

П.І. Лобода, Н.А. Шаповалов, П.А. Балашкевич, І.Ю. Троснікова

*Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»***ОТРИМАННЯ ПОРОШКІВ НА ОСНОВІ ВОЛЬФРАМУ ВІДНОВЛЕННЯМ У ВОДНІ**

У статті розроблено метод отримання порошків на основі вольфраму відновленням у водні. Встановлено технологічні характеристики синтезу, що дозволило отримати порошки на основі вольфраму із заданими фізичними та технологічними властивостями. Встановлено морфологічні особливості частинок отриманих порошків, їх хімічний та фазовий склад, а також насипну щільність та щільність утруски, пресуємість.

Ключові слова: відновлення у водні, вольфрам, порошки, хімічний склад, фазовий склад

P.I. Loboda, N.A. Shapovalov, P.A. Balashkevych, I.Yu. Trosnikova

PRODUCTION OF TUNGSTEN-BASED POWDER BY REDUCTION IN HYDROGEN

The article develops a method for obtaining tungsten-based powders by reduction in hydrogen. Technological characteristics of the synthesis are established, which allowed obtaining tungsten-based powders with specified physical and technological properties. Morphological features of the particles of the obtained powders, their chemical and phase composition, as well as bulk density and compaction density, and compressibility are established.

Keywords: reduction in hydrogen, tungsten, powders, chemical composition, phase composition

Вступ. Для створення облицювання кумулятивних зарядів часто використовують матеріали з високою щільністю і пластичністю. Серед найбільш поширених матеріалів для цієї мети варто виділити мідь, нікель, алюміній, технічне залізо та низьковуглецеву сталь. Ці матеріали утворюють високощільні суцільні струмені з великою пробивною здатністю [1]. Облицювання також може бути виготовлене з інших матеріалів, таких як вольфрам, тантал, молібден або композиційні матеріали, вибір матеріалу залежить від конкретного завдання. Хоча мідь була одним з перших матеріалів, що використовувалися для виготовлення облицювань кумулятивних зарядів, вона залишається цікавою та перспективною для подальших досліджень та використання [2].

Авторами роботи [2] вивчався вплив матеріалу облицювання та типу вибухової речовини на формування струменя кумулятивного заряду. Експериментальні випробування кумулятивних зарядів з облицюванням з міді проводилися на сталевій пластині, а отримані дані використовувалися для перевірки чисельної моделі кумулятивного заряду. Встановлено, що облицювання з міді та танталу формували когерентний струмінь, тоді як облицювання з алюмінію утворювали струмінь із частинок. Крім того, струмені, утворені з мідних облицювань, досягали вищої пікової швидкості, у порівнянні з танталовими.

Вибір матеріалу облицювання має вирішальне значення для формування та ефективності кумулятивного струменя. Різні властивості матеріалів, такі як щільність (ρ), теплопровідність (k) та механічна міцність (представлена модулем Юнга E та межею текучості σ_y) істотно впливають на кінетичні та термодинамічні характеристики кумулятивного струменя.

Вища щільність облицювання сприяє формуванню більш масивного та ефективного кумулятивного струменя, який може проникати глибше в ціль. Щільність впливає на масу струменя, а, отже, на його кінетичну енергію. Для облицювань з вищою щільністю потенціал кінетичної енергії струменя вищий.

Теплопровідність визначає наскільки швидко тепло може розповсюджуватися від точки детонації через облицювання. Вища теплопровідність може сприяти більш рівномірному розподілу температури та зменшенню локалізованих зон перегріву, що можуть ослабити структуру струменя. Водночас, висока теплопровідність може зменшувати температурний градієнт, необхідний для швидкого формування кумулятивного струменя.

Міцність матеріалу, особливо межа текучості (σ_y) та модуль Юнга (E), впливає на його здатність витримувати великі навантаження без деформації. В контексті кумулятивних зарядів, матеріали з високою міцністю сприяють більш ефективному формуванню струменя, оскільки вони можуть витримати інтенсивний ударний тиск без значної деформації.

Математично вплив матеріалу облицювання на кумулятивний струмінь може бути проілюстрований через рівняння балансу імпульсу та енергії, а також через аналітичні та числові рівняння, які моделюють поведінку матеріалу під високим тиском і високою температурою.

