

studies, granulated powder of the PG-R6M5 brand with a fraction of 50...300 μm was used. As a standard, a flux-cored wire was used, in the core of which there was a composition of powders of different ferroalloys of the same fraction. The content of the charge components in the core of the standard wire was selected and calculated so as to obtain a similar chemical composition to the wire containing granulated hard alloy powder. The test samples were obtained by layer-by-layer electric arc surfacing under the flux layer with flux-cored wires on low-carbon steel plates. To obtain identical dependences, the flux-cored wires had the same diameter and filling factor and differed only in the content of the core. The test samples were deposited under the same conditions with strict adherence to the deposition regimes, which were monitored using a high-speed analog-to-digital converter. It was determined that the use of granulated hard alloy powder as a charge of flux-cored wire has a positive effect on the melting characteristics of the wire and the stability of the welding process in general in comparison with the standard reference wire, the charge of which contains ferroalloys. This effect can be explained by the greater chemical purity of the granulated powder and the uniformity of the physicochemical properties of its particles in comparison with the powders of various ferroalloys. The determined features of the melting of the wire with a charge with granulated hard alloy powder have a positive effect on the quality of the formation of the multilayer deposited metal and its structure, leading to an increase in its homogeneity, some grinding of the grain and a decrease in the number and size of microdefects, which should positively affect the operational properties of the deposited metal.

Keywords: electric arc surfacing, multilayer deposited metal, tool steels, granular hard alloy powder, ferroalloy, metal structure.

Metalozn. obrabka met. 2024, vol. 30 (111), 45-57
<https://doi.org/10.15407/mom2024.03.045>

УДК 621.762

Аналіз процесу ущільнення порошків вольфраму плакованих міддю

Поліщук К. В., аспірант, kirillpolishchuk25@gmail.com,
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-2309-1990>

Мініцький А. В., доктор технічних наук, професор, професор кафедри,
aminitsky@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5767-4071>

Національний технічний університет України «Київський політехнічний
інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

В роботі проаналізовано процес ущільнення композиційного порошку системи вольфрам – мідь шляхом застосування математичних рівнянь, що описують процеси деформації пористого тіла, як залежність щільності від тиску пресування. Розглянуто декілька теоретичних залежностей, що описують різні механізми пресування з урахуванням сучасних підходів, а саме дискретно-контактна модель та модель суцільного середовища.

Проаналізовано найбільш відомі рівняння, до яких відносяться рівняння Бальшина М. Ю., Ждановича Г. М. та Штерна М. Б. Встановлено, що більшість з них мають обмежену застосовність, залишаючись справедливими для окремих етапів процесу пресування та суттєво залежать від механічних властивостей матеріалу, що визначають перевагу пружної або пластичної деформації. При цьому більшість рівнянь орієнтовані на однокомпонентні порошки, що не відповідає практиці процесів отримання порошкових деталей. Для перевірки теоретичних залежностей отримано порошок вольфраму плакований міддю методом хімічного осадження із розчину. Встановлено технологічні параметри процесу плакування (склад, концентрація розчину та час осадження), що визначають якість отриманих покриттів. Досліджено морфологію частинок плакованих порошків та структуру пресовок вольфрам-мідь. Показано, що порошок вольфраму утворює відносно щільний каркас з мідним прошарком, відповідно, структура пресовок із композиційного порошку є наближеною до суцільного середовища і цілком коректно описується рівнянням, яке оснований на теорії суцільності середовища, що піддається стисканню. Встановлено, що процес ущільнення порошку вольфраму плакованого міддю відрізняється від деформації однокомпонентного порошку вольфраму, що зумовлено суттєвим впливом механізму пластичної деформації завдяки прошарку міді на частинках порошку вольфраму.

Ключові слова: вольфрам, мідь, плакований порошок, хімічне осадження, пресування, рівняння.

Важкі сплави системи вольфрам – мідь мають унікальне поєднання властивостей пов'язаних з високими електричною провідністю, ерозійною стійкістю та питомою вагою, що робить їх перспективними при виготовленні контактів для високовольтних вимикачів, електродів, терморегулюючих пристроїв та виробів військового призначення [1-3]. Для виготовлення важких сплавів W-Cu використовують технології порошкової металургії, що забезпечують поєднання компонентів з різними температурами плавлення [4-6]. Проте, застосування чистих вихідних порошків має недоліки, пов'язані як з їх високою вартістю, так і нерівномірним розподілом легуючих елементів під час механічного змішування. Це зумовлено великою різницею густини міді порівняно з вольфрамом, що ускладнює процес легування і забезпечення рівномірного розподілу легуючих компонентів по об'єму матеріалу [7]. В практиці порошкової металургії зазвичай застосовують два підходи, що забезпечують гомогенізацію сумішей – механічне та хімічне легування [8]. Найбільш широко застосовується механічне легування, перевагою такого підходу є простота технологічного процесу та можливість застосування уніфікованого обладнання. Однак, разом з цим для досягнення високої якості змішування, процес механічного легування вимагає використовувати високоенергетичні млини, до яких відносяться планетарний та атриторий, що збільшує енергозатрати отримання суміші. Відомо, що інтенсивне механічне легування знижує температуру плавлення міді та забезпечує її розподіл у вигляді тонких прошарків, що покращує ущільненість порошків [9]. До того ж, механічне легування сприяє інтенсифікації процесу спікання за рахунок утворення напруженого стану та накопичення дислокацій в результаті процесів пластичної деформації під час тривалого розмелу [10]. Хімічне легування порошків шляхом відновлення із розчинів солей забезпечує більш високу якість розподілу легуючих елементів. При цьому

