

**І.В. Андреев**, канд. техн. наук; **І.В. Савчук**

*Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України  
вул. Автозаводська, 2, 04074 м. Київ, e-mail: aigor@i.ua*

## **ВПЛИВ ДОБАВОК КИСЕНЬВМІСНИХ СПОЛУК ВОЛЬФРАМУ НА ПРОЦЕС АКТИВАЦІЇ СПІКАННЯ ПОРИСТИХ ВОЛЬФРАМОВИХ МАТЕРІАЛІВ**

*Вивчалися принципи процесу спікання "чистих", без сторонніх домішок, пористих зразків вольфрамівих матеріалів при використанні вихідних порошків вольфраму різної зернистості, які були попередньо розділені на окремі фракції (від 1 до 1000 мкм). Використано декілька способів активації спікання пористих вольфрамівих матеріалів: спікання у закритому реакторі; застосування водневого середовища, насиченого паром води; введення кисеньвмісних сполук вольфраму ( $WO_3$ ,  $H_2WO_4$ ) у суміші порошків вольфраму для спікання. Це дозволило отримати пористі вольфраміві матеріали різної зернистості при відносно низьких температурах (до 1200 °С). Встановлено, що застосування добавок оксиду  $WO_3$  та вольфраміві кислоти  $H_2WO_4$  активує спікання та призводить до підвищення міцності та пористості вольфрамівих матеріалів.*

**Ключові слова:** вольфраміві матеріали, активоване спікання, закритий реактор, пористість, дивертор, термоядерні установки.

### **Актуальність роботи**

Виходячи з аналізу сучасного й прогнозованого на найближчий час світового споживання енергії, реактор ITER буде побудований, раніше або пізніше. Майбутнє термоядерної енергії залежить насамперед від конструкційних матеріалів і їхньої вартості [1].

Через вплив навколишнього середовища, у якому мають працювати матеріали термоядерних установок, висувуються специфічні вимоги до їх властивостей. Пошук таких матеріалів є нелегким завданням, особливо при підвищених температурах. Термоядерні енергетичні установки повинні працювати десятиріччями, тому для матеріалів цих установок потрібні такі властивості як підвищені пластичність і в'язкість руйнування у відповідному температурному інтервалі, опір повзучості протягом тривалого часу, гарна теплопровідність, висока радіаційна стійкість і низька наведена активність. Для більшого терміну служби й кращої якості плазми в термоядерних реакторах матеріали повинні мати підвищену стійкість до ерозії.

У проекті ITER вольфрам використовується в якості матеріалу дивертора. Крім того, можливе застосування вольфрамівих матеріалів як захисного покриття для першої стінки бланкета. Також вольфрам широко використовується як твердотільна мішень для ядерного джерела нейтронів. У [2] наведено, що у більшості проектів термоядерних реакторів вольфрам є використовуваним у якості захисних матеріалів дивертора.

Виходячи з вищенаведеного, пошук оптимальних складів та властивостей вольфрамівих матеріалів, як «моно» складу, так і у сплаві з іншими сполуками, та розробка методів їх виготовлення є актуальним завданням на даний час.

Вольфрам має високу температуру плавлення (близько 3400 °С). Тому спікання пористих виробів з нього представляє певні складнощі. Розробка способів, які дозволяють значно спростити процес спікання вольфрамівих матеріалів, є досить актуальною задачею. Таким способом може бути активоване спікання виробів з легуючими добавками, які вводяться шляхом осадження на поверхні частинок вольфраму шару солі металу (нікелю) при випаровуванні розчинника із рідкого розчину солі металу або шару металу при електролізі [2–4]. Однак,

недоліком в цьому випадку є те, що для активації процесу спікання необхідно використовувати додаткові матеріали. Це робить неможливим одержання чистих, без сторонніх домішок вольфрамових матеріалів, що є надзвичайно важливим при створенні захисних вольфрамових матеріалів. У роботі [5] проводили спікання вольфраму з використанням нанопорошку вольфраму у якості активатора. Застосування способів, описаних в [3–5], дозволило значно знизити температуру спікання вольфраму з  $0,7-0,8 T_{пл}$  до  $0,4-0,5 T_{пл}$ .

