

УДК 621.762: 669.27

Т.А. Єпіфанцева, Ю.М. Солонін, О.В. Власова, А.Ю. Коваль

Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України

ЗАЛЕЖНІСТЬ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ НЕ СПЕЧЕНИХ ВИРОБІВ ГЕТЕРОГЕННОГО СКЛАДУ НА ОСНОВІ МІДІ ВІД ВЛАСТИВОСТЕЙ КОМПОНЕНТІВ ВКЛЮЧЕНЬ

Досліджено і встановлено залежність фізико-механічних властивостей гетерогенного матеріалу на основі пластичної матриці від розміру і властивостей частинок включень. Показано, що модуль пружності гетерогенного матеріалу на основі системи мідь - свинець становить 9,4 ГПа, а на основі мідь - вольфрамовий сплав 27,0 ГПа. Методами растрової мікроскопії та рентгеноструктурного аналізу вивчено структуру пресовок гетерогенного матеріалу. Встановлено, що структура не спеченого матеріалу характеризується локальним розподілом конгломератів важких частинок включень вольфрамового сплаву в мідній матриці і для свинцю - в порах. Показано, що використання методики визначення «ступеня матричності» структури гетерогенного матеріалу дозволяє оптимізувати пошуковий експеримент для досягнення технологічної міцності не спеченого порошкового виробу гетерогенного складу.

Ключові слова: холодно-пресовані вироби, структура гетерогенного матеріалу, фізико-механічні властивості.

Табл. 1. Рис. 3. Літ. 11.

Т.А. Епифанцева, Ю.М. Солонин, А.В. Власова, А.Ю. Коваль

ЗАВИСИМОСТЬ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НЕ СПЕЧЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ ГЕТЕРОГЕННОГО СОСТАВА НА ОСНОВЕ МЕДИ ОТ СВОЙСТВ КОМПОНЕНТОВ ВКЛЮЧЕНИЙ

Исследована и установлена зависимость физико-механических свойств гетерогенного материала на основе пластической матрицы от размера и свойств частиц включений. Показано, что модуль упругости гетерогенного материала на основе системы медь – свинец составляет 9,4 ГПа, а на основе медь – вольфрамовый сплав 27,0 ГПа. Методами растровой микроскопии и рентгеноструктурного анализа изучена структура пресовок гетерогенного материала. Установлено, что структура не спеченного материала характеризуется локальным распределением конгломератов тяжелых частиц включений вольфрамового сплава в медной матрице и для свинца – в порах. Показано, что использование методики определения «степени матричности» структуры гетерогенного материала позволяет оптимизировать поисковый эксперимент для достижения технологической прочности не спеченного порошкового изделия гетерогенного состава.

Ключевые слова: не спеченные пресовки, структура гетерогенного материала, физико-механические свойства

Т.А. Epifantseva, Yu.M. Solonin, O.V. Vlasova, A.Yu. Koval

DEPENDENCE OF PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES OF NON-SPECIFIC PRODUCTS OF HETEROGENIC COMPOSITION ON THE BASIS OF THE MASS FROM THE INCLUSIVE COMPONENT PROPERTIES

The dependence of the physic-mechanical properties of the heterogeneous material on the physicochemical properties of the component of inclusions was found. The dependencies of the physic-mechanical properties of the heterogeneous material and the structural features of the material of the compacts on the size and properties of the particles of inclusions are found. It is shown that the modulus of elasticity of a heterogeneous material based on the copper-lead system is 9.4 GPa, and based on the copper - a tungsten alloy of 27.0 GPa.

The higher the initial properties of the inclusion component, the higher the elastic modulus of the heterogeneous material based on the plastic matrix. Using the methods of scanning microscopy and X-ray diffraction analysis, the presence of defects in the structure of the heterogeneous material of the compact is found to depend on the properties and size of the particles of heavy inclusions. The feature of the distribution of particles of the component of inclusions of lead and tungsten alloy in the matrix of plastic material of copper is revealed. The segregation of copper particles and the formation of conglomerates of tungsten alloy particles, which are located between the sectors of bonded copper particles that make up the pressing matrix, were found. The influence of the physicochemical properties of the component of inclusions on the physic-mechanical properties of a heterogeneous material has been established.