існують різні способи нанесення мідного покриття на частинки порошку вольфраму, серед яких поширеними є електролізний, гальванічний, вакуумне CVD випаровування [11-13] тощо. Однак не всі методи отримали практичне застосування, наприклад, метод вакуумного CVD покриття має низьку продуктивність, нанесення гальванічних покриттів вимагає попередню обробку електропозитивного порошку вольфраму. Відповідно, одним з найбільш універсальних методів нанесення мідного покриття на частинки порошоків є хімічне осадження шляхом відновлення солей металів із розчинів [14]. Нанесення покриття на частинки порошку вольфраму змінює його фізичні та фізико-технологічні властивості, що принципово міняє характер консолідації композиційного порошку як на стадії пресування, так і спікання [15]. Слід зазначити, що етап пресування визначає властивості порошкових виробів, оскільки формування високощільних пресовок з мінімальною кількістю дефектів забезпечує якість отриманих деталей. Тому для вибору оптимальних технологічних параметрів при статичному пресуванні слід проаналізувати процес деформації композиційного порошку системи вольфрам – мідь за допомогою відомих математичних рівнянь, які описують процес деформації порошкового тіла через залежність щільності від прикладеного тиску пресування. На сьогодні існують різні теоретичні підходи, що описують процес ущільнення пластичних або крихких матеріалів, при цьому багато рівнянь було підтверджено емпіричним шляхом, тобто математичною обробкою експериментальних даних, що забезпечує високу точність процесу компактування для конкретних порошоків [16]. Більшість відомих математичних залежностей щільності від тиску пресування встановлено для однокомпонентних порошоків, при цьому застосовують два основних підходи: дискретно-контактну модель та модель суцільного середовища [17]. Враховуючи, що композиційні порошки складаються з компонентів, які мають різні властивості, насамперед пластичність та міцність, процес ущільнення для них буде принципово відрізнятися від компактування однокомпонентних порошоків, що потребує ретельного аналізу.

Метою даної роботи є визначення механізму деформації композиційного порошку вольфраму, який покритий міддю та встановлення закономірностей процесу компактування двокомпонентного порошку відповідно до сучасних підходів, що застосовуються в порошковій металургії.

Застосовували порошок вольфраму марки ПВ1 (ТУ 48-19-72-92) та порошок міді марки ПМС-1 (ДСТУ 4960:2019). Для процесу хімічного осадження порошку вольфраму у лужному середовищі використовували сульфат міді $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, гліцерин та їдкий натрій, відновник – розчин формальдегіду ($30\text{--}40 \text{ мг/дм}^3$). Процес осадження, що реалізується за кімнатної температури, оснований на відновленні міді з її комплексної солі за допомогою формаліну із забезпеченням $\text{pH} > 11$, що корегували шляхом додавання 25 % розчину аміаку [14]. Для приготування розчину в одній ємності з дистильованою водою розчиняли сульфат міді, в інший розчиняли їдкий натрій і гліцерин. Після чого перший розчин виливали в другий та ретельно перемішували. В процесі реакції виділяється осад гідроксиду міді, що реагує із гліцерином та утворенням розчину гліцерату міді. Для стабілізації

розчину використовували тіомочевину в кількості $0,1 \text{ моль/дм}^3$. Перед введенням порошку вольфраму до розчину його знежирювали у бензині та сушили за температури $60 \text{ }^\circ\text{C}$. З метою забезпечення контакту частинок порошку вольфраму з розчином, порошок ретельно перемішували мішалкою із частотою $15\text{-}20 \text{ об/хв}$, що забезпечує рівномірність нанесення мідного покриття. Час осадження складав від 60 до 120 хв. Аналіз хімічного складу вихідних та композиційних вольфрамових порошків проводили за допомогою рентгенофлюориметра EXPERT 3L (Україна). Дослідження структури пресовок та морфології частинок проводили на скануючому електронному мікроскопі SELM-106 (Україна). Компактування порошків проводили у сталевій матриці з робочим діаметром 10,0 мм на гідравлічному пресі ПГ-50 в діапазоні тисків 300-800 МПа. Пресовки обміряли та зважували і розраховували щільність та пористість згідно ДСТУ 2738:2009, при цьому було враховано, що теоретична щільність вольфраму становить $19,25 \text{ г/см}^3$, а плакованого порошку при перерахунку на вміст міді становить $18,41 \text{ г/см}^3$.