У роботах [7–9] наводяться результати досліджень з одержання особливокрупнозернистих порошоків вольфраму з розміром часток до 1000 мкм, які можуть бути використані як вихідні компоненти для одержання виробів із заданою пористістю. Слід також зазначити, що дослідження з активації процесу спікання проведені на зразках, що виготовляються з порошоків вольфраму з розміром часток до 1 мкм. Однак результатів досліджень по активації спікання для більш грубозернистих порошоків вольфраму в літературі не наводиться.

Для інтенсифікації росту часток порошоків вольфраму в роботах [7–9] була застосована методика закритого реакційного простору. Активний ріст часток вольфраму відбувається у водневому газовому середовищі, яке насичене парами води, що утворюється при відновленні кисеньвмісних сполук вольфраму [1, 8]. Застосування закритого реакційного простору з підвищеною вологістю газового середовища при спіканні пористих вольфрамових матеріалів може бути корисним для активації процесу спікання чистих, без сторонніх домішок, порошоків вольфраму різної зернистості. Так, в роботі [9] розглянуто спосіб активації процесу спікання порошоків вольфраму різної зернистості (від 1 до 1000 мкм), які були попередньо розділені на окремі фракції відносно свого розміру із застосуванням закритого реакційного простору й використанням водню, насиченого парами води. Отримані результати показали, що така методика дозволяє активувати процес спікання порошоків вольфраму при відносно низьких температурах (1000–1200 °С), забезпечуючи розмір пор спеченого матеріалу в широких межах залежно від розмірів вихідних часток порошку вольфраму.

В цій роботі вивчався вплив кількості пари води у водневому газовому середовищі на активацію спікання часточок порошоків вольфраму різної зернистості (до 1000 мкм) при введенні 10 % (по масі) оксиду  $WO_3$  та вольфрамової кислоти  $H_2WO_4$  у суміші порошоків вольфраму для спікання. Виходячи з того, що вказані сполуки мають різний вміст зв'язаної води, вони мають дати різні якісні показники спікання зразків вольфрамових матеріалів як в проточній газовій системі, так і у закритому реакційному просторі.

### Методика експерименту

Нами було одержано порошки вольфраму різної зернистості із застосуванням закритого реакційного простору. Одержані порошки розділено методом ситового аналізу на



Рис. 1. Спресовані зразки порошоків вольфраму різної зернистості з додаванням 10 % (по масі) оксиду  $WO_3$ : 1 – 3–5 мкм, 2 – 5–100 мкм, 3 – 40–100 мкм, 4 – 100–300 мкм, 5 – 300–500 мкм, 6 – 500–1000 мкм

вказаних фракцій спресовано дослідні зразки  $\varnothing 9 \times 9$  мм (рис. 1). При цьому порошки

окремі фракції 1–10; 5–100; 40–100; 100–300; 300–500; 500–1000 мкм. Кисеньвмісні сполуки вольфраму  $WO_3$  та  $H_2WO_4$  вводили шляхом змішування з відповідною фракцією порошку вольфраму й подальшим пластифікуванням шихти. При цьому оксид  $WO_3$  та вольфрамову кислоту  $H_2WO_4$  вводили шляхом заміни 10 % (по масі) порошку вольфраму відповідної фракції. Із

попередньо було оброблено пластифікатором на основі синтетичного каучуку в бензині для покращення пресуємості. Вміст каучуку в бензині складав 5 % (по об'єму).

