оптимальною для активного розвитку процесів міжзеренного зрощування та зміцнення міжфазових границь в мідних сплавах.

Таблиця 2

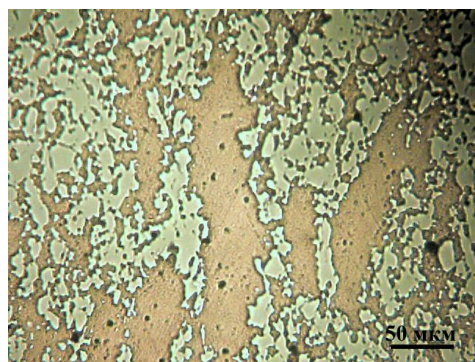
**Електропровідність та механічні характеристики спечених та допресованих зразків після в залежності від швидкості нагрівання до температури до температури ізотермічної витримки**

Швидкість нагрівання зразків, °C/хв	Густина відносно теоретичної	Питома електропровідність, МСм/м	Границя плинності, МПа	Границя міцності на розтяг, МПа	Відносне видовження після розриву, %	Твердість HB10
50	0,95..0,96	11,11±0,55	186±9	190±10	1,2±0,06	90...95
25	0,95..0,96	9,91±0,59	121±6	133±11	0,20±0,01	80...85
10	0,95..0,96	9,52±0,48	120±5	121±10	0,27±0,01	80...90

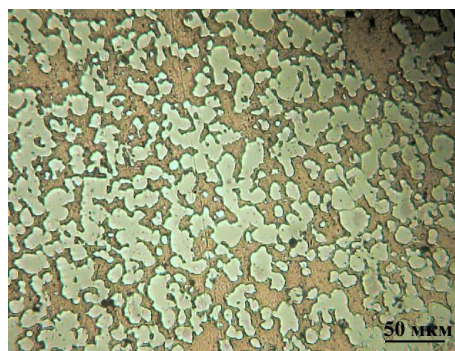
З метою визначення впливу початкової пористості спеченого матеріалу на структуроутворення та властивості при гарячій штамповці, зразки, що мали пористість 75-80 % від теоретичної, були розділені на 3 партії, з яких першу партію не піддавали ніякій додатковій обробці, а зразки другої та третьої партій допресовували при кімнатній температурі та тиску 500-600 МПа до досягнення відносної густини 85-86 та 91-92 % від теоретичної, відповідно. Потім всі зразки розташовували у графітовій обмазці та нагрівали в печі з підведенням аргону до температури штампування. Потім їх піддавали штампуванню в закритому штампі на гвинтовому пресі з дугостаторним приводом моделі F51732 з номінальним зусиллям 16 МН. Швидкість деформування зразків становила  $\dot{\epsilon} = 233 \text{ с}^{-1}$  ( $\dot{\epsilon} = V_n / \Delta h$ , де  $V_n$  – швидкість руху повзуна;  $\Delta h$  – зміна довжини зразків до та після гарячої штамповки); ступінь поперечної деформації коливалась в межах від 15 до 22 % (розраховували як відносні зміни площини поперечного перерізу зразків до та після гарячого штампування). Після гарячого штампування зразки відпалювали в захисному

середовищі аргону при температурі  $600 \pm 20$  °С протягом 15–30 хв. для зняття механічних напружень.

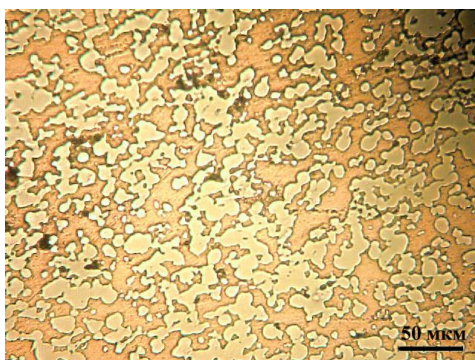
В зразках першої партії після штампування виявлено неоднорідний розподіл фаз і наявність макророзмірних областей, що складаються практично з однієї мідної фази (рис.5, а).



а



б



в

**Рис. 5. Мікроструктура спечених зразків першої (а), другої (б) та третьої партій (в) після гарячої штамповки.**

Це ймовірно пов'язано із великою початковою поруватістю матеріалу (23-24 %), що в умовах термодформаційної обробки полегшує зсуви матеріалу, в першу чергу об'єму мідної фази, і приводить до розшаровування структури. Зниження початкової поруватості призводить до більш рівномірного розподілу складових у його мікроструктурі (рис.5, б, в).