Було отримано частинки порошку вольфраму з мідним покриттям (рис. 1). Як показали результати металографічного аналізу, плакування частинок вольфраму змінює форму та морфологію порошку, при цьому, встановлено відмінність товщини покриття на різних ділянках порошку, що зумовлено різною питомою поверхнею вихідних частинок вольфраму. Відповідно, на частинках, що мають більш розвинену поверхню, спостерігається суцільний шар покриття. Нерівномірність або відсутність покриття на деяких частинках зумовлено обмеженням контакту порошку з розчином, що пов'язано із особливістю процесу перемішування частинок.

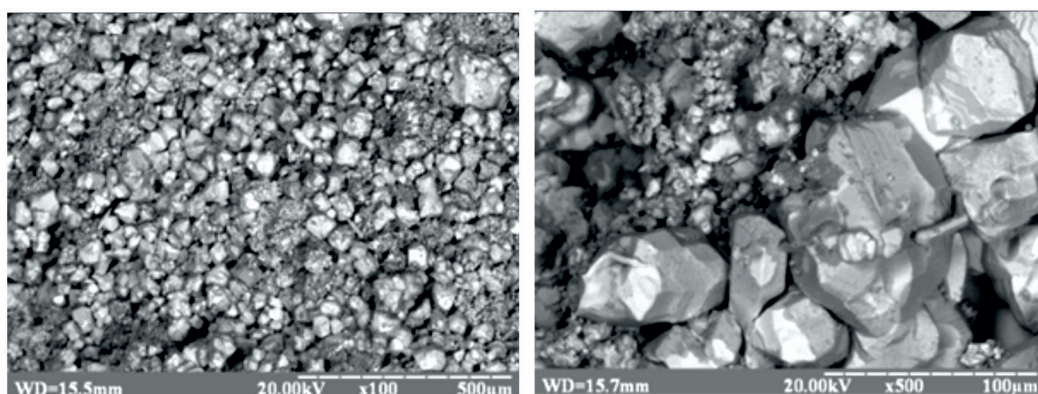


Рис. 1. СЕМ зображення частинок порошку вольфраму плакованого міддю.

Fig. 1. SEM image of copper clad tungsten powder particles.

За результатами хімічного аналізу встановлено, що плакування міддю призводить до зміни хімічного складу порошку вольфраму (табл. 1). Плакування міддю забезпечує вміст останньої близько 4,5-4,7 % після осадження протягом 120 хв.

Для аналізу процесу ущільнення порошкових систем застосовуються різні теорії, при цьому немає жодної універсальної залежності, яка б описувала ущільнення як функцію від тиску, багато рівнянь вводять певні

Таблиця 1

Хімічний склад вихідного порошку вольфраму та порошку вольфраму плакованого міддю

Table 1

Chemical composition of raw tungsten powder and copper clad tungsten powder

Елемент	Мас. частка, %	
	W	W – Cu
W	99.482 ± 0.046	94.538 ± 0.027
Cu	0.043 ± 0.016	4.721 ± 0.117
Інші	0.475 ± 0.053	0.741 ± 0.098

припущення, що обумовлено комплексом фізичних явищ, які зазнають змін в процесі деформації пресовки [18].

Одним із таких рівнянь що, мають певні припущення та закони, яким підпорядковується порошкова дискретна система є перше рівняння пресування Бальшина М. Ю. [19]:

$$\lg p = -L(\beta - 1) + \lg p_{\max} \quad (1)$$

де $p_{\max}$ – тиск, що відповідає максимальному ступеню ущільнення, тобто $\beta=1$; β – відносний об'єм пресовки; L – чинник пресування.

Розв'язок даного рівняння передбачає знаходження коефіцієнтів L , β , $\lg p_{\max}$. Для визначення даних коефіцієнтів необхідно побудувати графік в координатах $Lg(P)-\beta$, що наведено на рисунку 2.

Як показали результати аналізу, для чистого вольфраму спостерігається повний збіг результатів, для плакованого міддю вольфраму різниця між теоретичними і експериментальними даними не перевищує 10-12 %, що свідчить про коректність застосування даного рівняння. Для забезпечення точності отриманих результатів є доцільним проведення розрахунків за другим рівнянням Бальшина М. Ю. [19]:

$$\lg p + m \lg \beta = \lg p_{\max} \quad (2)$$

де m – показник пресування, що не змінюється в значному діапазоні тиску.

Друге рівняння Бальшина М. Ю. розв'язується в координатах $Lg(P) - Lg(\beta)$, з визначенням константи m (рис. 3).