© П.І. Лобода, Н.А. Шаповалов, П.А. Балашкевич, І.Ю. Троснікова

Застосування цих моделей і розрахунків дозволяє точно спрогнозувати поведінку кумулятивного струменя в залежності від вибору матеріалу облицювання [2].

Вплив матеріалів облицювання на характеристики кумулятивних зарядів є критично важливим аспектом у розробці та оптимізації вибухових пристроїв. Матеріал облицювання, розташований усередині порожнини кумулятивного заряду, безпосередньо впливає на формування та характеристики кумулятивного струменя, що формується під час детонації.

Облицювання, зазвичай, виготовлене з металу, відіграє ключову роль у процесі формування струменя. Під час вибуху високий тиск та температура перетворюють метал облицювання у високошвидкісний струмінь, здатний проникати через товсті броньовані плити або інші перешкоди. Вибір матеріалу облицювання безпосередньо впливає на швидкість, густину та здатність струменя до проникнення.

Таким чином, розвиток матеріалів для облицювання кумулятивних зарядів і вдосконалення їх конструкції веде до постійного покращення характеристик вибухових пристроїв, відкриваючи нові можливості для їх застосування у різноманітних галузях [3], [4], [5].

Тому, метою даної роботи є отримання порошків на основі вольфраму відновленням у водні та дослідження їх фізичних і технологічних властивостей.

Матеріали та методи дослідження. На сьогодні, для одержання дисперсних порошків на основі вольфраму застосовують ряд методів: плазмохімічний синтез [6], метод хімічної конденсації [7], [8], метод термолізу карбонілатів [9] і синтезу у водних розчинах [10]. Зазначені, а також інші методи класифіковано у роботі [11]. Перспективними є роботи щодо одержання порошків на основі вольфраму з вольфрамівмісних відходів [12]–[14] або продуктів.

Тому, у роботі в якості вихідних матеріалів використовувалась вольфрамова кислота H_2WO_4 (з розміром частинок 4-6 мкм), оксид міді Cu_2O (з розміром частинок 40 мкм) та гліцерин II сорту.

Для синтезу W-Cu порошків обрано метод, який поєднує двоступінчастий нагрів вихідної суміші в середовищі аргону спочатку до температури 250 оС з витримкою 15 хв, далі нагрів до 500 оС з витримкою 30 хв та подальше відновлення в середовищі водню за температури 700 оС з витримкою 45 хв.

Для вивчення морфології отриманих порошків проводились мікроскопічні дослідження на електронному мікроскопі REM 106II. Методами рентгенофлюорисцентного (на приладі Expert 3L) та мікрорентгено-спектрального (приставка до мікроскопа REM 106II) аналізів було досліджено хімічний склад порошків для встановлення як вмісту основних компонентів, так і домішок.

Для встановлення фазового складу порошків проводився рентгенофазовий аналіз порошків на установці Rigaku Ultima IV.

Для вивчення технологічних властивостей (насипної щільності, щільності утруски, пресуємості) відновлених порошків було використано стандартні методики: насипна щільність та щільність утруски порошку визначалась методом волюмометра Скотта; пресуємість порошків визначалась методом ручного пресування в сталій прес-формі серії пресовок з попередньо пластифікованого порошку за різного тиску пресування (50–500 МПа).

Викладення основного матеріалу.

У роботі вивчались закономірності отримання порошків W-Cu відновленням з вихідних речовин, також було вивчено їх фізичні та технологічні властивості.

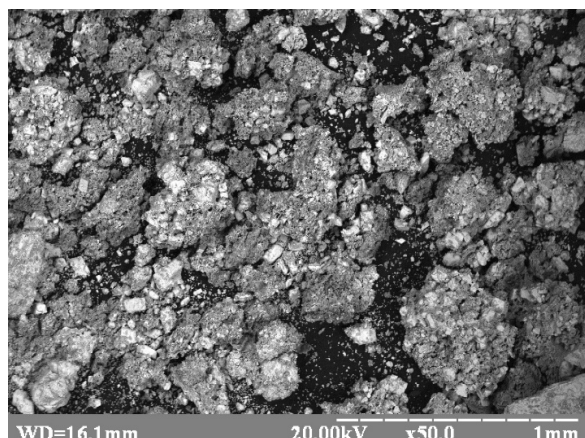
Хімічний склад порошків контролювався як рентгенофлюорисцентним методом (табл.1), так і локальним мікрорентгеноспектральним аналізом (рис.1 в).