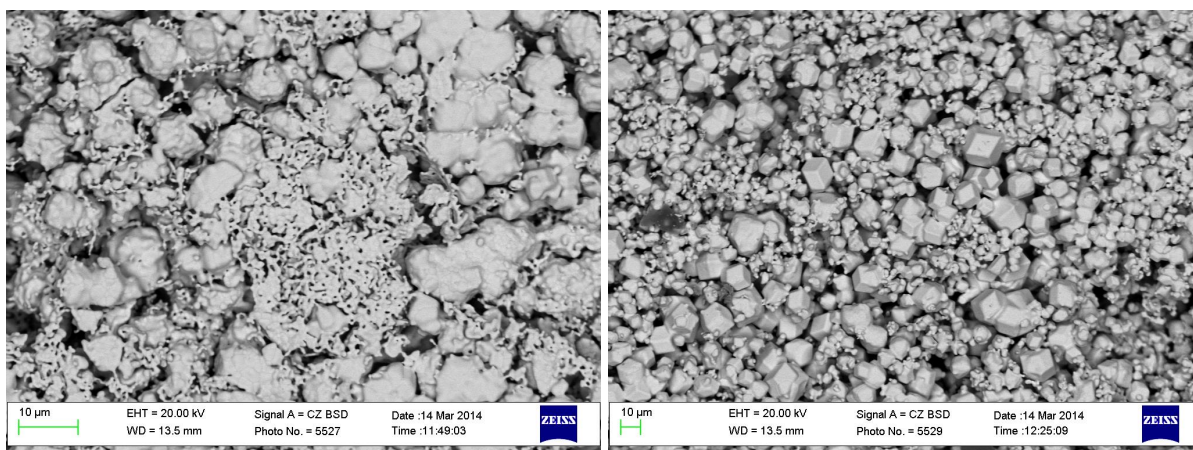
Підготовку вихідних порошків до формування (грануляцію та пресування) здійснювали за загальноприйнятою методикою для порошкової металургії. Тиск пресування складав 70 МПа. Пресування дослідних зразків здійснювали за допомогою гідравлічного преса. Спінання спресованих зразків здійснювали в середовищі водню при температурі 1200 °С протягом 1 год. в класичній проточній системі та із застосуванням закритого реактора, загальний опис та принцип дії якого докладно описано у роботі [6]. При спіканні у закритому реакторі, після видалення пластифікатора із зразків, в простір закритого реактора було введено воду для насичення водневого газового середовища парами води. При спіканні дотримувались особливої обережності внаслідок того, що дослідні зразки, із яких був видалений пластифікатор, були надзвичайно крихкими.

Випробування спечених зразків вольфрамових пористих матеріалів на стиск здійснювали за допомогою випробувальної машини FP-10. Дослідний зразок розміщували між двома твердосплавними опорами і навантажували зі швидкістю 1 мм/хв. Границю міцності під час стискання визначали відношенням зусилля руйнування зразка до його площі перерізу.

Визначення пористості зразків здійснювали за допомогою зображень мікроструктур досліджуваних матеріалів, отриманих на електронному мікроскопі при різних збільшеннях. Для зразків з середнім розміром вольфрамових часточок 500-1000 мкм вибирались зображення отримані при збільшенні  $\times 50$ – $100$ , для зразків виготовлених з вольфрамових частинок розмірами  $< 500$  мкм – зображення отримані при збільшенні  $\times 100$ – $500$ , для зразків, виготовлених з вольфраму розмірами 1–5 мкм, використовували зображення отримані при збільшенні  $\times 1000$ – $2000$ .