It is shown that the use of the methodology for determining the “degree of matrixity” of the structure of a heterogeneous material allows optimizing the search experiment to achieve the technological strength of an unsintered powder article of heterogeneous composition.

Key words: cold-pressed compact, heterogeneous composition, structure.

Вступ. Використання унікальних властивостей композиційних порошкових матеріалів у сфері високих швидкостей (2000 – 10000 м/с), тисків (~ 1000 МПа) і температур (понад 2000 °С), вимагає створення матеріалів із специфічними властивостями та певною структурою. Як відомо, ефективно використання порошкового матеріалу з необхідним комплексом властивостей досягається за рахунок підбору компонентів суміші, способу формування певної структури виробу з набором технологічних і фізико-механічних властивостей [1]. Підвищення ефекту проникнення

кумулятивного струменя неможливо без створення облицювань певної структури з необхідними характеристиками: розмір та орієнтація зерна в матеріалі та рівномірність розподілу компонентів в об'ємі матриці [2]. У практиці кумуляції традиційно застосовуються облицювання з композиційного матеріалу на основі міді, яка має достатню в'язкість і пластичність та здатна формувати суцільний кумулятивний струмінь забезпечуючи пробивну дію перешкоди [3, 4].

Для підвищення дії кумулятивних зарядів перспективним є створення порошкового облицювання з технологічно міцного не спеченого композиційного матеріалу на мідній основі, що містить в складі суміші компоненти важкої фази. На даний час не встановлено вплив фізико-хімічних властивостей компонента важкої фази (легкоплавкого або тугоплавкого матеріалу) на формування структури і фізико-механічні властивості порошкових не спечених пресовок гетерогенного складу.

Використання на практиці, важких сплавів на основі вольфраму ($W - 7 \% Ni - 3 \% Fe$) замість свинцю і сталей основане на підвищенні міцності вольфрамового сплаву ($\sigma_p = 1200 \text{ МПа}$), з достатнім запасом пластичності (відносно подовження – 10 %) і великою питомою вагою ($17,7 \text{ г/см}^3$). Виготовлення вольфрамового сплаву методом порошкової металургії полягає в наступних технологічних операціях: мокре змішування, спільне відновлення оксидів складових сплаву в необхідній пропорції. Газовий і температурний режими відновлення забезпечують високу дисперсність і рівномірний розподіл компонентів сплаву. Отримані вироби мають щільність близьку до теоретичної [5].

На рівні мікроструктури пресований матеріал розглядається з урахуванням форми частинок порошку, наявності пор, недосконалості контактів, присутності тріщин. Порошкові матеріали гетерогенного складу, які досліджували в даній роботі не взаємодіють між собою при холодному пресуванні. Це дозволило зв'язати структурні особливості матеріалу пресованого виробу безпосередньо з фізико-механічними властивостями компонентів включень.

Однією з вимог до порошкових облицювань для подальшого їх використання в процесі виготовлення кумулятивного заряду є технологічна міцність виробу. Наявність у складі гетерогенного матеріалу важкої фази (вольфрамовий сплав або свинець) сприяє при консолідації формуванню нерівномірної структури з локальним розподілом частинок важкої фази. У зв'язку з цим доцільно вивчити міцність виробів в залежності від особливостей формування пористої структури.

На механічні та технологічні властивості порошкових виробів вирішальний вплив справляє мікроструктура матеріалів. При цьому складові компоненти шихти в структурі пресовок можуть виконувати різну роль – зміцнення або розшарування. Створення міцного каркаса у пресовках з електролітичної міді пов'язане з формою вихідних частинок (дендритна) і схемою формування [6].

Мета роботи – встановити вплив властивостей важких включень у складі гетерогенного матеріалу на основі міді на структуру і фізико-механічні властивості пресовок.

Об'єкт і методи дослідження

Дослідженню піддавали зразки на основі міді з однаковим вмістом важкої фази (склад 1 Cu – 20 % Pb, склад 2 Cu – 20 % $W_{\text{спл.}}$), спресовані за однією технологічною схемою до максимальної щільності. До складу шихт входив порошок електролітичної міді марки ПМС-1, (ГОСТ 4998-78) фракції 40 мкм, вольфрамового сплаву $W - 7 \% Ni - 3 \% Fe - 28 \text{ мкм}$ (ГОСТ 23402 -78), свинцю марки ПС1 – 50 мкм.