Табл. 1.

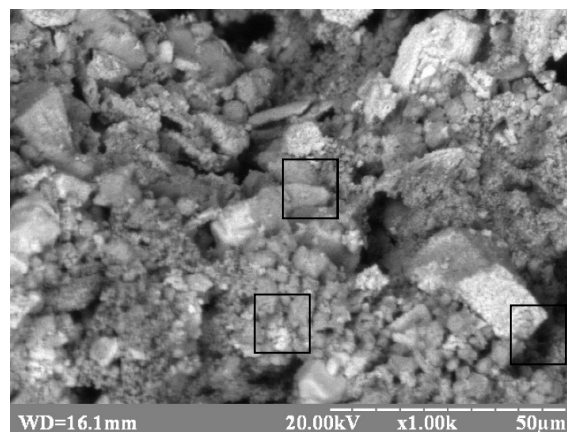
Результати дослідження хімічного складу порошків W-Cu після відновлення

Елемент	Вміст, мас.%
Cu	56,5
W	42,1
Fe	0,11
P	0,67
S	0,58

На рис. 1 зображено морфологію (а) та хімічний склад (б, в) частинок порошку W-Cu, отриманого відновленням в середовищі водню за температури 700 °С з витримкою 45 хв.



а



б

Елемент	Вміст, мас. %		
	Точка 1	Точка 2	Точка 3
Cu	9,41	88,67	15,74
W	84,12	7,7	66,83
O	6,48	3,63	15,74

в

Рис. 1. Морфологія та мікрорентгеноспектральний аналіз відновлених у середовищі водню порошків W-Cu

Для встановлення фазового складу відновлених порошків було проведено рентгенофазовий аналіз (рис.2, табл.2). Встановлено наявність двох фазових складових: вольфраму та міді.

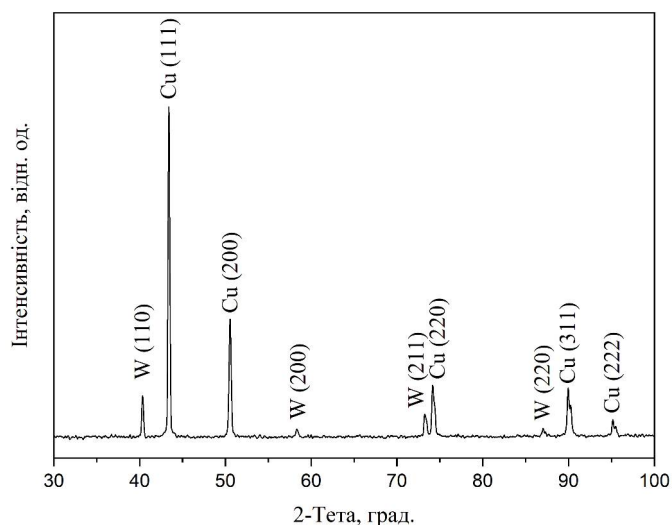


Рис. 2. Рентгенограма відновлених порошків W-Cu

Табл. 2

Результати дослідження фазового складу порошків W-Cu

Фаза	Кількісний вміст фазових складових, %
Cu	75
W	25

Технологічні властивості порошку було визначено методом волюметра Скотта і встановлено, що для наважки 50 г відновленого порошку W-Cu насипна щільність складає $1,6 \text{ г/см}^3$, а щільність утруски – $2,11 \text{ г/см}^3$. Для визначення пресуємості порошків методом ручного пресування в сталій прес-формі було сформовано серію зразків з попередньо пластифікованого порошку за

різних тисків пресування (50–500 МПа). На основі експериментальних даних встановлено залежність щільності порошкових пресовок від тиску пресування (рис. 3).