### Результати дослідження та їх обговорення

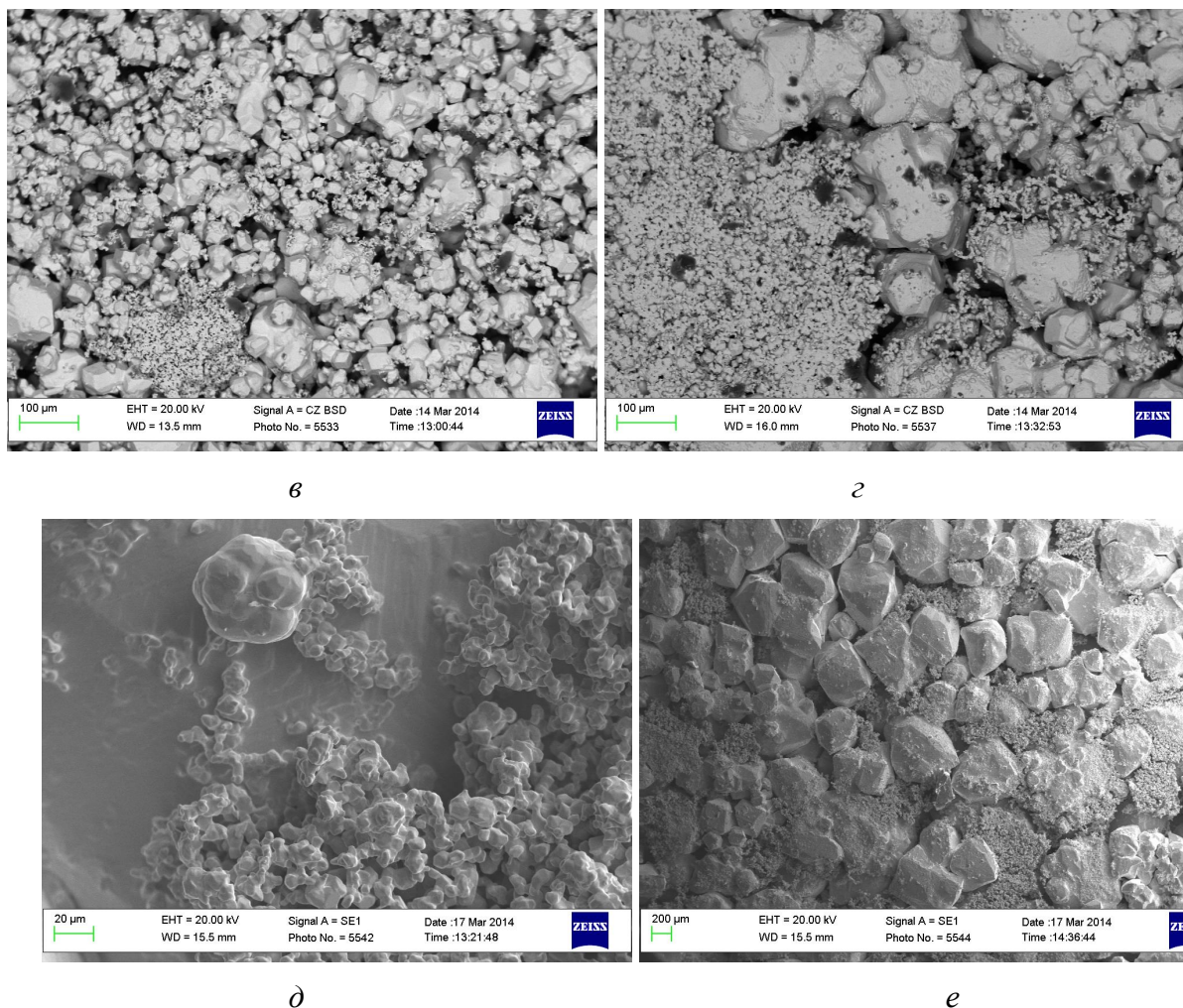
Застосування водневого газового середовища, насиченого парами води, в закритому реакторі дозволило спекти зразки навіть із особливо надкрупнозернистого порошку вольфраму. Мікроструктури спечених зразків із додаванням оксиду  $WO_3$  при застосуванні закритого реакційного простору наведені на рис. 2.



а

б

Рис. 2. Зображення мікроструктур спечених зразків вольфраму різної зернистості з додаванням 10 % (по масі) оксиду  $WO_3$ ; а – 3–5 мкм, б – 5–100 мкм, в – 40–100 мкм, г – 100–300 мкм, д – 300–500 мкм, е – 500–1000 мкм



Закінчення рис. 2.

Як видно з наведених зображень мікроструктур, оксид  $WO_3$  відновлюється до вольфраму, розташовуючись між більшими частками вихідного порошку та утворюючи між ними різні ланцюжки. На рис. 2 чітко видно вплив процесів, пов'язаних з ефектом переносу вольфрамвмісної речовини  $WO_2(OH)_2$  через газову фазу, що, відновлюючись до вольфраму на поверхні більших часток, дозволяє їх консолідувати. Результати випробування спечених зразків вольфрамових матеріалів із додаванням оксиду  $WO_3$  на стиск наведені в табл. 1.

