

ISSN 2077-1304. Met. lit'e Ukr., vol. 31, 2023, № 2 (333), 62-68

<https://doi.org/10.15407/steelcast2023.02.062>

УДК 621.762

А.В. Мініцький, д-р техн. наук, проф., проф. кафедри, e-mail: aminitsky@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5767-4071>, Web of Science ResearcherID: AAK-1245-2020

М.М. Ямшинський, д-р техн. наук, доц., зав. кафедри, e-mail: yamshinskiy@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-2293-2939>, Web of Science ResearcherID: I-4267-2017

Є.Г. Биба, канд. техн. наук, доц., доц. кафедри, e-mail: byba.evgen@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1696-300X>, Web of Science ResearcherID: AAK-1757-2020

Н.В. Мініцька, канд. техн. наук, доц., доц. кафедри, e-mail: minitska27@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5156-7328>, Web of Science ResearcherID: GRX-7301-2022

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

І.В. Лук'яненко, канд. техн. наук, доц. кафедри, e-mail: lukianenkoiv@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1043-9688>, Web of Science ResearcherID: J-7294-2017

Б.В. Кивгило, аспірант, e-mail: kyvhylo.bohdan@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5890-9020>

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

Вплив умов спікання на структуроутворення композиційних матеріалів на основі вольфраму

Застосування важких сплавів з вольфраму є необхідним для багатьох галузей, оскільки такі сплави ідеально підходять для різноманітних виробів через високу густину вольфраму. Основною проблемою при створенні таких сплавів є необхідність застосування високих температур спікання, що значно ускладнює технологію отримання вольфрамових сплавів. Для зниження температур спікання вольфрамових сплавів до їх складу вводять легуючі елементи, що активують процеси спікання при нижчих температурах (нікель, залізо та мідь). Основною задачею при формуванні структури та властивостей сплавів на основі вольфраму є забезпечення умов спікання в присутності рідкої фази, що сприяє утворенню міцного каркасу в структурі матеріалу та високій густині композиту.

Досліджено різні способи отримання сплавів на основі вольфраму та вивчено вплив хімічного складу легуючих добавок на умови процесу спікання. Встановлено вплив тиску пресування та допресування на пористість пресовок на основі вольфраму. Показано, що в діапазоні тисків 200-700 МПа, максимальне ущільнення порошку вольфраму відбувається при тисках 500-550 МПа, що забезпечує пористість на рівні 35-37 %. Показано відмінність механізмів спікання систем W-Ni та W-Fe за температури 1350 °C, яка є достатньою для проходження рідкофазного спікання з нікелевою зв'язкою, та є низькою для залізної зв'язки.

Досліджено процес інфільтрації пористого каркасу із вольфрамового сплаву розплавом міді, що отримано із відходів металообробки. Визначено умови, що забезпечують повне просочування вольфрамового каркасу міддю за температури 1200 °C і дозволяють отримати безпористий матеріал.

Результати роботи можуть бути використанні при створенні виробів на основі вольфраму з високою питомою вагою та густиною, в тому числі із відходів металообробки, що значно здешевлює такі матеріали.

Ключові слова: порошок, вольфрам, нікель, мідь, залізо, пресування, спікання, пористість, просочування, стружка, допресування, густина.

Вступ. Сплави на основі вольфраму мають унікальне поєднання густини, механічної міцності, оброблюваності та корозійної стійкості, що дозволяє застосовувати їх для протитанкових, інерційних мас, радіаційного захисту, боєприпасів тощо [1]. Широке коло застосувань вольфрамових сплавів пояснюється великою густиною і щільністю, що наближується до чистого вольфраму ($19,3 \text{ г/см}^3$). Матеріали на основі важких сплавів виготовляються методом порошкової металургії з дрібних металевих порошків високої чистоти, які формують під тиском з наданням форми, що є близькою до геометрії кінцевого виробу. Використовуючи цей підхід, реалізується економія матеріалу за рахунок усунення операції механічного оброблення. Проте, недоліком таких сплавів є необхідність застосування високих температур спікання, що значно ускладнює технологію їх отримання. Для зниження температур спікання важких сплавів до їх складу вводять легуючі елементи (нікель, залізо, мідь), що активують процеси спікання при більш низьких температурних режимах [2]. Загальною технологічною проблемою застосування активуючих присадок є велика різниця їх густини порівняно з вольфрамом, що ускладнює процес легування і забезпечення рівномірного розподілу по об'єму матеріалу. Для рівномірного розподілу легуючих елементів зазвичай застосовують багатогодинні операції розмелу в кульових млинах, що значно збільшує собівартість таких сумішей та підвищує енергетичні затрати при виробництві. Одним із більш економічних і швидких способів введення легуючих добавок є плакування порошку вольфраму шляхом нанесення на його поверхню покриття методом хімічного осадження із розчинів [3]. При цьому рівномірність нанесення покриттів суттєво залежить як від технологічних параметрів процесу осадження, так і від форми та розмірів вихідних порошків вольфраму, що вносить певні обмеження для застосування даного способу у виробничу практику. Тому, основними операціями виготовлення сплавів на основі вольфраму є змішування порошків вольфраму з легуючими елементами, пресування та спікання.

