

## Порівняльний аналіз властивостей порошків сплавів Cu—S та Cu—P пічного синтезу.

### 2. Фактори форми та розмір частинок

О. К. Радченко, О. І. Гетьман, Л. О. Радченко, А. І. Іценко,  
В. О. Кривошея\*

Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН  
України, Київ, e-mail: arradch@ipms.kiev.ua

\*Національний технічний університет України "Київський політехнічний  
інститут"

*Проведено порівняльний аналіз факторів форми та розміру частинок порошків сплавів Cu—S та Cu—P, одержаних з використанням вихідного порошку міді марки ПМС-1. Визначено фактори круглості, компактності, подовженості, порізаності та середній діаметр Фере порошків чистої міді та сплавів. Показано, що завдяки використанню вихідного порошку з високою формованістю, середньотемпературному пічному синтезу та низькоенергетичним методам подрібнення продуктів синтезу навіть при частковому оплавленні та зміні форми частинок вдалось одержати порошки сплавів Cu—S та Cu—P, що мали високу формованість. У процесі синтезу та подальшого подрібнення синтезованого продукту відбувалося часткове руйнування дендритної структури вихідного порошку, про що свідчить зменшення середнього діаметра Фере (Cu — 44,8 мкм, Cu—S — 9,5 мкм, Cu—P — 12,2 мкм).*

**Ключові слова:** порошок, сплави Cu—S та Cu—P, фактори форми та розмір частинок.

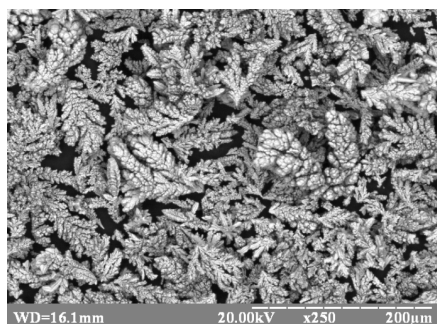
Актуальність, стан питання, хімічний склад, мікротвердість та пресованість порошків чистої міді і сплавів Cu—S та Cu—P розглянуті у попередній роботі [1].

Метою запропонованого дослідження є порівняльний аналіз факторів форми та розміру частинок вихідного мідного порошку і порошків сплавів Cu—S та Cu—P, одержаних пічним синтезом.

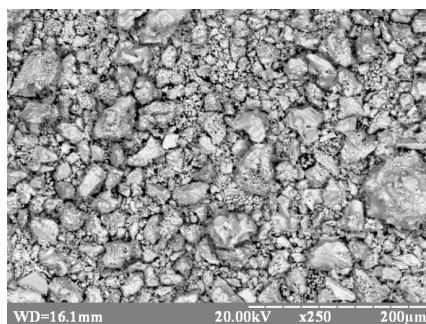
При використанні звичайного оптичного мікроскопа для прямого дослідження частинок порошків не вдається спостерігати їх форму з причини розфокусування різних точок криволінійної поверхні окремої частинки, тому вивчали їх перетини на заздалегідь виготовлених шліфах. Об'ємне зображення частинок одержували за допомогою електронного мікроскопа. Для цього окремі частинки порошків наносили на поверхню липкої вуглецевої стрічки. Для зручного порівняння частинок всі електроннографії виконані з однаковим збільшенням у 250 разів. Навіть при невеликому збільшенні електронного мікроскопа чітко видно зміну форми частинок після синтезу (рис. 1, а—в).