Одним з найбільш обґрунтованих рівнянь пресування, яке засновано на дискретно-контактних уявленнях про ущільнення порошків, є рівняння Г. М. Ждановича, де пропонується деформаційний механізм ущільнення порошку, при цьому кожна частинка порошку розглядається як окреме тіло та підпорядковується законам класичної механіки. Рівняння Г. М. Ждановича має наступний вигляд [20]:

$$\theta = \theta_0 \left[1 + (\beta_0^n - 1) \frac{P}{P_k} \right]^{\frac{1}{n}} \quad (3)$$

n – показник, який залежить від механічних властивостей порошку; P_k – максимальний тиск, що забезпечує 100 % щільність; θ – відносна щільність пресовки.

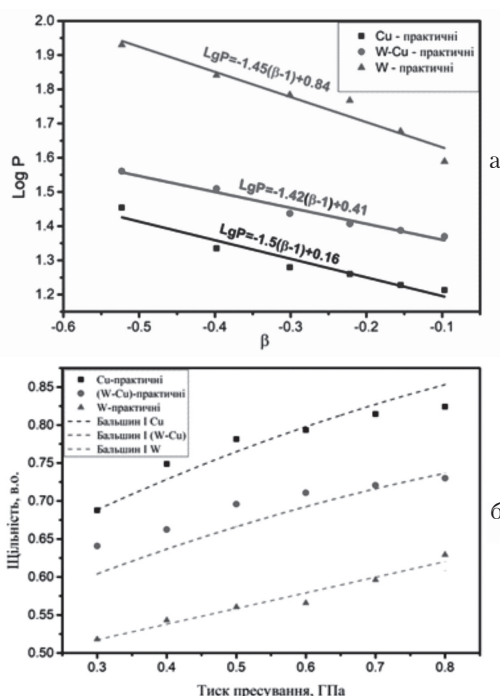


Рис. 2. Графічне розв'язання першого рівняння Бальшина М. Ю. (а) та порівняння теоретичних даних з розрахунковими (б) для чистої міді, вольфраму плакованого міддю та чистого вольфраму.

Fig. 2. Graphical solution of the first equation by Balshin M. Y. (a) and comparison of theoretical and calculated data (b) for pure copper, copper clad tungsten, and pure tungsten.

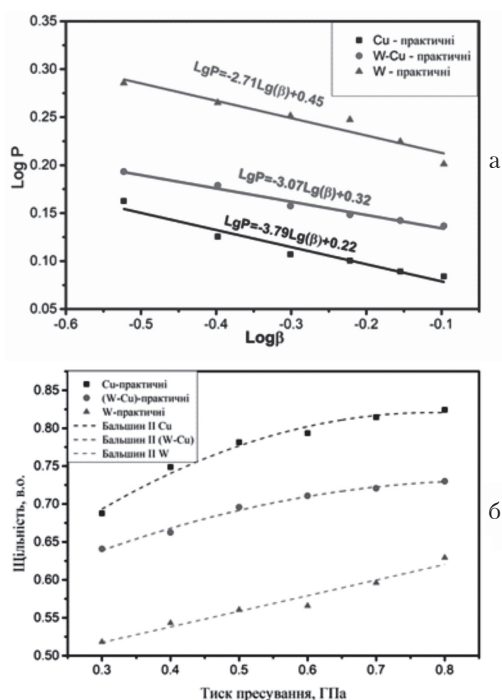


Рис. 3. Графічне розв'язання другого рівняння Бальшина М.Ю. (а) та порівняння теоретичних даних з розрахунковими (б) для чистої міді, вольфраму плакованого міддю та чистого вольфраму.

Fig. 3. Graphical solution of the second equation by Balshin M.Y. (a) and comparison of theoretical and calculated data (b) for pure copper, copper-clad tungsten, and pure tungsten.

Вирішення рівняння має графічну залежність, представлену на рис. 4.

Визначені параметри показують адекватність даної моделі на всьому діапазоні тисків як для вихідних порошків вольфраму та міді, так і для вольфраму плакованого міддю (таблиця 2). Також слід відмітити, що при плакуванні порошку вольфраму зменшується максимальний тиск P_k , що вказує на зростання пластичності матеріалу.

Результати аналізу дискретно-контактних рівнянь показали, що вони задовільно описують ущільнення композиційного порошку, проте слід

враховувати особливості структури пресовок із композиційного порошку (рис. 5).

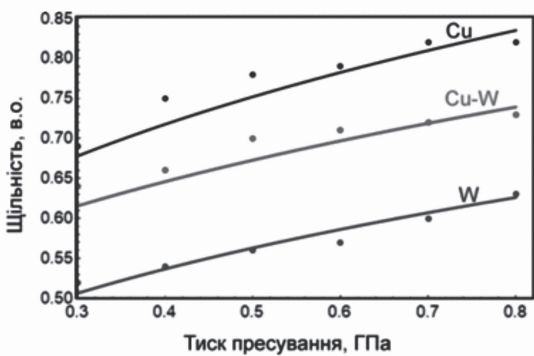


Рис. 4. Порівняння теоретичних розрахунків за моделлю Г. М. Ждановича та практичних результатів для чистої міді, вольфраму плакованого міддю та чистого вольфраму.