В практиці порошкової металургії порошок вольфраму ущільнюють у формі штапиків в розбірних прес-формах при низьких тисках 150-200 МПа, до пористості заготовок не менше 50 %. Наступною технологічною операцією, замість спікання, є багатократне ротаційне кування, що забезпечує високу щільність. Іншими методами, що забезпечують високу щільність, є технологія гарячого пресування у графітових прес-формах, або гаряче ізостатичне пресування в оболонках у газостатах при температурах 1500-1700 °C з витримкою до 4-5 годин [4]. Також застосовують технологію ударного пресування при температурах в діапазоні 800-1640 °C [5]. Однак, дані високоенергетичні технології вимагають використання спеціального устаткування та прес-оснастки, що не є виправданим з точки зору як дослідницької, так і виробничої практики. Іншим недоліком даних методів є те, що ущільнення пресовок із порошку вольфраму відбувається в умовах нагріву з великим часом ізотермічної витримки. Практично відсутня інформація

щодо статичного пресування порошку вольфраму в широкому діапазоні тисків з використанням відпалу та допресування.

Принциповою технологічною операцією при виготовленні сплавів на основі вольфраму є спікання, при якому формується структура та властивості матеріалу. Максимальних значень щільності, міцності і пластичності можна досягти при оптимальному режимі спікання (температура, час ізотермічної витримки та швидкість охолодження). У процесі спікання цементуючі зв'язки Cu-Ni і Ni-Fe утворюють рідку фазу, в якій вольфрам частково розчиняється [6]. Внаслідок цього при спіканні відбувається перекристалізація частинок вольфраму через рідку фазу і зростання частинок. При цьому, спікання в присутності рідкої фази визначає певні умови для отримання високої щільності: забезпечення необхідної мінімальної кількості рідкої фази, достатня розчинність твердої фази в рідкій складовій сплав, а також повне змочування твердої фази рідиною.

Метою роботи є вивчення впливу технологічних режимів та хімічного складу на структуру та властивості сплавів на основі вольфраму з добавками нікелю, міді та заліза.

Постановка задачі. В роботі поставлено наступні задачі досліджень:

1. Дослідити процес ущільнення порошків суміші на основі вольфраму при статичному пресуванні, відпалу та допресуванні.
2. Дослідити процес спікання матеріалів систем вольфрам — нікель, вольфрам — залізо та вольфрам — нікель — залізо — мідь.
3. Дослідити структуру та властивості сплавів на основі вольфраму залежно від умов спікання.

Результати дослідження. В роботі було використано два різних способи створення матеріалів на основі вольфраму: 1) пресування суміші порошків вольфраму, нікелю та заліза з наступним спіканням за температур 1300-1350 °C, 2) пресування стружки сплаву вольфрам — нікель — залізо з формуванням пористого каркасу та наступне просочування каркасу розплавом міді за температури 1200 °C.