Зразки для досліджень виготовляли прецизійним двостороннім пресуванням (ГОСТ 29012-91) до упору з малою витримкою (менше 0,5 с) при досягненні максимального зусилля пресування на пресі П-483.

Максимальна щільність пористих прямокутних зразків – розміром 4,36 x 6,3 x 43,6 мм складала 90 %.

Методом растрової електронної мікроскопії на приладі «Superprob-733» досліджували поверхню зламу дослідних зразків. Фрактограми поверхні зламу дозволили визначити морфологію структури обумовлену властивостями компонентів включень [7].

Міцність пресовок гетерогенного матеріалу на основі міді визначається сумарною величиною контакту між частинками, що утворюють каркас виробу під дією напружень (нормальних і дотичних сил). Механічні властивості міді в литому стані: $\sigma_b = 160 \text{ МПа}$, $\sigma_{0,2} = 35 \text{ МПа}$, $\delta = 25 \%$, у гаряче-деформованому стані $\sigma_b = 240 \text{ МПа}$, $\sigma_{0,2} = 95 \text{ МПа}$, $\delta = 45 \%$. Шляхом холодного деформування межа міцності може бути підвищена до 450 МПа, модуль пружності міді – 115 ГПа.

Результати випробувань і їх дослідження

Експериментально встановлено, що присутність важких частинок у гетерогенному матеріалі впливає на фізико-механічні властивості не спеченого матеріалу виробу [8]. При дослідженні зразків на чотирьох точковий вигин згідно методики представленої в роботі [9] виявлено особливості руйнування не спечених пресовок гетерогенного складу, які обумовлені присутністю в суміші важких частинок з різними властивостями. В результаті випробувань визначені параметри не спеченого матеріалу: модуль пружності, межа міцності представлені в табл. 1.

Таблиця 1

Фізико-механічні властивості не спечених пресовок гетерогенного складу на основі міді з однаковим вмістом важких включень

Склад	Щільність суміші γ , г/см ³	Пористість, %	Межа міцності на вигин, σ , МПа	Модуль пружності, E , ГПа
1. Cu – Pb	8,84	11,1	19,5	9,4
2. Cu – W _{спл}	9,91	9,5	21,6	27,0

Аналіз результатів випробувань на вигин пористих пресовок складу 1 і 2, показав, що на процес консолідації шихти з гетерогенних частинок впливає розмір компонентів включень ($W_{\text{спл}} = 28$ мкм, $Pb = 50$ мкм). Саме за рахунок впливу розміру частинок включень в процесі консолідації відбувається формування пористої структури з різним вмістом і розташуванням пор (склад 1 $\theta = 11,1$ %, склад 2 $\theta = 9,5$ %). Близькі значення міцності матеріалів складу 1 і 2 (табл. 1), можна пояснити однаковою часткою включень важкої фази в суміші – 20 ваг %. Формування в пресовці різної кількості пір не повністю обумовлює міцність матеріалу гетерогенного складу. Встановлено, що фізико-механічні властивості матеріалу включень оказують значний вплив на фізико-механічні властивості гетерогенного матеріалу. За рахунок міцності включень можливо підвищити міцність пресовок на 10 % (склад 1 $\sigma = 19,5$ МПа, склад 2 $\sigma = 21,2$ МПа). Однак фізико-механічні властивості частинок включень більш впливають на модуль пружності гетерогенного матеріалу: $E = 9,4$ ГПа або $E = 27,0$ ГПа, для складів 1 і 2, відповідно. Різницю модуля пружності для складу 1 і 2 майже у 3 рази можна пояснити присутністю частинок із різною жорсткістю, яка відрізняються у 18 разів (модуль пружності: $E_{W_{\text{спл}}} = 320$ ГПа, $E_{Pb} = 18$ ГПа) [10].

Мікрорентгеноспектральний аналіз поверхні руйнування не спечених пресовок гетерогенного складу 1 і 2 дозволив встановити особливості структури в залежності від розміру, форми і властивостей матеріалу включень (рис. 1 – 3).