Таблиця 1. Результати випробування спечених зразків із добавкою 10%  $WO_3$  на стиск

| № п/п | Фракції порошку вольфраму, мкм | Границя міцності вольфрамового матеріалу при стиску $R_{cm}$ , МПа |                  |
|-------|--------------------------------|--|------------------|
|       |                                | Проточний реактор  | Закритий реактор |
| 1     | 1–5                            | 3,2  | 5,4              |
| 2     | 5–100                          | 2,7  | 4,6              |
| 3     | 40–100                         | 1,6  | 4,1              |
| 4     | 100–300                        | 1,5  | 2,1              |
| 5     | 300–500                        | 0,3  | 1,5              |
| 6     | 500–1000                       | 0,15   | 0,5              |

Результати випробування спечених зразків із добавкою 10 % (по масі) вольфрамової кислоти  $H_2WO_4$  наведено у табл. 2. З цих даних видно, що збільшення кількості зв'язаної у кисеньвмісній сполуці води дозволяє більш повно реалізувати окислювально-відновні процеси у міжчастинковому просторі зразка вольфраму, що спікається у закритому реакційному просторі і, відповідно, покращити умови створення міжчастинкових контактів.

Таблиця 2. Результати випробування спечених зразків із добавкою 10%  $H_2WO_4$  на стиск

| № п/п | Фракції порошку вольфраму, мкм | Границя міцності вольфрамового матеріалу при стиску $R_{cm}$ , МПа |                  |
|-------|--------------------------------|--|------------------|
|       |                                | Проточний реактор  | Закритий реактор |
| 1     | 1–5                            | 3,0  | 6,3              |
| 2     | 5–100                          | 2,6  | 5,7              |
| 3     | 40–100                         | 1,7  | 5,3              |
| 4     | 100–300                        | 1,7  | 4,8              |
| 5     | 300–500                        | 0,2  | 1,5              |
| 6     | 500–1000                       | 0,15   | 0,6              |

В результаті спікання зразків у закритому реакторі не відбувається видалення продуктів реакції відновлення кисеньвмісних сполук за межі реакційного простору у порівнянні з проточним реактором. А тому, у закритому реакторі має місце інтенсифікація процесів переносу вольфрамвмісної речовини і відбувається модифікація міжчастинкових контактів між частинками вольфраму.

При використанні активації спікання насиченням водню парою води усадка (5–8 %) відбувається тільки при використанні порошків вольфраму із розмірами частинок до 10 мкм, тобто у найдрібнішій фракції. Із збільшенням фракції порошків вольфраму при спіканні зразків усадка не відбувається. Але міцність зразків, спечених у закритому реакційному просторі, у порівнянні з проточним реактором, при випробуванні їх на стиск підвищується досить суттєво (до 3 разів), що вказує на збільшення площі міжчастинкових контактів в результаті масопереносу газоподібної вольфрамвмісної речовини через газову фазу (табл. 1, 2). Цей механізм активації спікання вольфрамових матеріалів у закритому реакторі дозволяє підвищити на порядок міцність матеріалів, спечених при введенні у суміш для спікання кисеньвмісних сполук вольфраму  $WO_3$  та  $H_2WO_4$  (табл. 1, 2) у порівнянні з матеріалами, спеченими без їх додавання (табл. 3) [9].

Таблиця 3. Результати випробування спечених вольфрамових зразків без добавок на стиск

| № п/п | Фракції порошку вольфраму, мкм | Границя міцності вольфрамового матеріалу при стиску $R_{cm}$ , МПа |                  |
|-------|--------------------------------|--|------------------|
|       |                                | Проточний реактор  | Закритий реактор |
| 1     | 1–5                            | 3,3  | 7,2              |
| 2     | 5–100                          | 1,1  | 2,9              |
| 3     | 40–100                         | 0,4  | 0,9              |
| 4     | 100–300                        | 0,1  | 0,3              |
| 5     | 300–500                        | зруйнувався  | 0,2              |
| 6     | 500–1000                       | -//-   | 0,1              |