На першому етапі роботи проводили дослідження ущільнення порошку вольфраму в умовах статичного пресування на гідравлічному пресі у розбірній прес-формі з діаметром робочого каналу 10 мм, при тиску 200-700 МПа. Було встановлено, що в діапазоні тисків 200-700 МПа, максимальне ущільнення порошку вольфраму відбувається до тиску 550 МПа і забезпечує пористість на рівні 35-37 %, подальше збільшення тиску призводить до часткового руйнування брикетів і збільшення пористості (рис. 1). Це може пояснюватися тим, що ущільнення вольфрамового порошку відбувається переважно за рахунок переміщення частинок без процесів пластичної деформації. Тому, зростання тиску призводить до збільшення контакту між частинками, зростання тертя та запирання частинок, що призводить до розтріскування і руйнування брикетів. Відпал зразків у водні за температури 900 °C протягом 60 хвилин призводить до часткового збільшення пористості, що пояснюється процесами

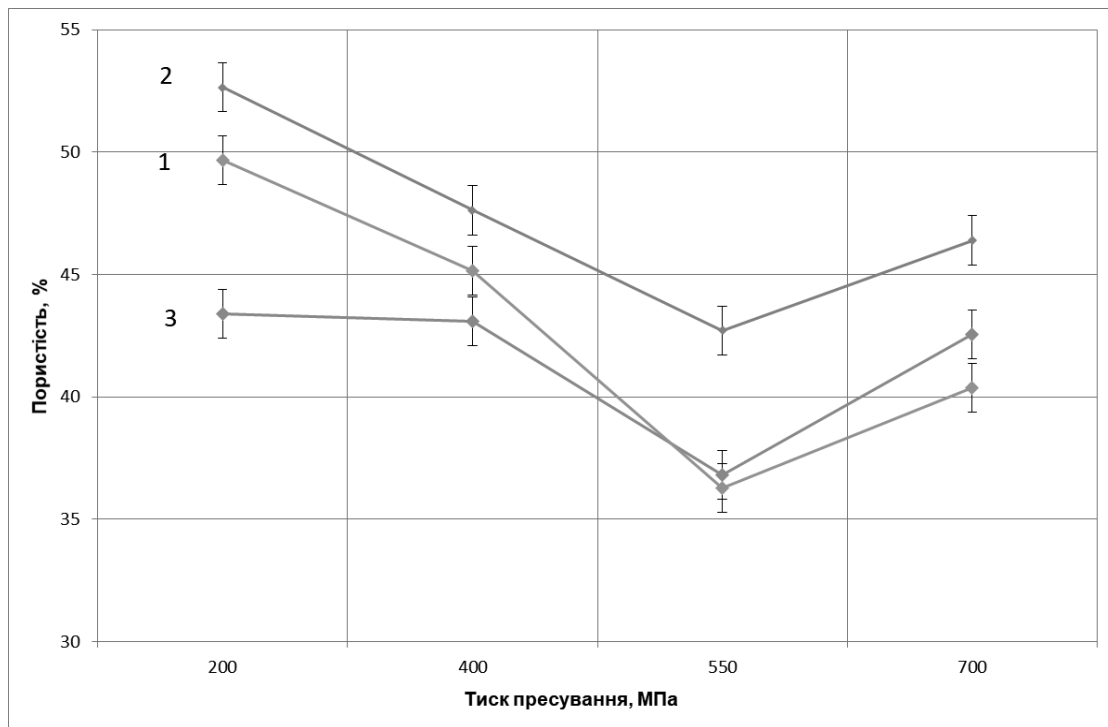


Рис. 1. Залежність пористості пресовок із порошку вольфраму від тиску пресування: 1 — після пресування; 2 — після відпалу; 3 — після допресування

відновлення оксидних плівок та зменшенням маси брикетів. Проведення додаткової операції допресування відпалених пресовок при тиску 700 МПа, призводить до закономірного зниження пористості на 5-7 %, що обумовлено збільшенням пластичності пресовок після відпалу через зняття деформаційного зміцнення після пресування. Таким чином, встановлено, що мінімальна пористість пресовок із важких сплавів перед спіканням становить 35-37 %. Тому подальші дослідження проводили при використанні тиску пресування 550 МПа.

Суміші порошків вольфраму з добавками нікелю та заліза в кількості 10 %мас. готували у барабанному змішувачі протягом 10 годин, після цього проводили операції пресування, відпалу, допресування та спікання у вакуумі за температури 1350 °С протягом 60 хвилин. Як показали результати вимірювань, об'ємна усадка зразків системи W-Ni склала близько 30 %, що забезпечило пористість близько 5-7 %, для системи W-Fe об'ємна усадка зразків при даних режимах спікання становить лише 20 %, що обумовило велику залишкову пористість на рівні 15-17 % (рис. 2).