При вивченні фрактограмм поверхні пресовки складу 1 в відображених променях "схро" (рис. 1, а), встановлено нерівномірний розподіл свинцю в об'ємі пресовки (рис. 1, б). Виходячи з аналізу поверхні зламу пресовок на основі міді встановлено, що структура характеризується крихким руйнуванням мідних частинок, в'язким межзерним руйнуванням свинцевої фази.

Фрактограми пресовок, з матрицею, яка утворена частинками електролітичної міді характеризується наявністю тріщин, що поширюються від пори у глиб пресовки (рис. 1, г).

Дослідження структури поверхні пресовок складу 1 показали, що матрицю пресовок складають мідні частинки, а свинець розташований в порах (рис. 1, в, г). Відсутність контакту між мідними і свинцевими частинками, що пояснюється відсутністю їх взаємодії при кімнатній температурі. Розташування свинцевих частинок в порах може бути пояснено наявністю ефекту прослизання між частинками, що обумовлено дією дотичних напружень при додатку зусилля пресування. Висока міцність окисної плівки на поверхні свинцевої частинки дозволяє в процесі формування виробу прослизати частинкам свинцю крізь мідний простір.

Експериментально встановлено, що поверхня руйнування пресовок складу 2, на основі електролітичної міді, має змішаний крихко-в'язкий злам (рис. 2,). Виявлено їх крихкий злам, на рис. 2, б видно недеформовані частинки міді, що обумовлює невисокі значення міцності пресовок. Відрив мідних частинок йде крізь пори, збільшуючи тим самим розповсюдження тріщин по кордонам між частинками (рис. 2, а). Утворення мікро тріщин по кордонам зерен на поверхні мідних частинок (рис. 2, б) свідчить про крихке руйнування мідної частинки.

Вміст кисню на поверхні недеформованої мідної частинки становить 0,8 мас. %. Зважаючи на високу жорсткість частинок вольфрамового сплаву при консолідації порошкової суміші складу 2 руйнування і зміна форми частинок включень не відбувається.

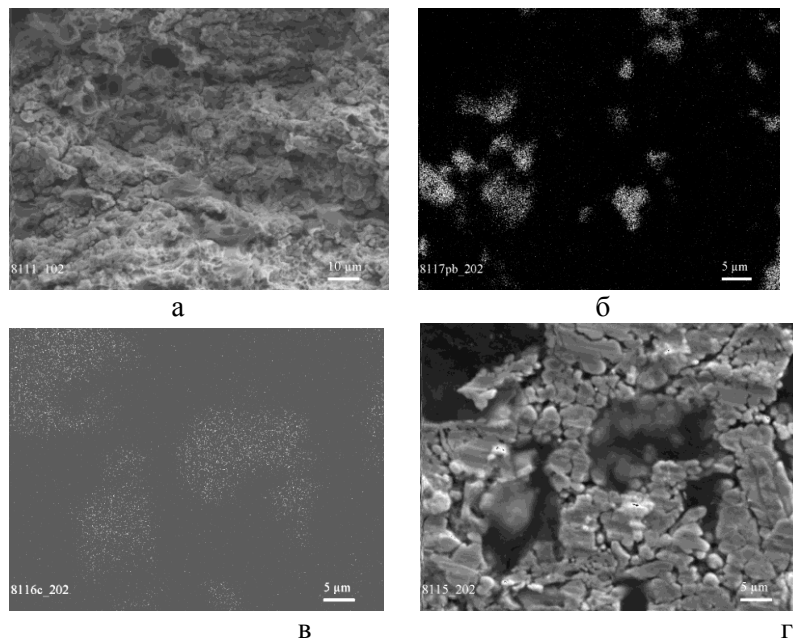


Рис. 1. Фрактограма поверхні пресовки складу 2 Cu – Pb, РЕМ: а – загальний вид, х 400; б, в – розподіл свинцю у вторинних електронах, х 2000; г – тріщини і частинки свинцю, в відображених електронах, х 1000