Частинки міді представляють собою дендритні гілки, зібрані у так звані розетки (рис. 1, а). Після синтезу та дезагрегації синтезованого продукту з'являється велика кількість мілкої фракції. Більший її вміст спостерігається

© О. К. Радченко, О. І. Гетьман, Л. О. Радченко, А. І. Іценко,  
В. О. Кривошея, 2014

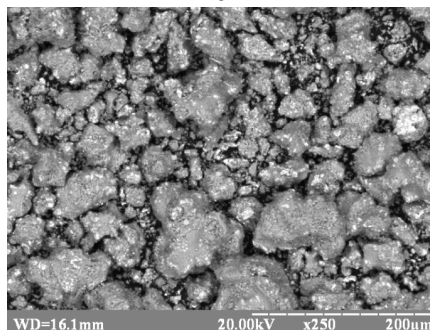


*a*



*б*

Рис. 1. Електронографічні зображення частинок вихідного порошку міді електролітичної (*a*) та одержаних при синтезі порошоків сплавів Cu—S та Cu—P (*б, в*).



*в*

у порошку сплаву Cu—S (рис. 1, *б*).

Електронографічні зображення можуть бути використані для кількісної оцінки форми лише після усунення ефекту перекриття проекцій окремих частинок. Така процедура є доволі складною, тому для вивчення кількісних параметрів форми використовували металографічні зображення шліфів та комп'ютерну програму SIAMS-600 для їх обробки [2]. В якості показників форми вибрані нормовано фактори круглості, компактності, подовженості, порізаності та середній діаметр Фере, які визначали за допомогою означеної програми. Чим менша величина такого фактора, тим більше форма зображення відрізняється від кола, для якого всі фактори дорівнюють 1. Для кожного фактора форми розраховували найменше та найбільше значення, просте середнє арифметичне, медіану та середньоквадратичне відхилення (СКВ). Враховуючи на те, що форму частинок порівнювали з об'ємними характеристиками порошку (відносною насипною густиною та балом формованості [3]), будували номограми та розраховували середнє не частотного розподілу, а об'ємних процентів частинок певної форми.

На рис. 2 представлено металографічні зображення частинок Cu, сплавів Cu—S та Cu—P до (*a—в*) та після (*г—е*) обробки за допомогою комп'ютерної програми Adobe Photoshop. Оброблені зображення не мали між собою взаємних контактів і дозволяли провести якісний комп'ютерний обрахунок за допомогою програми SIAMS-600. Частинки сплавів Cu—S та Cu—P (*д, е*) для кращої їх обробки представлені у вигляді обернутих зображень. Результати обробки металографічних зображень та розрахунку факторів форми частинок наведені в таблиці.

Фактори форми перетинів частинок сплавів Cu—S та Cu—P суттєво збільшилися (форма спростилася) у порівнянні з частинками міді. Деякі максимальні значення факторів форми перевищують одиницю, що може бути викликане похибкою при їх розрахунку. Великі значення середньоквадратичного відхилення свідчать про високу варіативність розрахованих показників.