Результати металографічних досліджень показали, що в процесі спікання двох систем W-Ni та W-Fe є принципові відмінності. Системи W-Ni характеризується сфероїдальною мікроструктурою, що складається із округлих зерен вольфраму, який оточений металевою зв'язкою на основі нікелю, що містить деяку кількість розчиненого вольфраму (рис. 3, а). Дана структура формується за рахунок процесів перекристалізації частинок вольфраму через рідку фазу. Цей механізм формування структури підтверджує значний ріст зерен вольфраму, частинки якого у вихідному стані мають розмір близько 10-15 мкм, а після спікання зростають до розміру 40-50 мкм.

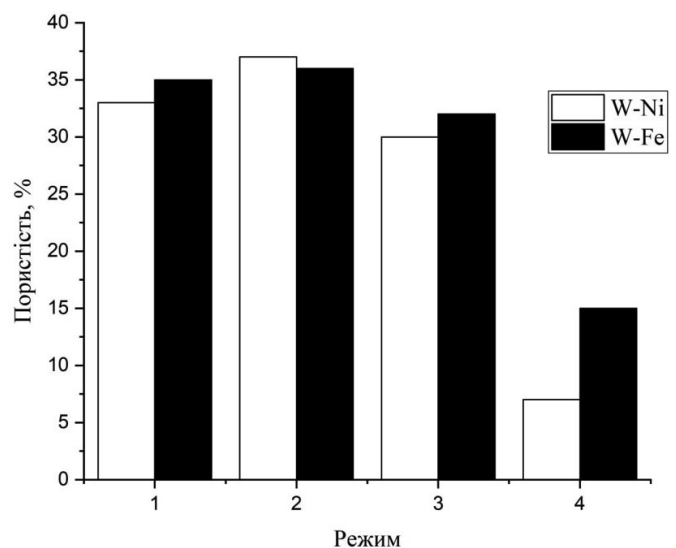
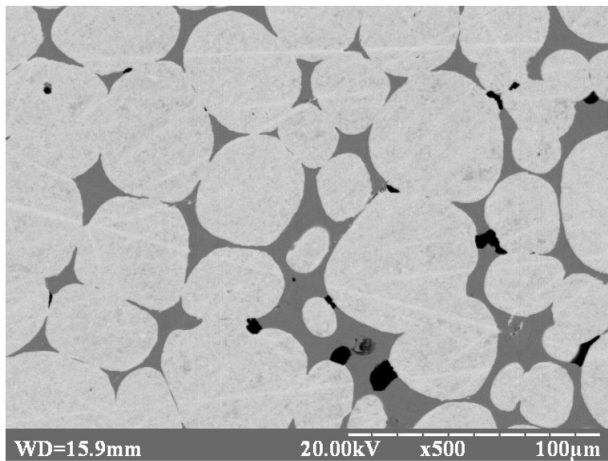


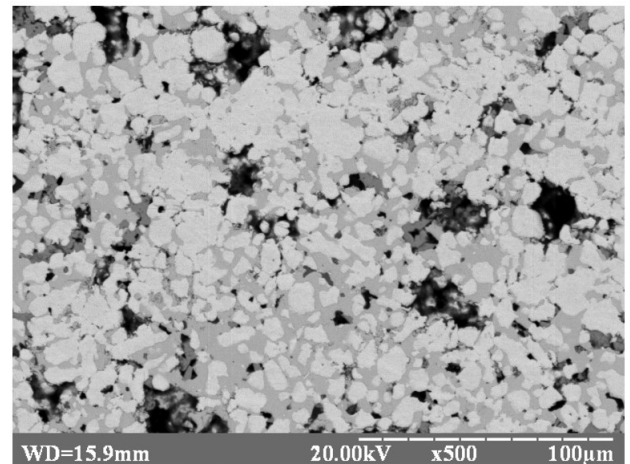
Рис. 2. Залежність пористості пресовок із сумішей порошків вольфрам — нікель та вольфрам — залізо від тиску пресування: 1 — після пресування; 2 — після відпалу; 3 — після допресування; 4 — після спікання

Для системи W-Fe спостерігається інший механізм спікання: формування матеріалу відбувається за рахунок припікання частинок заліза і вольфраму в місцях контакту, що відбувається практично в умовах твердофазного спікання. Аналіз мікроструктури показав наявність великого об'єму залишкової пористості, що обумовлено низькою взаємодією між вольфрамом та залізом (рис. 3, б). Відповідно для даної системи необхідно забезпечувати більш високу температуру спікання та більший час ізотермічної витримки.