Як показали розрахунки, середній розмір хромових частинок та середня відстань між ними зі зміною початкової поруватості зразків змінюються несуттєво (табл.3).

Таблиця 3

**Середньостатистичні значення геометричних характеристик мікроструктури зразків після гарячого штампування**

№ партії	Середній діаметр Фере частинок хрому, мкм	Середня відстань між частинками хрому, мкм	Фрактальна розмірність	Показник регулярності
1	$12,8 \pm 0,8$	$12,2 \pm 2,6$	1,87	0,911
2	$16,2 \pm 3,5$	$28,9 \pm 2,4$	1,94	0,970
3	$13,3 \pm 0,6$	$20,4 \pm 5,5$	1,88	0,870

Це обумовлено широким інтервалом наявних розмірів частинок та різним характером їх розподілу в мідній матриці, що при усередненні цих параметрів нівелює їх чутливість до мікроструктурних змін в процесі гарячого штампування, пов'язаних із різним вихідним станом матеріалу. На відміну від стандартних кількісних мікроструктурних характеристик, фрактальна розмірність та показник регулярності мають максимальні значення для зразків другої партії, що вказує на найвищий рівень регулярності їхніх мікроструктур. Порівняльний аналіз фізико-

механічних характеристик зразків показав, що саме їм притаманні найвищі рівні електропровідності та механічних характеристик (табл. 4).

Коефіцієнти кореляції між геометричними параметрами мікроструктури і фізичними властивостями зразків після гарячої штамповки коливаються в межах від 0,808 до 1, що підтверджує високу вірогідність функціонального зв'язку між цими параметрами.

Таблиця 4

**Електропровідність та механічні характеристики спечених зразків після гарячого штампування**

№ партії	Густина до гарячої штамповки відносно теоретичної	Густина після гарячої штамповки відносно теоретичної	Питома електропровідність, МСм/м	Границя плинності, МПа	Границя міцності на розтяг, МПа	Відносне видовження після розриву, %	Твердість НВ/10
1	0,76...0,77	0,983...0,986	13,99±0,27	305±17	478±10	7,0 ±1	100...115
2	0,82...0,84	0,988...0,990	22,22±0,44	346 ±15	485±9	9,8±1	115...120
3	0,90...0,91	0,970...0,980	12,82±0,26	314 ±16	448±15	5,1±2,5	98...110

Фрактографічний аналіз поверхні зразків до та після гарячої штамповки показав суттєву різницю в характері руйнування матеріалу (рис. 6). Після проведення холодного допресування магістральна тріщина поширюється по міжфазовим границям, відшаровуючи легкоплавку складову від тугоплавких частинок та по границям зерен мідної фази, збагачених домішками. Гаряче штампування сприяє зміні механізмів руйнування: мідна фаза руйнується після значної пластичної деформації, а хромові частинки накопичують значну кількість одиничних тріщин, поширення яких затримується пластичною матрицею, і тільки потім руйнуються по тілу зерна. Цілком очевидно, що істотне підвищення міцності і пластичності матеріалу після гарячої штамповки має місце не тільки за рахунок зменшення загальної поруватості, але не менш важливу роль при цьому відіграє висока адгезія на міжфазних границях, що пояснюється формуванням зв'язків між поверхневими атомами на міжфазній межі, тобто розвитком процесу «зрощування» міжфазних границь [9].

Порівняльні механічні випробування зразків, виготовлених із промислового матеріалу марки ЕРХ50Д50-МП аналогічного складу (виробництво РФ, ТУ 14-22-161-2002) показали, що межа їх міцності складає не більше ніж 290 МПа при відносному видовженні 4-5 %, що суттєво нижче рівня механічних характеристик, якого можна досягнути при використанні гарячої штамповки спечених зразків. Це вказує на те, що метод гарячої штамповки має більші можливості для підвищення властивостей матеріалу Cu-Cr, ніж існуючі наразі стандартні технології.