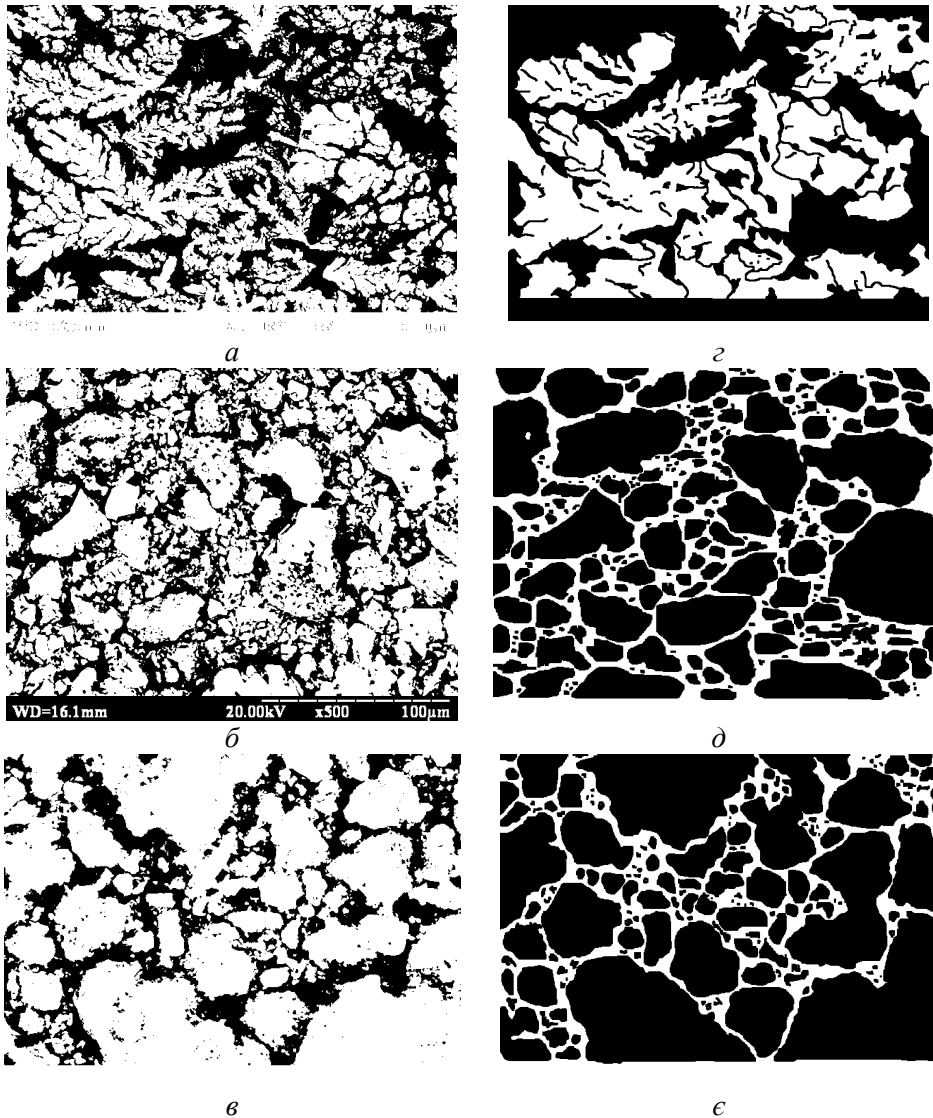


Рис. 2. Металографічні зображення частинок Cu, сплавів Cu—S та Cu—P до (а—в) та після (г—е) обробки програмою Adobe Photoshop.

При синтезі сплаву Cu—S та наступному подрібненні утвореного продукту частина дендритів міді оплавлялася та руйнувалася, відповідно змінювався фактор круглості самих частинок (рис. 3, а). Збільшувалася об'ємна доля частинок з фактором круглості 0,85—0,95. Незважаючи на різні термодинамічні умови утворення сульфідів міді  $\text{Cu}_2\text{S}$  (380 кДж/моль [4]) та фосфіду міді  $\text{Cu}_3\text{P}$  (119,24 кДж/моль [5]), отримані порошки мають близькі фактори круглості (рис. 3, а, б), що зумовлено використанням однакового вихідного порошку та незначним оплавленням частинок під час синтезу. Як встановлено раніше [6], фактор круглості для компактних частинок корелює з балом формованості.

Фактор порізаності контура показує в нашому випадку, як змінився контур перетинів частинок одержаних сплавів внаслідок оплавлення їх при синтезі (рис. 4). Більша об'ємна доля частинок сплавів Cu—S і Cu—P