Вимірювання пористості спечених зразків вольфрамових матеріалів показало тенденцію до зменшення загальної пористості із збільшенням розміру фракції вихідного порошку вольфраму, із якого були виготовлені власне дослідні зразки. А вимірювання пористості спечених зразків з добавками кисеньвмісних сполук показало дещо вищий ступінь пористості (рис. 3, 4) у порівнянні із зразками, спеченими без добавок (рис. 5). Це, насамперед, може бути обумовлено підвищенням міжчастинкового тертя та тертя частинок при їх формуванні внаслідок підвищення сумарної питомої поверхні порошку, що пресується. Найкраще це видно при формуванні найбільш грубозернистих порошків вольфраму із найменшою питомою поверхнею. Пористість спечених зразків становить близько 40 %. Крім того, форма частинок вольфраму є близькою до правильної форми куба. Тому є присутнім ефект більш щільної упаковки крупних частинок вольфраму при формуванні дослідних зразків за інших рівних умов. В цілому ж це може бути одним із інструментів певного регулювання загальної пористості зразків при збереженні відповідно основного розміру пор, що залежить від розміру вихідних частинок вольфраму.

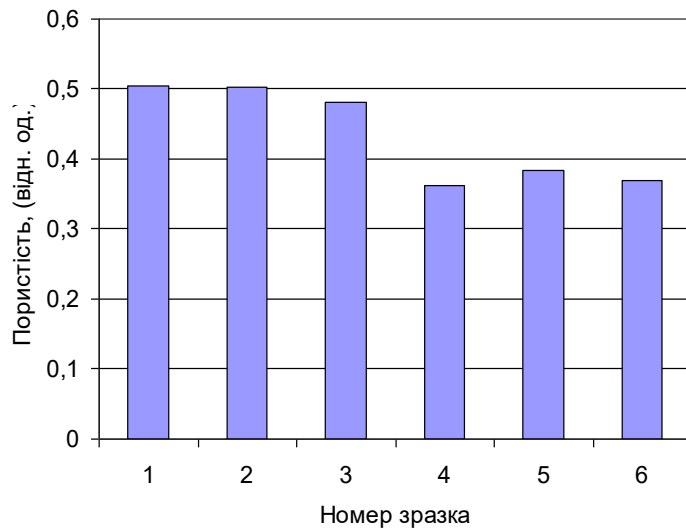


Рис. 3. Відносна пористість спечених зразків з додаванням 10%  $WO_3$ ; 1 – 3–5 мкм, 2 – 5–100 мкм, 3 – 40–100 мкм, 4 – 100–300 мкм, 5 – 300–500 мкм, 6 – 500–1000 мкм

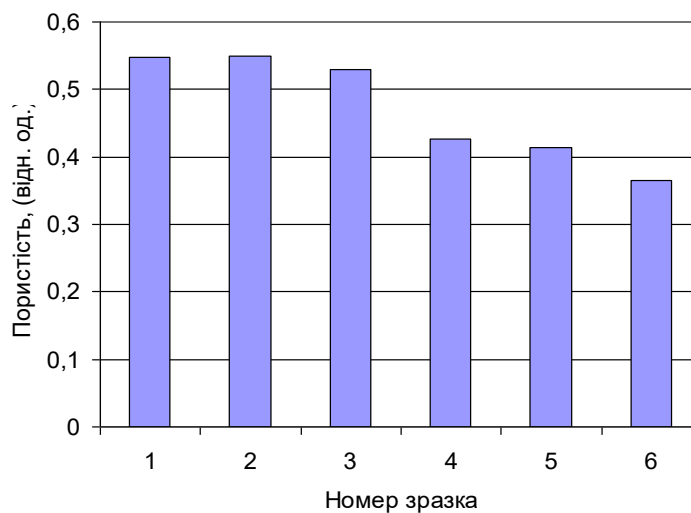


Рис. 4. Відносна пористість спечених зразків з додаванням 10%  $H_2WO_4$ ; 1 – 3–5 мкм, 2 – 5–100 мкм, 3 – 40–100 мкм, 4 – 100–300 мкм, 5 – 300–500 мкм, 6 – 500–1000 мкм