На другому етапі роботи було отримано матеріал на основі системи W-Ni-Fe-Cu, який формували із від-

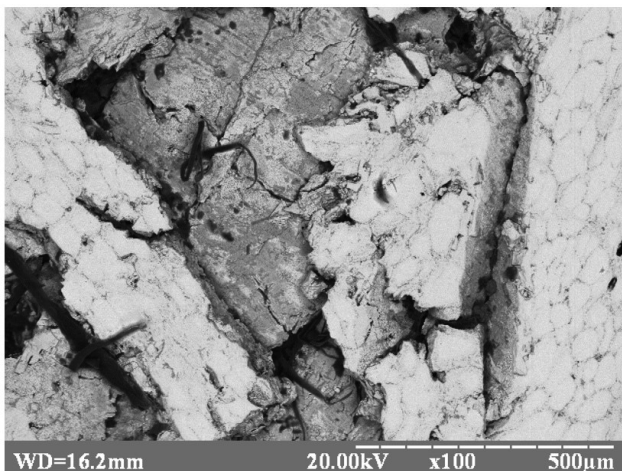


а

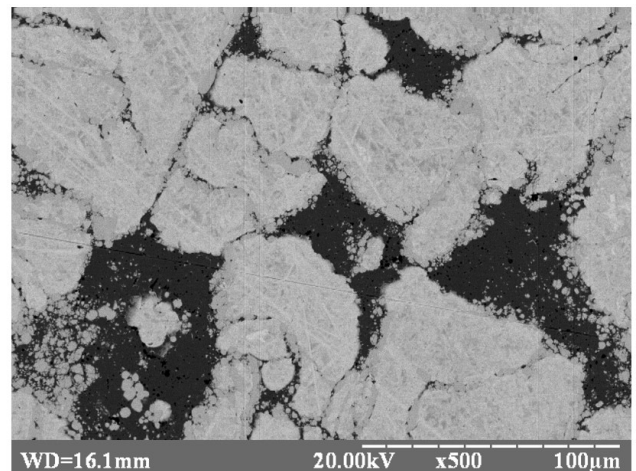


б

Рис. 3. Мікроструктура сплаву на основі вольфраму: а — W-Ni (10 %); б — W-Fe (10 %)



а



б

Рис. 4. Мікроструктура матеріалу на основі вольфраму: а — до просочування; б — після просочування

ходів металообробки важкого вольфрамового сплаву W-Ni-Fe у вигляді стружки. Стружку відсіювали до розміру менше 500 мкм, після чого формували каркас методом статичного пресування у прес-формі діаметром 10,0 мм при тиску 550 МПа. Як і у випадку пресування порошку, пористість каркасу становила близько 34-36 %, тобто відноситься до відкритого типу пористості, що є необхідною умовою для інфільтрації (просочування) пресовки розплавом легкоплавкого металу [7, 8]. Пресовки із вольфрамового сплаву попередньо спікали при температурі 1200 °С у середовищі водню протягом 60 хвилин для відновлення оксидних плівок та видалення залишків змащувальних охолоджуваних рідин, які використовуються при металообробці. Для просочування міддю було розраховано об'єм пор пресовок на основі вольфрамового сплаву та спресовано брикети при тиску 300 МПа із відходів міді, що представляють собою подрібнений дріт діаметром 0,3 мм. Інфільтрацію каркасів проводили у муфельній печі за температури 1200 °С протягом 30-40 хвилин шляхом встановлення мідних пресовок на каркаси вольфрамового сплаву [9]. Процес інфільтрації відбувався під дією капілярних сил, тобто при розплавленні мідь, за рахунок гравітацій-

них сил, самопливом просочувала пористий каркас. При цьому, через наявність в системі нікелю і заліза було забезпечено високу змочуваність порових каналів розплавом міді, а також їх хімічну взаємодію. Таким чином було отримано високощільний матеріал системи W-Ni-Fe-Cu з каркасною структурою із вольфрамового сплаву з прошарками міді (рис. 4). Аналіз мікроструктури показав, що структура композиту складається переважно із трьох різних складових: основна частина матеріалу (світло-сіра) складається із вольфраму з незначною кількістю розчинених нікелю та заліза, темна фаза складається з міді, що розчинила певну кількість нікелю, а також третя (темно-сіра) складова, що розташована на границі між каркасом та міддю складається із вольфраму та значної кількості нікелю і заліза, що забезпечило адгезію між вольфрамом та міддю.