### Фактори форми частинок порошків Cu, сплавів Cu—S та Cu—P

Фактор*	Порошок	Значення					Кількість досліджених частинок
		min	max	середнє	медіанне	СКВ	
Круглості	Cu	0,219	1,182	0,518	0,44	0,218	19
	Cu—S	0,376	0,987	0,853	0,884	0,106	195
	Cu—P	0,433	0,981	0,829	0,86	0,112	136
Компактності	Cu	0,292	0,806	0,549	0,583	0,139	19
	Cu—S	0,448	0,902	0,751	0,77	0,086	195
	Cu—P	0,256	0,902	0,739	0,755	0,1	136
Подовженості	Cu	0,301	1	0,615	0,636	0,177	19
	Cu—S	0,345	1	0,755	0,774	0,15	195
	Cu—P	0,149	1	0,747	0,76	0,148	136
Порізаності контуру	Cu	0,312	1,333	0,687	0,635	0,264	19
	Cu—S	0,55	1,103	0,983	0,989	0,088	195
	Cu—P	0,573	1,101	0,965	0,978	0,091	136
Діаметр Фере, мкм	Cu	0,479	127,1	44,889	37,456	33,862	19
	Cu—S	1,438	76,93	9,535	5,929	10,878	195
	Cu—P	1,438	109,9	12,228	5,716	17,569	136

\*Величини факторів безрозмірні.

має значення цього фактора 0,75. Тобто в результаті збільшення твердості ( $\text{Cu}_2\text{S}$  — 1364 МПа,  $\text{Cu}_3\text{P}$  — 2162 МПа) та ламкості частинок отримуємо менше та більш стабільне значення фактора порізаності контура.

При синтезі порошків відбувається також зміна фактора компактності, який є відношенням квадратів фактора круглості до фактора порізаності (рис. 5). Для частинок порошку сплаву Cu—S середнє значення цього фактора становить 0,751, а для Cu—P — 0,739.

Як показують номограми розподілу діаметра Фере частинок сплавів (рис. 6, а, б), для Cu—S він більший, ніж для порошку чистої міді, а для Cu—P — менший.

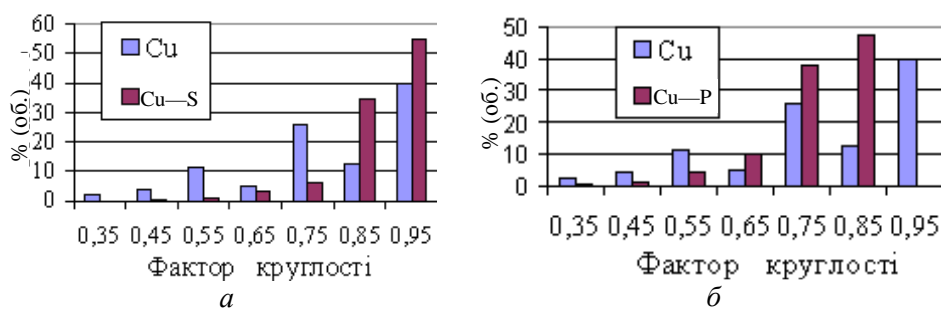


Рис. 3. Фактори круглості для Cu і Cu—S (а) та Cu і Cu—P (б).

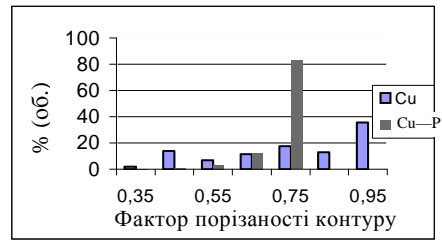
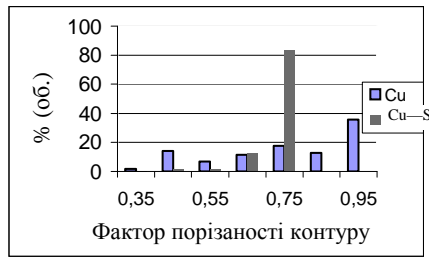


Рис. 4. Фактори порізаності контуру Cu і Cu—S (а) та Cu і Cu—P (б).