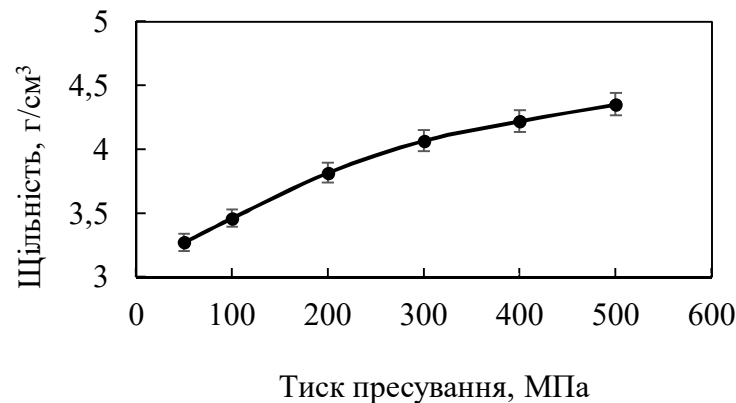


Рис. 3. Графік залежності щільності пресовок з відновлених порошоків W-Cu від тиску пресування

Висновки.

Методом, який поєднує двоступінчастий нагрів вихідної суміші в середовищі аргону та подальше відновлення у середовищі водню протягом 1-1,5 години отримано порошки W-Cu з середнім розміром частинок 30-40 мкм, з насипною щільністю 1,6 г/см³ та щільністю утруски 2,11 г/см³.

Робота виконувалась за фінансової підтримки Міністерства освіти і науки України; номер державної реєстрації 0123U102125.

Список використаних джерел:

- [1] Смірнова Я.О., Лобода П.І., Бісик С.П., Гурія І.М. Дослідження впливу технологій виготовлення кумулятивної лійки на бронепробиття кумулятивного боєприпасу // Труді університету. – 2024. – № 5(187). – С. 219-228.
- [2] Zaki S., Uddin E., Rashid B., Mubashar A., Shah S.R. Effect of liner material and explosive type on penetration effectiveness of shaped charge. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*. 2019. Vol. 233, № 7. P. 1375–1383. <https://doi.org/10.1177/1464420717753233>
- [3] Wang C., Ma T., Ning J. Experimental investigation of penetration performance of shaped charge into concrete targets. *Acta Mechanica Sinica*. 2008. Vol. 24. P. 345–349. <https://doi.org/10.1007/s10409-008-0160-3>
- [4] Sarana S., Ayisit O., Yavuz M.S. Experimental investigations on aluminum shaped charge liners. *Procedia Engineering*. 2013. Vol. 58. P. 479–486. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.05.055>
- [5] Pyka D., Kurzawa A., Bocian M., Bajkowski M., Magier M., Sliwinski J., Jamroziak K. Numerical and experimental studies of the ŁK type shaped charge. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10, № 19. 6742. <https://doi.org/10.3390/app10196742>
- [6] Ryu T., Sohn H. Y., Hwang K. S. *High-Temperature Materials and Processes*, 27: 91. 2008.
- [7] Kim J. C., Kim B. K. *Scr. Mater.*, 50: 969. 2004.
- [8] Su Y., Lin H.-C., Yang T.-K. *Mater. Trans.*, 50, No. 11: 2593. 2009.
- [9] Sahoo P. K., Srinivas S., Kamal K. J. *Mater. Res.*, 26, No. 5: 652. 2011.
- [10] Chen L., Huang Ch., Xu G., Miao L., Shi J., Xiao X., J. *Nanomaterials*, 2012: Article No. 3. 2012.
- [11] Dine S., Aid S., Ouaras K., Malard V., Odorico M., Herlin-Boime N., Habert A., Gerbil-Margueron A., Grisolia Ch., Chêne J., Pieters G., Rousseau B., Vrel D., *Advanced Powder Technology*, 26, No. 5: 1300. 2015.
- [12] Баранов Г. А., Гавриш М. В., Санникович Д. Д. Вісник КПІ. *Машинобудування*, № 63: 42. 2011.
- [13] Малишев В. В., Габ А. І. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, 40, № 4: 109. 2004.
- [14] Малишев В. В., Габ А. І. *Металургія: наукові праці Запорізької державної інженерної академії*, Вип. 18: 84. 2008.