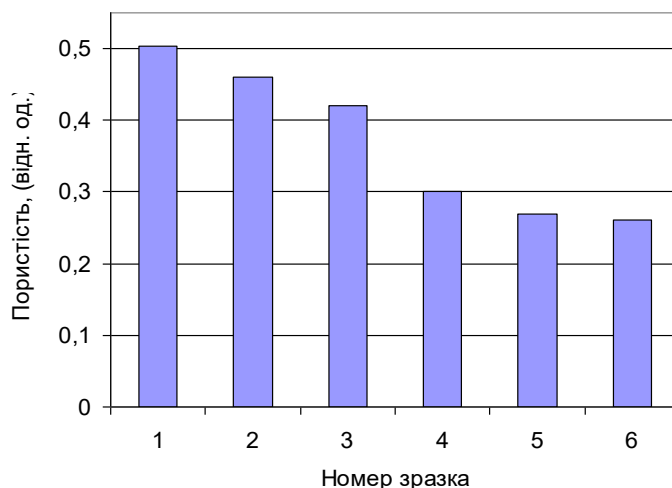


Рис. 5. Відносна пористість спечених зразків вольфрамових матеріалів без додавання вольфрамвмісних сполук; 1 – 3–5 мкм, 2 – 5–100 мкм, 3 – 40–100 мкм, 4 – 100–300 мкм, 5 – 300–500 мкм, 6 – 500–1000 мкм

При наведених у цій роботі способах активації спікання вольфрамових матеріалів пориста структура зразків практично повністю забезпечується станом вихідного порошку вольфраму. Найбільша однорідність пор за розмірами забезпечується при пресуванні моночастинок вольфраму. При пресуванні частинок у вигляді конгломератів відбувається їх подрібнення і певне заповнення частини пор більш дрібними частинками, що призводить до значного розкиду розмірів пор. Тому при виготовленні відповідних виробів перед пресуванням має бути застосоване сортування частинок порошку вольфраму не тільки за розмірами, а й за формою та монокристалічністю.

Таким чином, застосування закритого реакційного простору з підвищеною вологістю газового (водневого) середовища та введення 10 % (по масі) кисеньвмісних сполук вольфраму ( $WO_3$ ,  $H_2WO_4$ ) у вихідні суміші порошоків вольфраму різної зернистості активує процес спікання чистих, без сторонніх домішок пористих вольфрамових матеріалів. Запропонований метод дозволяє підвищити на порядок міцність отриманих матеріалів у порівнянні з матеріалами, які спечені без додавання у суміш для спікання кисеньвмісних сполук вольфраму  $WO_3$  та  $H_2WO_4$ .

I. V. Andreiev, I. V. Savchuk

*Bakul Institute for Superhard Materials NAS of Ukraine*

#### **INFLUENCE OF ADDITIVES OF OXYGEN-CONTAINING TUNGSTEN COMPOUNDS ON THE PROCESS OF ACTIVATION OF SINTERING OF POROUS TUNGSTEN MATERIALS**

*The principles of the sintering process of «pure», without impurities, porous samples of tungsten materials using the original tungsten powders of different grain sizes, which were previously divided into separate fractions (from 1 to 1000  $\mu\text{m}$ ), were studied. Several methods of activating sintering of porous tungsten materials are used: sintering in a closed reaction space and hydrogen, steam-saturated water; introduction of oxygen-containing tungsten compounds ( $WO_3$ ,  $H_2WO_4$ ) in a mixture of tungsten powders for sintering. This allowed to obtain porous tungsten materials of different grain sizes at relatively low temperatures (up to 1200 °C). It was found that the use of additives of  $WO_3$  oxide and tungstic acid  $H_2WO_4$  activates sintering and leads to increased strength and porosity of tungsten materials.*