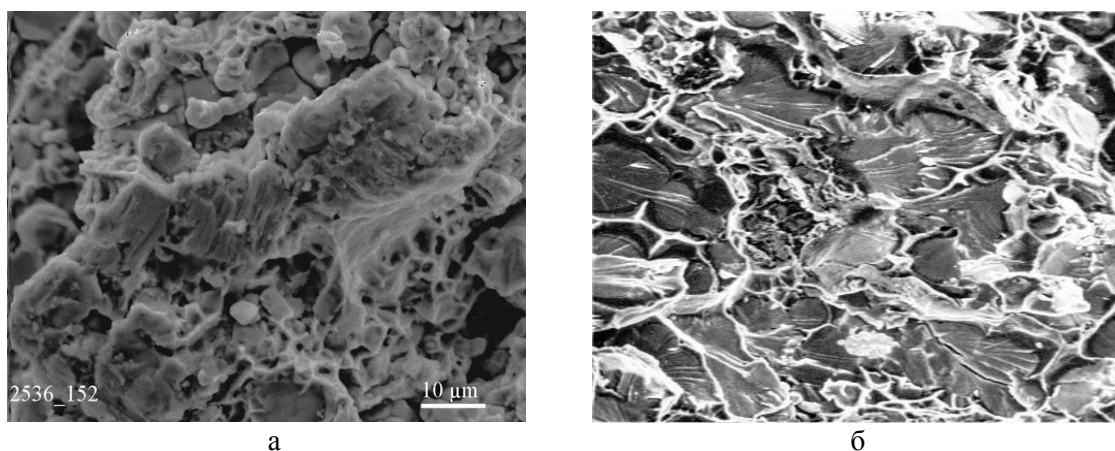


Рис. 6. - Фрактографія поверхні руйнування спечених зразків 2 партії до (а) та після гарячого штампування (б)

**Висновки.** Визначено умови отримання рівномірної суміші порошків хрому та міді складу Cu-50 % мас. Сг та досліджено вплив температурно-часових режимів спікання зразків у водні на їхню структуру, електропровідність та механічні характеристики. Проведена кількісна оцінка регулярності мікроструктури та вивчено її зв'язок із фізичними властивостями спеченого матеріалу.

Встановлено оптимальні режими змішування, спікання та гарячої штамповки, які дозволяють отримати матеріал із підвищеними механічними характеристиками у порівнянні з промисловими зразками. Встановлено, що гаряча штамповка, проведена після рідкофазного спікання, сприяє формуванню структури з розподілом складових близьким до регулярного. Розраховані коефіцієнти кореляції вказують на достатньо високу вірогідність функціонального зв'язку між показником регулярності та питомою електропровідністю та механічними характеристиками матеріалу.

#### Література:

1. Slade Paul G. The vacuum interrupter – theory, design, and application / P. G.Slade.- Boca Raton, London, New York: CRC Press, 2008.- 510 p.
2. Лафферти Д. Вакуумные дуги. Теория и приложения. – М: Мир, 1988 - 428 с.
3. Францевич И.Н. Материалы электрических контактов. Лекции Всесоюзной школы по электрическим контактам и электродам: в 2-х частях. 1969. Ч.1. С. 3–37.
4. Чернявский К.С. Стереология в металловедении.– М.: Металлургия, 1977. – 268 с.
5. Хоменко О.І., Хоменко О.В. Використання програмного комплексу АМІС для кількісної металографії /О.І.Хоменко // Математичні моделі та обчислювальний експеримент в матеріалознавстві. Вип.16: Праці Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М.Францевича НАН України. - Київ: ІПМ НАНУ, 2014. – С. 35-42
6. Merkus Henk G.. Particle Size Measurements: Fundamentals, Practice, Quality. Springer, 2012. - 344 p.
7. Леонов М.П., Бочвар Н.Р., Иванченко В.Г. Диаграмма состояния хром–медь. // Доклады академии наук СССР. 1986.– Т.290, №4, – С. 888–890.
8. Falconer K. Fractal Geometry: Mathematical Foundations and Applications / K.Falconer. - New York: John Wiley & Sons, 1990. - 288 p.
9. Хоменко О.І., Баглюк Г.А. Кількісний показник регулярності мікроструктури матеріалу / О.І.Хоменко //Наукові нотатки: Міжвузівський збірник (за галузями знань "Технічні науки"). Вип. 49. – Луцьк: ЛНТУ, 2015.- С. 155 – 159.
10. Дорофеев Ю.Г., Гасанов Б.Г., Дорофеев В.Ю. и др. Промышленная технология горячего прессования порошковых изделий. М. Металлургия, – 1990, – 206 с.

Стаття надійшла до редакції 04.05.2017