Fig. 4. Comparison of theoretical calculations based on G. M. Zhdanovich's model and practical results for pure copper, copper clad tungsten, and pure tungsten.

Таблиця 2
Параметри за рівнянням Г. М. Ждановича

Table 2
Parameters according to the equation of G. M. Zhdanovich

Матеріал	Параметри		
	Θ_0	n	$P_{k,T}$
Cu	0.483	3.8	1.7
W-Cu	0.483	3.8	2.95
W	0.354	3.8	5.25

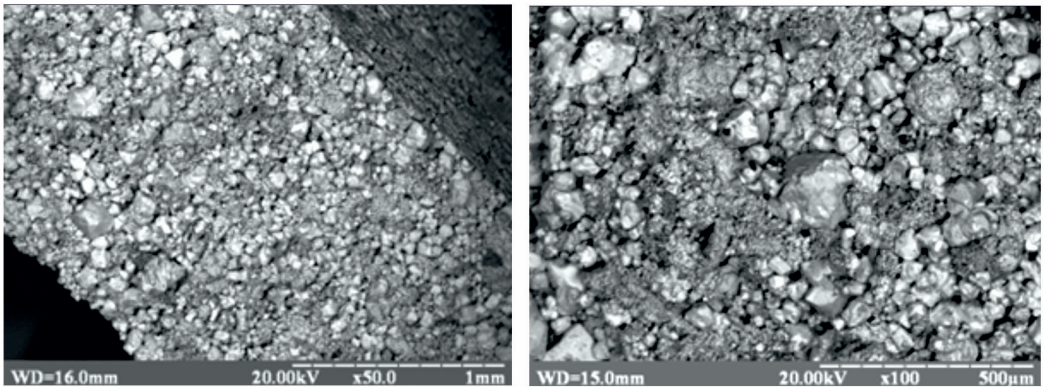


Рис. 5. СЕМ зображення пресовок із порошку вольфраму плакованого міддю.

Fig. 5. SEM image of copper-coated tungsten powder pressings.

Металографічний аналіз неспечених пресовок показав, що частинки вольфраму утворюють відносно щільний каркас, в якому частинки порошку вольфраму оточені мідним прошарком, при цьому структура характеризується своєю суцільністю та однорідністю. Схематично ущільнення плакованого порошку вольфраму можна представити наступним чином (рис. 6).

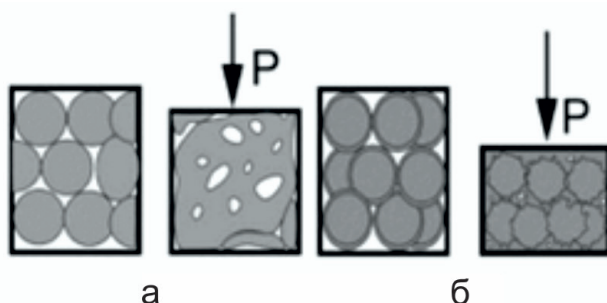


Рис. 6. Схема процесу ущільнення W (а), W/Cu (б).

Fig. 6. Schematic of the W (a), W/Cu (б) compaction process.

Відповідно, в процесі ущільнення, мідь розташовується суцільним прошарком між частинками порошку вольфраму, через що дану систему можна розглядати з позиції суцільного середовища. Дане рівняння не описує процес деформації кожної частинки порошку, в основі такого підходу застосовуються ті ж самі принципи, що і при деформації металів тиском. В цьому випадку можна застосовувати рівняння Штерна М. Б., що має наступний вигляд [21]:

$$p = p_{oc} + \mu \frac{H}{R} p_{\delta} \quad (4),$$

де μ – коефіцієнт зовнішнього тертя; p_{δ} – бічний тиск; p_{oc} – осьовий тиск.

$$p_{oc} = \sigma_z = -\frac{2}{3} k \frac{(1-f)^{2/3}}{\sqrt{f}} \quad (5),$$

де f – пористість.

$$p_{\delta} = \sigma_R = \frac{2}{3} k \frac{(1-f)^{3/2}}{\sqrt{f}} \left(1 - \frac{3}{2} f \right) \quad (6).$$

Для матеріалів, що застосовували в дослідженнях, коефіцієнт зовнішнього тертя був взятий 0,3 у випадку вольфраму по вольфраму та 0,5 у випадку вольфраму по міді. При розв'язку даного рівняння було отримано модельні залежності та проведено їх порівняння з експериментальними

даними, встановлено, що різниця між даними становить 7-8 %, що свідчить про коректність даного рівняння (рис. 7).