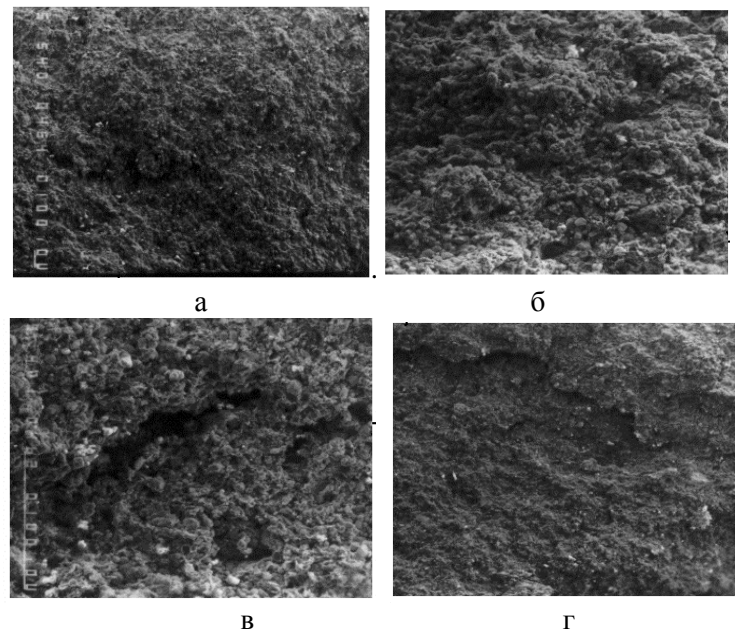


Рис. 2. Фрактограми поверхні зламу не спеченого зразка складу Cu – 20 W_{спл} SEI: а – край виробу з поверхні прикладання зусилля пресування, х 400; б – злам в районі пори х 1000; в – середина виробу, г – нижній край виробу, х 400

Вивчення фрактограм пресовок складу 2, що містять частинки вольфрамового сплаву, дозволило встановити особливості структури матеріалу рис. 2. Структура пресованого виробу гетерогенного складу складається з локальних конгломератів частинок вольфрамового сплаву, розташованих поблизу пор, самі пори залишаються порожні, рис. 2, б. Фрактограми пресовок складу 2 характеризуються наявністю глибоких пор і присутністю частинок вольфрамового сплаву на поверхні міді, рис. 2, в. Наявність пор свідчить про особливості процесу консолідації частинок важкого сплаву, які закріплюються в матриці мідних частинок дендритної форми ще в шихті та на початковій стадії ущільнення. З огляду на велику різницю питомої ваги порошків включень і матриці: вольфрамовий сплав $\gamma = 17,7 \text{ г/см}^3$ і свинець $\gamma = 13,6 \text{ г/см}^3$, мідний порошок $\gamma = 8,96 \text{ г/см}^3$, встановлено, що частинки включень розташовані нерівномірно, зі збільшенням їх вмісту вглиб ширини зразка. Наявність пор з поверхні прикладання зусилля пресування свідчить про вплив

щільності і форми часток матеріалу на процес структуроутворення, і, як наслідок, утворення дефектів у вигляді тріщин великого розміру, (рис. 2).

Наявність пор в матриці пресованого виробу з чистої міді (рис. 3) і присутність локальних скупчень конгломератів частинок вольфрамового сплаву (рис. 2) свідчить про вплив на формування властивостей матеріалу гетерогенного складу наступних чинників:

- форма частинок матриці і включень.
- рівномірність розподілу включень (якість приготування суміші);
- характер розподілу частинок включень в матриці;
- схема пресування гетерогенного матеріалу;
- питома щільність матеріалу включень;

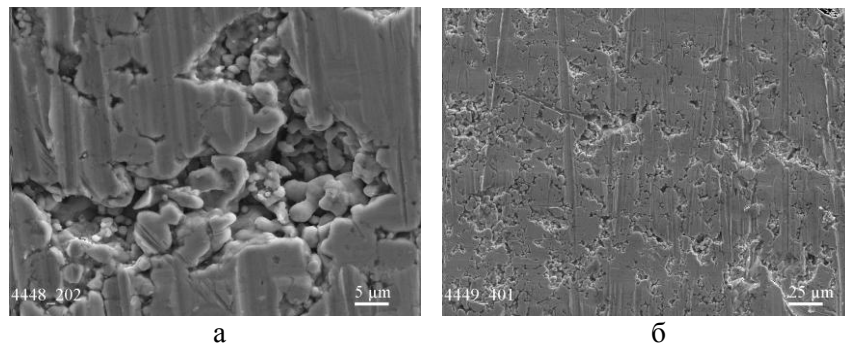


Рис. 3. Мікроструктура не спеченої порошкової пресовки чистої міді марки ПМС-1, відносна щільність $\rho = 7,48 \text{ г/см}^3$: а – розвинена поверхня кордонів всередині пори, $\times 2000$, SEI; б – локальний розподіл пор на поверхні, $\times 400$, SEI