Результати рентгенофазового аналізу, який проводили на дифрактометрі марки RIGAKU ULTIMA IV, підтвердили процес взаємодії міді і нікелю та утворення твердих розчинів нікелю в міді (рис. 5).

Аналізуючи дифрактограми, можна побачити, що лінії як вольфраму, так і міді з нікелем уширені та зсунуті в бік менших кутів. Дана поведінка ліній дифрак-

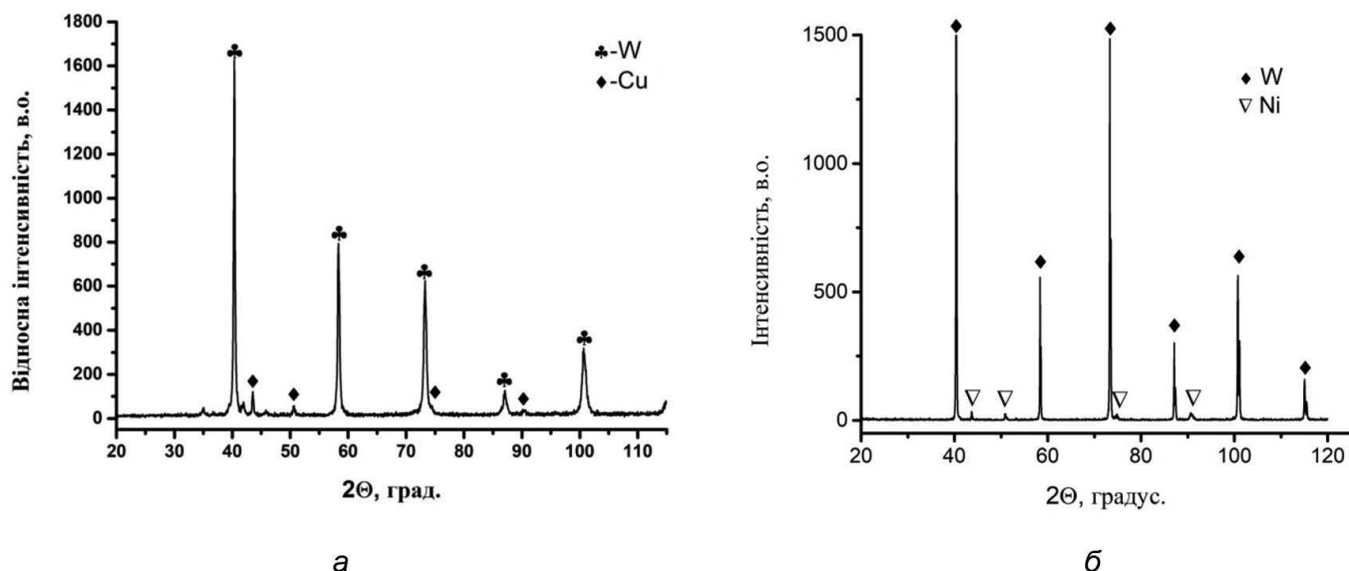


Рис. 5. Дифрактограми матеріалу на основі вольфраму: а — система W-Cu; б — система W-Ni

ції свідчить про утворення твердих розчинів на основі міді та нікелю.

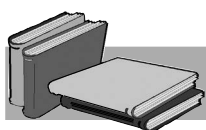
Висновки та перспективи дослідження

Досліджено різні способи отримання порошкових сплавів на основі вольфраму, легованого нікелем, залізом та міддю. Встановлено вплив тиску пресування та допресування на пористість пресовок на основі вольфраму та визначено оптимальний діапазон тисків, який становить 500-550 МПа. Досліджено процес спікання на формування структури та фазового складу вольфрамових сплавів залежно від хімічного складу легуючих елементів. Встановлено відмінність механізмів спікання систем W-Ni та W-Fe, отримання

матеріалу з високою щільністю досягається в умовах рідкофазного процесу спікання, що реалізується при легуванні вольфраму нікелем.