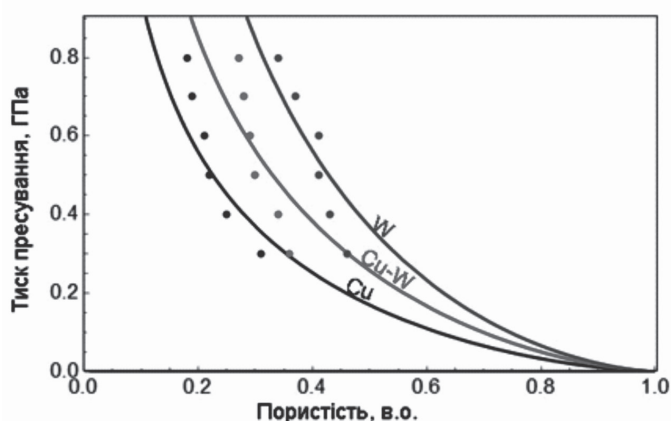


Рис.7. Графічне розв'язання за рівнянням Штерна М. Б.

Fig. 7. Graphical solution by the Stern equation.

За даних умов хід кривої визначає зміна параметру k , який є функцією від механічних властивостей порошку, а саме відповідає межі плинності матеріалу частинок порошку, який визначається експериментально. Розрахунки показали, що цей коефіцієнт становить 1,04 для вольфраму і 0,4 для міді та 0,76 для вольфраму плакованого міддю, відповідно.

Встановлено, що процес деформації композиційного порошку вольфраму відрізняється від ущільнення вихідного порошку вольфраму, що пов'язано із зміною характеру процесу компактування та превалюванням складової пластичної деформації.

Таким чином, в результаті роботи відпрацьовано процес хімічного осадження міді на частинки порошку вольфраму, визначено технологічні параметри плакування та отримано композиційний порошок вольфрам – мідь.

Проведено аналіз процесу деформації вихідних та плакованих порошків вольфраму в умовах пресування за допомогою математичних рівнянь, що описують залежність щільності порошкової пресовки від тиску пресування. Показано, що характер ущільнення двокомпонентних плакованих порошків відрізняється від компактування однокомпонентного порошку вольфраму, що пов'язане із збільшенням вкладу пластичної складової в процесі деформації частинок.

Показано, що мікроструктура пресовок із плакованих частинок порошку вольфраму оточених міддю, відповідає суцільному середовищу і може цілком коректно описуватися рівняннями, що використовують в своїх підходах суцільність середовища, що піддається стисканню.

Робота проводилась в рамках проекту 0123U102125 «Створення основ технології конструкційних елементів кумулятивних зарядів підвищеної ефективності із композиційних порошків тугоплавких металів».

Література

1. Randall M. German. Sintered tungsten heavy alloys: Review of microstructure, strength, densification, and distortion // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2022. – Vol. 108, 105940 <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2022.105940>
2. Dong L.L., Ahangarkani M., Chen W.G., Zhang Y.S. Recent progress in development of tungsten-copper composites: Fabrication, modification and applications // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2018. – Vol. 75. – P. 30-42 <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2018.03.014>
3. Muller A.V., Ewert D., Galatanu A. Milwich, R. Neu, Pastor J.Y., Siefken U., Tejado E., You J.H. Melt infiltrated tungsten-copper composites as advanced heat sink materials for plasma facing components of future nuclear fusion devices // Fusion Engineering and Design. – 2017. – Vol. 124. – P. 455-459 <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2017.01.042>
4. Montealegre-Melendez I., Arevalo C., Perez-Soriano E.M., Neubauer E., Rubio-Escudero C., Kitzmantel M. Analysis of the Influence of Starting Materials and Processing Conditions on the Properties of W/Cu Alloys // Materials. – 2017. – Vol. 10. – P. 142-149 <https://doi.org/10.3390/ma10020142>
5. Chen X., Li H., Yan X., Wang Y. Miao Explosive compact-coating of tungsten-copper alloy to a copper surface // Materials Research Express. – 2017. – Vol. 4. – P. 138-147 <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aa664c>
6. Bacal P., Donten M., Stojek Z. Electrodeposition of high-tungsten W-Ni-Cu alloys. Impact of copper on deposition process and coating structure // Electrochimica Acta. – 2017. – Vol. 241. – P. 449-458 <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2017.05.004>
7. Senthilnathan N., Raja Annamalai A., Venkatachalam G. Sintering of Tungsten and Tungsten Heavy Alloys of W-Ni-Fe and W-Ni-Cu: A Review // Trans Indian Inst Met. – 2017. – Vol. 70. – P. 1161-1176 <https://doi.org/10.1007/s12666-016-0936-2>
8. Zeinab Abdel Hamid, Sayed Farag Moustafa, Walid Mohamed Daoush, Fatema Abdel Mouez, Mona Hassan. Fabrication and Characterization of Tungsten Heavy Alloys Using Chemical Reduction and Mechanical Alloying Methods // Open Journal of Applied Sciences. – 2013. – Vol. 3, No.1. – P. 15-27 <https://doi.org/10.4236/ojapps.2013.31003>
9. Maneshian M.H., Simchi A. Solid state and liquid phase sintering of mechanically activated W-20 wt.% Cu powder mixture // Journal of Alloys and Compounds. – 2008. – Vol. 463, Issues 1-2. – P. 153-159 <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2007.08.080>
10. Hamidi A. G., Arabi H., Khaki J. V. Sintering of a nano-crystalline tungsten heavy alloy powder // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2019. – Vol. 80. – P. 204-209 <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2019.01.016>
11. Langlang Wang, Lei Xu C. Srinivasakannan, Sivasankar Koppala, Zhaohui, Han, Hongying Xia. Electroless copper plating of tungsten powders and preparation of Wcu20 composites by microwave sintering // Journal of Alloys and Compounds. – 2018. – Vol. 764. – P. 177-185 <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.06.061>
12. Peng X.L. Preparation of nickel and copper coated fine tungsten powder // Materials Science and Engineering: A. – 1999. – Vol. 262, Issues 1-2. – P. 1-8 [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(98\)01034-X](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(98)01034-X)