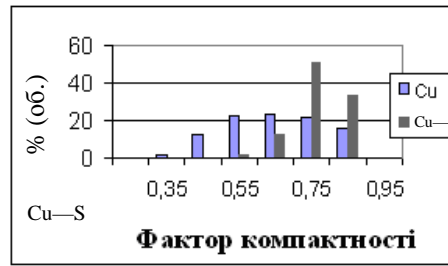
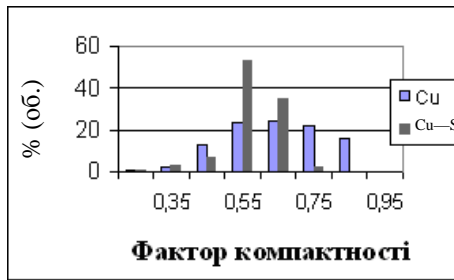


Рис. 5. Фактори компактності для Cu і Cu—S (а) та Cu і Cu—P (б).

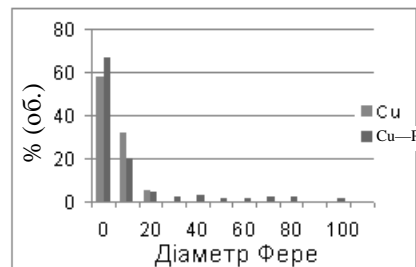
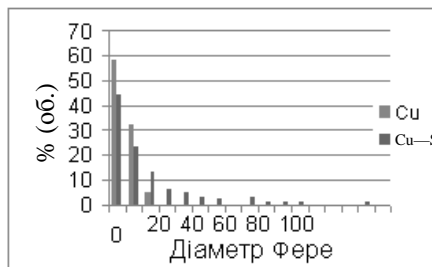


Рис. 6. Діаметри Фере для Cu і Cu—S (а) та Cu і Cu—P (б).

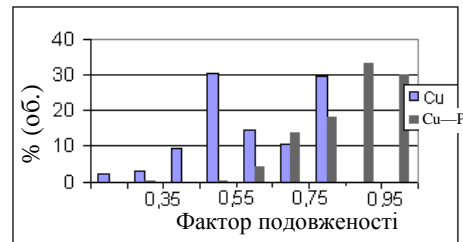
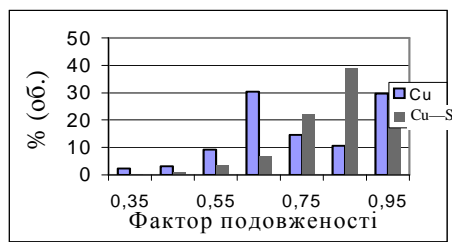


Рис. 7. Фактори подовженості для Cu і Cu—S (а) та Cu і Cu—P (б).

Фактор подовженості пов'язаний з діаметром Фере і виражається як зворотня величина відношення максимального до перпендикулярного до нього діаметрів Фере плоскої проекції частинки (рис. 7, а, б). Середня величина фактора подовженості перетинів частинок для Cu—S складає 0,755, для Cu—P — 0,747.

## Висновки

Визначальними факторами, що впливають на форму та розмір частинок порошків синтезованих сплавів Cu—S та Cu—P, є оплавлення частинок дендритної форми під час синтезу та руйнування залишків дендритів при подрібненні синтезованого продукту.

У процесі синтезу та подальшого подрібнення синтезованого продукту відбувається часткове руйнування дендритної структури вихідного порошку, про що свідчить зменшення середнього діаметра Фере (Cu — 44,8 мкм, Cu—S — 9,5 мкм, Cu—P — 12,2 мкм).

При синтезі та подрібненні змінилися фактори форми частинок. Так, фактор круглості, що найкраще корелює з балом формованості, змінився від 0,518 (у частинок порошку міді) до 0,853 та 0,829 (у частинок порошків синтезованих сплавів Cu—S та Cu—P відповідно).

Фактор порізаності контура частинок також погіршився з 0,687 для міді до 0,983 та 0,965 для сульфїду та фосфїду міді відповідно, що вказує на часткове оплавлення дендритних гілок під час синтезу.