Також було відпрацьовано технологію отримання вольфрамових сплавів із відходів металообробки у вигляді стружки та мідного дроту. Показано можливість створення високощільних композитів шляхом просочування міддю пористих каркасів із вольфрамового сплаву за температур 1200 °С, що значно нижче ніж при застосуванні нікелю та заліза.

Результати роботи можуть бути використані при створенні виробів балістичного призначення з високою питомою вагою та густиною, в тому числі із відходів металообробки, що значно здешевлює такі матеріали.

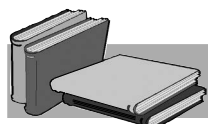


ЛІТЕРАТУРА

- Rabin B.H., German R.M. Microstructure effects on tensile properties of tungsten-Nickel-Iron composites. *Metallurgical Transactions A*. 1988. Vol. 19. P. 1523-1532. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02674026>
- Скориход В.В. Порошковые материалы на основе тугоплавких металлов и соединений. Киев: Техника, 1982. 167 с.
- Мініцький А.В., Биба Є.Г., Юркова О.І., Мініцька Н.В. Вплив параметрів плакування нікелем на властивості порошків карбіду вольфраму. *Міжвузівський збірник «Наукові нотатки»*. 2021. № 72. С. 13-17. DOI: <https://doi.org/10.36910/775.24153966.2021.72.2>
- Chuvil'deev V.N., Nokhrin A.V., Boldin M.S., Baranov G.V., Sakharov N.V., Belov V.Yu., Lantsev E.A., Popov A.A., Melekhin N.V., Lopatin Yu.G., Blagoveshchenskiy Yu.V., Isaeva N.V. Impact of mechanical activation on sintering kinetics and mechanical properties of ultrafine-grained 95W-Ni-Fe tungsten heavy alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. 2019. Vol. 773. P. 666-688. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.09.176>
- Толочин А.И., Лаптев А.В., Окунь И.Ю., Евич Я.И. Ударное уплотнение порошка вольфрама в широком диапазоне температур. II Механические свойства. *Металлофизика и новейшие технологии*. 2014. Т. 36. № 2. С. 217-228.
- 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. Iss. 2. P. 142-149. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma10020142>
- Duan L., Lin W., Wang J., Yang G. Thermal properties of W-Cu composites manufactured by copper infiltration into tungsten fiber matrix. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2014. Vol. 46. P. 96-100. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrmhm.2014.05.022>

8. Hamidi A.G., Arabi H., Rastegari S. Tungsten-copper composite production by activated sintering and infiltration. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2011. Vol. 29. Iss. 4. P. 538-541. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2011.03.009>
9. Мініцький А.В., Биба Є.Г., Мініцька Н.В., Власова О.В., Ведель Д.В. Розробка вольфрамідних сильнострумівих контактів на основі відходів металообробки. *Металознавство та обробка металів*. 2019. № 4 (92). С. 53-60. DOI: <https://doi.org/10.15407/mom2019.04.053>