13. Ying Wang, Jun Tao Zou, Qing He Zhang. Preparation of Tungsten-Copper Composite Powder by Electroless Plating // Materials Science Forum. – 2013. – Vol. 749. – P. 28-34 <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.749.28>
14. Minitsky A., Byba Ie., Minitska N., Radchuk S. A study of the structure and properties of material based on an iron-copper composite powder // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2019. – Vol. 2/12 (98). – P. 44-50. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.164017>
15. Yamaguchi K., Takakura N., Imatani S. Compaction and sintering characteristics of composite metal powders // Journal of Materials Processing Technology. – 1997. – Vol. 63, Issues 1-3. – P. 364-369 [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(96\)02648-9](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(96)02648-9)
16. Laptev A.V. New Die-Compaction Equations for Powders as a Result of Known Equations Correction: Part 1–Review and Analysis of Various Die-Compaction Equations // Powders. – 2024. – Vol. 3(1). – P. 111-135 <https://doi.org/10.3390/powders3010008>
17. Ransing R.S., Gethin D.T., Khoei A.R., Mosbah P., Lewis R.W. Powder compaction modelling via the discrete and finite element method // Materials & Design. – 2000. – Vol. 21, Issue 4. – P. 263-269 [https://doi.org/10.1016/S0261-3069\(99\)00081-3](https://doi.org/10.1016/S0261-3069(99)00081-3)
18. Mahir H.H. Es-Saheb. Powder Compaction Mechanics: A New General Theoretical Formulation // Journal of King Saud University – Engineering Sciences. – 2003. – Vol. 15, Issue 1. – P. 67-78 [https://doi.org/10.1016/S1018-3639\(18\)30762-1](https://doi.org/10.1016/S1018-3639(18)30762-1)
19. Shtern M.B., Yu M. Bal'shin and the Mechanics of Powder Material Compaction // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2003. – Vol. 42. – P. 572-577 <https://doi.org/10.1023/B:PMMC.0000022195.05277.23>
20. Bogdanova K., Drugachuk S., Kotov S. Compaction models of copper powders with various properties // MaterialsToday. – 2020. – Vol. 30, Part 3. – P.727-730 <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.554>
21. Shtern M.B., Mikhailov O.V., Mikhailov A.O. Generalized Continuum Model of Plasticity of Powder and Porous Materials // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2021. – Vol. 60(1-2). – P. 20-34 <https://doi.org/10.1007/s11106-021-00211-7>

References

1. Randall M. German, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2022, Vol. 108, 105940 [in English]. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2022.105940>
2. Dong L.L., Ahangarkani M., Chen W.G., Zhang Y.S., *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2018, Vol. 75, pp. 30-42 [in English]. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2018.03.014>
3. Muller A.V., Ewert D., Galatanu A. Milwich, R. Neu, Pastor J.Y., Siefken U., Tejado E., You J.H., *Fusion Engineering and Design*, 2017, Vol. 124, pp. 455-459 [in English]. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2017.01.042>
4. Montealegre-Melendez I., Arevalo C., Perez-Soriano E.M., Neubauer E., Rubio-Escudero C., Kitzmantel M., *Materials*, 2017, Vol. 10, pp. 142-149 [in English]. <https://doi.org/10.3390/ma10020142>