При консолідації гетерогенної суміші відсутність прослизання частинок включень вольфрамового сплаву вздовж часток міді призводить до їх не рівномірного розташування та закріплення в матриці на початковій стадії пресування, не зважаючи на їх високу жорсткість і округлу форму.

Утворення великих скупчень з частинок вольфрамового сплаву або свинцю пояснюється розподілом цих частинок в шихті при засипці. Дослідження структури матеріалу складу 1, 2 дозволило встановити, особливість розташування включень свинцю в структурі матеріалу на основі дендритних частинок міді. При консолідації шихти свинцеві частинки через меншу питому вагу матеріалу, в порівнянні з вольфрамовим сплавом, і більший розмір частинок прослизують між частинками мідної матриці і закріплюються в порах (Pb) або конгломератами ($W_{\text{спл}}$).

У процесі формування відбувається стирання неміцної окисної плівки свинцю, що підвищує рухливість їх при докладанні зусилля. Порошковий вольфрамовий сплав у зв'язку з високими значеннями жорсткості окисної плівки і питомої ваги порошку, при формуванні структури розташовується між поверхнею мідних частинок в місцях зайнятих ще в шихті і при засипці. Локально розташовані конгломерати частинок вольфрамового сплаву сприяють підвищенню концентрації напружень в матеріалі.

Вивчення поверхні зламу складу 1 і 2 показало наявність тріщин, які розташовані вздовж площини сектора мідних частинок. Для складу 1 тріщина розташована між порами (рис. 1), в матеріалі складу 2 тріщина утворює струмок з порожніх пор, (рис. 2, г). Локальний розподіл частинок вольфрамового сплаву спостерігається уздовж всієї поверхні зразка.

Структура матеріалів щільних виробів гетерогенного складу на основі міді з включеннями важких частинок характеризується наявністю тріщин на рівні макроструктури.

Особливість формування фізико-механічних властивостей пресовок гетерогенного складу обумовлено тим, що частинки вольфрамового сплаву, які розташовані в мідній матриці, приймають на себе зусилля руйнування доданих навантажень (випробування на злам), і цим сприяють підвищенню модуля пружності матеріалу.

Локальне розташування частинок включень важкої фази вольфрамового сплаву в мідній матриці служить додатковою перешкодою для поширення тріщин, і як наслідок значення межі міцності матеріалу складу 2 в порівнянні з матеріалом складу 1 на 10 % вище, табл. 1.

Стан структури гетерогенного матеріалу в процесі отримання технологічно міцних не спечених виробів можна обчислити використовуючи підхід розрахунку «ступеня матричності» складу з урахуванням вмісту компонентів суміші [11].

«Ступінь матричності» матеріалу виробу, де g_M – частка матричності суміші в загальній системі, можна визначити шляхом стереологічного аналізу мікроструктури за допомогою співвідношень (1 – 3):

$$S_{12}^M = S_1 = \frac{A}{L_1} \theta_1, \quad (1)$$

де S_{12}^M – площа міжфазної поверхні розподілу в матричній системі,

S_1 – повна поверхня включень першої фази,

L_1 – лінійний розмір включень,

$A = 3 - 6$;

θ_2 – об'ємна доля другої фази.

При розгляді гетерогенного матеріалу як статичної системи, площа міжфазної поверхні розподілу в матричній системі – S_{12}^{CT} можна виразити співвідношенням:

$$S_{12}^{CT} = S_1 \cdot \theta_2, \quad (2)$$

Таким чином, якщо площа міжфазної поверхні є в інтервалі між значеннями S_{12}^M (1) і S_{12}^{CT} (2), тоді доля матричної суміші визначається відповідно рівняння:

$$g_M = \frac{S_{12}^{ИЗМ} \cdot \frac{L_1}{A} - \theta_1 \cdot \theta_2}{\theta_1 \cdot (1 - \theta_2)}. \quad (3)$$

Застосування такого підходу до визначення матричності матеріалу гетерогенного складу дозволяє усунути витрати на пошукові експерименти з метою досягнення технологічної міцності виробу складної форми, наприклад облицювань кумулятивних зарядів (виробів конічної форми).