1. Радченко О. К. Порівняльний аналіз властивостей порошків сплавів Cu—S та Cu—P пічного синтезу. 1. Хімічний склад, мікротвердість та пресованість порошків / [О. К. Радченко, Л. О. Радченко, Ю. М. Романенко та ін.] // Современные проблемы физического материаловедения. — К. : Ин-т пробл. материаловедения НАН Украины. — 2014. — Вып. 23. — С. 202—207.
2. SIAMS-600. Анализатор изображения. — Екатеринбург, 1998. — 120 с.
3. Радченко О. К. Визначення формуємості порошку за допомогою балу формуємості / О. К. Радченко К. О. Гогаєв, М. Г. Аскеров // Зб. наук. праць "Вісник Донбаської державної машинобудівної академії". — Краматорськ. — 2007. — № 1 (7). — С. 28—33.
4. Саниева Д. В. Механохимический синтез сульфидов / Д. В. Саниева, В. К. Половняк, Р. Я. Дебердеев // Вестник Удмуртского ун-та. — 2005. — № 8. — С. 117—122.
5. Гордиенко С. П. Термодинамические характеристики твёрдых бинарных фосфидов. — Киев, 1987. — 50 с. — Препр. / Ин-т проблем материаловедения НАН УССР; № 15.
6. Радченко О. К. Кореляції між балом формованості порошку, показником міцності пресовок та середньою величиною фактора круглості частинок порошку // Современные проблемы физического материаловедения. — К. : Ин-т пробл. материаловедения НАН Украины. — 2009. — Вып. 18. — С. 79—83.

## Сравнительный анализ свойств порошков сплавов Cu—S и Cu—P печного синтеза.

### 2. Факторы формы и размер частиц

А. К. Радченко, О. И. Гетьман, Л. А. Радченко, А. И. Иценко,  
В. А. Кривошея

*Проведен сравнительный анализ факторов формы и размера частиц порошков сплавов Cu—S и Cu—P, полученных с использованием исходного порошка меди марки ПМС-1. Определены факторы круглости, компактности, удлинённости, изрезанности и средние диаметры Фере порошков чистой меди и сплавов. Показано, что благодаря использованию исходного порошка с высокой*

*формуемостью, среднетемпературному печному синтезу и низкоэнергетическим методам измельчения продуктов синтеза даже при частичном оплавлении и изменении формы частиц удалось получить порошки сплавов Cu—S и Cu—P с высокой формуемостью. В процессе синтеза и последующего измельчения синтезированного продукта происходило частичное разрушение структуры дендритного исходного порошка, о чем свидетельствует уменьшение среднего диаметра Фере (Cu — 44,8 мкм, Cu—S — 9,5 мкм, Cu—P — 12,2 мкм).*

**Ключевые слова:** порошок, сплавы Cu—S и Cu—P, факторы формы частиц, размер частиц.

## **Comparative analysis of the properties of powders of alloys of Cu—S and Cu—P and furnace synthesis.**

### **2. The form factors and particle size**

*O. K. Radchenko, L. O. Radchenko, O. I. Het'man, A. I. Itsenko, V. O. Krivosheya*

*Comparative analysis of factors shape and particle size of the powders of alloys of Cu—S and Cu—P, obtained using the original copper powder brand ПМС-1. The factors roundness, compactness, odourant, notched and the average diameter of the sphere of pure copper powders and alloys was identified. It is shown that through the use of original powder with high formability, middle temperature furnace synthesis and low-energy methods of grinding products synthesis even at partial melting and change the shape of the particles was able to obtain powders of alloys of Cu—S and Cu—P, have high formability. In the process of synthesis and subsequent pulverization of the synthesized product was partial destruction of the dendritic structure of the source powder, as evidenced by the reduction in the average diameter of the sphere (Cu — 44,8 μm, Cu—S — 9,5 μm, Cu—P — 12,2 μm).*

**Keywords:** powder, alloy Cu—S, Cu—P alloy, shape factor of the particles, size of particles.