Надійшла 11.04.2023



REFERENCES

1. Rabin, B.H., German, R.M. (1988). Microstructure effects on tensile properties of tungsten-Nickel-Iron composites. *Metallurgical Transactions A*, vol. 19, pp. 1523-1532, doi: <https://doi.org/10.1007/BF02674026>
2. Skorokhod, V.V. (1982). Powder materials based on refractory metals and compounds, Kyiv: Tekhnika, 167 p. [in Russian].
3. Minitsky, A.V., Byba, Ye.H., Yurkova, O.I., Minitska, N.V. (2021). Influence of nickel cladding parameters on the properties of tungsten carbide powders. *Interuniversity collection "Scientific Notes"*, no. 72, pp. 13-17, doi: <https://doi.org/10.36910/775.24153966.2021.72.2> [in Ukrainian].
4. Chuvil'deev, V.N., Nokhrin, A.V., Boldin, M.S., Baranov, G.V., Sakharov, N.V., Belov, V.Yu., Lantsev, E.A., Popov, A.A., Melekhin, N.V., Lopatin, Yu.G., Blagoveshchenskiy, Yu.V., Isaeva, N.V. (2019). Impact of mechanical activation on sintering kinetics and mechanical properties of ultrafine-grained 95W-Ni-Fe tungsten heavy alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 773, pp. 666-688, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.09.176>
5. Tolochyn, A.Y., Laptev, A.V., Okun, Y.Yu., Yevych, Ya.Y. (2014). Impact compaction of tungsten powder over a wide temperature range. II Mechanical properties. *Metallophysics and Advanced Technologies*, vol. 36, no. 2, pp. 217-228 [in Russian].
6. Montealegre-Melendez, I., Arevalo, C., Perez-Soriano, E.M., Neubauer, E., Rubio-Escudero, C., Kitzmantel, M. (2017). Analysis of the Influence of Starting Materials and Processing Conditions on the Properties of W/Cu Alloys. *Materials*, vol. 10, iss. 2, pp. 142-149, doi: <https://doi.org/10.3390/ma10020142>
7. Duan, L., Lin, W., Wang, J., Yang, G. (2014). Thermal properties of W-Cu composites manufactured by copper infiltration into tungsten fiber matrix. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, vol. 46, pp. 96-100, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2014.05.022>
8. Hamidi, A.G., Arabi, H., Rastegari, S. (2011). Tungsten-copper composite production by activated sintering and infiltration. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, vol. 29, iss. 4, pp. 538-541, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2011.03.009>
9. Minitsky, A.V., Byba, Ye.G., Minitska, N.V., Vlasova, O.V., Vedel, D.V. (2019). Development of tungsten high-current contacts based on metalworking waste. *Metalo. obrobka met.*, no. 4 (92), pp. 53-60, doi: <https://doi.org/10.15407/mom2019.04.053> [in Ukrainian].

Received 11.04.2023

Summary

A.V. Minitskyi, Dr. Sci. (Engin.), Professor, Professor of Department, e-mail: aminitsky@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5767-4071>, Web of Science ResearcherID: AAK-1245-2020

M.M. Yamshinskiy, Dr. Sci. (Engin.), Docent, Department Chair, e-mail: yamshinskiy@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-2293-2939>, Web of Science ResearcherID: I-4267-2017

Ye.H. Byba, PhD (Engin.), Docent, Associate Professor of Department, e-mail: byba.evgen@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1696-300X>, Web of Science ResearcherID: AAK-1757-2020

N.V. Minitska, PhD (Engin.), Docent, Associate Professor of Department, e-mail: minitska27@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5156-7328>, Web of Science ResearcherID: GRX-7301-2022

K.V. Polishchuk, graduate student, e-mail: kirillpolishchuk25@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-2309-1990>

I.V. Lukianenko, PhD (Engin.), Associate Professor of Department, e-mail: lukianenkoiv@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1043-9688>, Web of Science ResearcherID: J-7294-2017

B.V. Kyvhylo, graduate student, e-mail: kyvhylo.bohdan@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5890-9020>

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

Influence of sintering conditions on the structure formation of tungsten-based composite materials

The use of heavy tungsten alloys is essential for many industries, as these alloys are ideal for a variety of products due to their high density. The main problem in creating such alloys is the need to use high sintering temperatures, which significantly complicates the technology of producing tungsten alloys. To reduce the sintering temperatures of tungsten alloys, alloying elements are added to their composition to activate sintering processes at lower temperatures (nickel, iron and copper). The main task in forming the structure and properties of tungsten-based alloys is to ensure sintering conditions in the presence of the liquid phase, which contributes to the formation of a strong framework in the material structure and high density of the composite.

Various methods of producing tungsten-based alloys have been investigated and the influence of the chemical composition of alloying additives on the sintering process conditions has been studied. The effect of pressing and post-pressing pressure on the porosity of tungsten-based molds was determined. It is shown that in the pressure range of 200-700 MPa, the maximum compaction of tungsten powder occurs at pressures of 500-550 MPa, which provides porosity at the level of 35-37 %. The difference between the sintering mechanisms of W-Ni and W-Fe systems at a temperature of 1350 °C, which is sufficient for liquid-phase sintering with a nickel bond, and low for an iron bond, is shown.

The process of infiltration of a porous tungsten alloy framework with copper melt obtained from metal-working waste was studied. The conditions that ensure complete impregnation of the tungsten framework with copper at a temperature of 1200 °C and allow to obtain a porous material are determined.

The results of the work can be used to create tungsten-based products with high specific gravity and density, including from metalworking waste, which significantly reduces the cost of such materials.

Keywords

Powder, tungsten, nickel, copper, iron, pressing, sintering, porosity, impregnation, chips, re-pressing, density.