5. Chen X., Li H., Yan X., Wang Y. Miao, *Materials Research Express*, 2017, Vol. 4, pp. 138-147 [in English]. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aa664c>
6. Bacal P., Donten M., Stojek Z., *Electrochimica Acta*, 2017, Vol. 241, pp. 449-458 [in English]. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2017.05.004>
7. Senthilnathan N., Raja Annamalai A., Venkatachalam G., *Trans Indian Inst Met.*, 2017, Vol. 70, pp. 1161-1176 [in English]. <https://doi.org/10.1007/s12666-016-0936-2>
8. Zeinab Abdel Hamid, Sayed Farag Moustafa, Walid Mohamed Daoush, Fatema Abdel Mouez, Mona Hassan, *Open Journal of Applied Sciences*, 2013, Vol. 3, No.1, pp. 15-27 [in English]. <https://doi.org/10.4236/ojapps.2013.31003>
9. Maneshian M.H., Simchi A. Solid state and liquid phase sintering of mechanically activated W-20 wt.% Cu powder mixture // *Journal of Alloys and Compounds*, 2008, Vol. 463, Issues 1-2, pp. 153-159 [in English]. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2007.08.080>
10. Hamidi A. G., Arabi H., Khaki J. V., *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2019, Vol. 80, pp. 204-209 [in English]. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2019.01.016>
11. Langlang Wang, Lei Xu C., *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, Vol. 764, pp. 177-185 [in English]. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.06.061>
12. Peng X.L., *Materials Science and Engineering: A*, 1999, Vol. 262, Issues 1-2, pp. 1-8 [in English]. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(98\)01034-X](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(98)01034-X)
13. Ying Wang, Jun Tao Zou, Qing He Zhang, *Materials Science Forum*, 2013, Vol. 749, pp. 28-34 [in English]. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.749.28>
14. Minitsky A., Byba Ie., Minitska N., Radchuk S., *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2019, Vol. 2/12 (98), pp. 44-50 [in English]. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.164017>
15. Yamaguchi K., Takakura N., Imatani S., *Journal of Materials Processing Technology*, 1997, Vol. 63, Issues 1-3, pp. 364-369 [in English]. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(96\)02648-9](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(96)02648-9)
16. Laptev A.V., *Powders*, 2024, Vol. 3(1), pp. 111-135 [in English]. <https://doi.org/10.3390/powders3010008>
17. Ransing R.S., Gethin D.T., Khoei A.R., Mosbah P., Lewis R.W., *Materials & Design*, 2000, Vol. 21, Issue 4, pp. 263-269 [in English]. [https://doi.org/10.1016/S0261-3069\(99\)00081-3](https://doi.org/10.1016/S0261-3069(99)00081-3)
18. Mahir H.H. Es-Saheb, *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*, 2003, Vol. 15, Issue 1, pp. 67-78 [in English]. [https://doi.org/10.1016/S1018-3639\(18\)30762-1](https://doi.org/10.1016/S1018-3639(18)30762-1)
19. Shtern M.B., Yu M., *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 2003, Vol. 42, pp. 572-577 [in English]. <https://doi.org/10.1023/B:PMMC.0000022195.05277.23>
20. Bogdanova K., Drugachuk S., Kotov S., *Materials Today*, 2020, Vol. 30, Part 3, pp. 727-730 [in English]. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.554>
21. Shtern M.B., Mikhailov O.V., Mikhailov A.O., *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 2021, Vol. 60(1-2), pp. 20-34 [in English]. <https://doi.org/10.1007/s11106-021-00211-7>

Analysis of the compaction process of copper clad tungsten powders

K. V. Polishchuk, PhD student, kirillpolishchuk25@gmail.com,

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-2309-1990>

Minitzkyi A. V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Department, aminitsky@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5767-4071>

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine

Summary

The paper analyzes the pressing process of a composite powder of the tungsten-copper system using the basic mathematical equations describing the deformation processes of a porous body as a function of density and pressing pressure. Several theoretical dependences describing different pressing mechanisms are considered, taking into account modern approaches, namely the discrete-contact model and the continuum model of a continuous medium. The most well-known equations, including those of Balshin M. Y., Zhdanovich G. M., and Shtern M. B., are analyzed. It is established that most of them have limited applicability, remaining valid for individual stages of the pressing process and significantly depend on the mechanical properties of the material that determine the predominance of elastic or plastic deformation. At the same time, most equations are focused on single-component powders, which does not correspond to the practice of powdered parts production processes. To test the theoretical dependencies, copper-clad tungsten powder was obtained by chemical vapor deposition from solution. The technological parameters of the cladding process (composition, solution concentration, and deposition time) that determine the quality of the resulting coatings were determined. The morphology of the particles of clad powders and the structure of tungsten-copper pressings were investigated. It is shown that tungsten powder forms a relatively dense framework with a copper layer, respectively, the structure of composite powder pressings is as close as possible to a continuous continuum and is correctly described by an equation based on the theory of continuity of the medium. It has been established that the compaction character of copper-clad tungsten powder differs from that of single-component tungsten powder, which is due to the fact that plastic deformation mechanisms prevail for tungsten-copper composite powders.

Keywords: tungsten, copper, clad powder, chemical deposition, pressing, equation.