Проведені дослідження структури і механічних властивостей не спеченого гетерогенного матеріалу дозволили оптимізувати технологію виготовлення порошкових облицювань малогабаритних кумулятивних зарядів.

Висновки:

В роботі встановлено, що процес консолідації матеріалу гетерогенного складу знаходиться у прямої залежності від форми частинок які формують матрицю матеріалу виробу і питомої щільності частинок важкого компонента.

Показано наявність закономірностей в формуванні структури гетерогенних матеріалів:

- наявність тріщин,
- наявність площини скріплених частинок міді,
- присутність локально розташованих конгломератів включень важких частинок.

Структура не спеченого матеріалу гетерогенного складу на основі електролітичної міді незалежно від величини питомої щільності включень важкого компонента (вольфрамового сплаву або свинцю) характеризується локальним розподілом важких частинок (свинець в порі, вольфрамовий сплав між частинками мідної матриці).

Встановлено залежність фізико-механічних властивостей гетерогенного не спеченого матеріалу на основі електролітичної міді від фізико-хімічних властивостей матеріалу включень важкої фази. Модуль пружності гетерогенних матеріалів відрізняється майже у 3 рази: $E_{Cu-Pb} = 9,4$ ГПа, $E_{Cu-Weпл.} = 27,0$ ГПа.

Встановлено, що використання методики визначення «ступеня матричності» структури матеріалу гетерогенного складу, дозволяє оптимізувати пошуковий експеримент для досягнення технологічної міцності виробу.

1. Бальшин М.Ю., Кипарисов С.С. Основы порошковой металлургии. М.: Металлургия. – 1978. – 184 с.
2. Ширшова Н.Г. Измельчение структуры медных кумулятивных облицовок//Боеприпасы. – 1982. – № 9. – С. 36-42.
3. Пельц Э.И. Прусаков Б.А. Влияние структуры металла облицовки на стабильность бронепробития кумулятивных зарядов//Вопр. спец. машиностроения, 1976. – вып. 3/22. – С. 93-97.

4. Воронина Т.И. Кайбышев О.А. Динамическая пластичность меди//Вопр. спец. машиностроения, 1981. – вып. 12/91. – С. 3-9.
5. Минакова Р.В., Сторчак Н.А., Верховодов П.А. и др. Некоторые структурные особенности фазы – связки сплавов в системе W-Ni-Fe//Порошковая металлургия. – 1980. – № 12. – С. 45-49.
6. Косторнов А.Г. Материаловедение дисперсных и пористых металлов и сплавов: В 2 т. – К.: Наукова думка, 2003. – Т.2. – 550 с.
7. Балтер М.А., Любченко А.П., Аксенова С.И. Фрактография - средство диагностики разрушенных деталей. – М.: Машиностроение. – 1987. – 157 с.
8. Епифанцева Т.А., Подрезов Ю.Н., Вербило Д.Г., Каюк В.Г., Мартюхин И.Д, Сердюк Г.Г. Влияние жесткого компонента из вольфрамового сплава на процесс формования смесей на основе медного порошка и свойства гетерогенных неспеченных прессовок//Порошковая металлургия, 2006. – № 11/12. – С. 43-50.
9. Фирстов С.А., Подрезов Ю.Н., Жердин А.Г. Особенности вязко-хрупкого перехода в порошковых материалах на основе железа//Порошковая металлургия. – 1988. – № 3. – С. 39 – 46.
10. Захаров Е.К., Калинин В.П., Рахштант Ю.А. Микропластичность. М.: Металлургия. - 1972. – 367 с.
11. Скороход В.В. Наближені методи чисельної оцінки модулів пружності композиційних і неоднорідних матеріалів // Порошковая металлургия, 2011. – № 1/2. – С. 69-75.

Стаття надійшла до редакції 05.05.2019