**Key words:** tungsten materials, activated sintering, closed reactor, porosity, diverter, thermonuclear installations.

И.В. Андреев, И.В. Савчук

Институт сверхтвердых материалов им. В.М. Бакуля НАН Украины

### ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК КИСЛОРОДСОДЕРЖАЩИХ СОЕДИНЕНИЙ ВОЛЬФРАМА НА ПРОЦЕСС АКТИВАЦИИ СПЕКАНИЯ ПОРИСТЫХ ВОЛЬФРАМОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Изучались принципы процесса спекания «чистых», без посторонних примесей, пористых образцов вольфрамовых материалов при использовании исходных порошков вольфрама разной зернистости, которые были предварительно разделены на отдельные фракции (от 1 до 1000 мкм). Использовано несколько способов активации спекания пористых вольфрамовых материалов: спекание в закрытом реакторе; применение водородной среды, насыщенной парами воды; введение кислородсодержащих соединений вольфрама ( $WO_3$ ,  $H_2WO_4$ ) в смеси порошков вольфрама для спекания. Это позволило получить пористые вольфрамовые материалы разной зернистости при относительно низких температурах (до 1200 °С). Установлено, что использование добавок оксида  $WO_3$  и вольфрамовой кислоты  $H_2WO_4$  активизирует спекание и приводит к повышению прочности и пористости вольфрамовых материалов.

**Ключевые слова:** вольфрамовые материалы, активированное спекание, закрытый реактор, пористость, дивертор, термоядерные установки.

#### Література

1. Голубчиков Л.Г., Курбатов Д.К. Материаловедческие задачи реактора ИТЭР // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. – 2004. № 2 – С. 80–94.
2. Даценко О. А., Кондрик А.И. Перспективы использования вольфрама в термоядерных установках // Вісник Харківського університету. Сер. фізична: Ядра, частинки, поля. – 2010. – Т. 46, вип. 2. – С. 4–13.
3. Lisovsky A. F. Formation of Mesostructure in WC–Co Cemented Carbides. A review // Science of Sintering. – 2011. – V. 43. – P. 162–173.
4. Смирнов В. П. Термоядерная энергетика – крупнейший международный инновационный проект // Рос. Хим. журн. – 2008. – Т. 52, № 6. – С. 79–94.
5. Федорченко И.М., Андриевский Р.А. Основы порошковой металлургии. – К: Изд-во Акад. наук Украины, 1963. – 420 с.
6. Бондаренко В.П., Андреев И.В., Савчук И.В., Мартынова Л.М., Ващенко А.Н. Особенности восстановления вольфрама из его оксида  $WO_3$  в закрытом реакторе // Сверхтвердые материалы. – 2005. – № 2. – С. 35–44.
7. Бондаренко В.П., Андреев И.В. Кинетический анализ реакций восстановления  $WO_3$  водородом в закрытом реакторе // Сверхтвердые материалы. – 2006. – № 2. – С. 43–51.
8. Bondarenko V.P., Andreyev I.V., Savchuk I.V., et al. / Recent researches on the metal-ceramic composites based on the decamicron-grained WC // Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2013. – V. 39. – P. 18–31/
9. Andreiev I.V., Bondarenko V.P., Tarasenko L.G. Some Features of Sintering of Tungsten Powders // Science of Sintering. – 2016. – V. 48. – P. 191–196.

Надійшла 30.06.21

#### References

1. Golubchikov, L.G., & Kurbatov, D.K. (2004). Materialovedcheskie zadachi reaktora ITER [Materials science problems of the ITER reactor]. *Voprosi atomnoi nauki i tekhniki. Ser. Termoiadernyi sintez – Questions of atomic science and technology. Ser. Thermonuclear fusion*, 2, 80–94 [in Russian].
2. Datsenko, O. A., & Kondrik, A.I. (2010). Perspektivy ispolzovaniia volframa v termoiadernykh ustanovkakh [Prospects for the use of tungsten in thermonuclear

- installations]. *Visnyk Kharkivskoho universytetu. Ser. fizychna: Yadra, chastynky, polia – Bulletin of Kharkiv University. Ser. physical: Nuclei, particles, fields*, 46, 2, 4–13 [in Russian].
3. Lisovsky, A. F. (2011). Formation of Mesostructure in WC–Co Cemented Carbides. A review. *Science of Sintering*, 43, 162–173.
  4. Smirnov, V. P. (2008). Termoiadernaia enerhetika – krupneishii mezhdunarodnyi innovatsionnyi proekt [Fusion energy is the largest international innovative project]. *Rossiiskii khimicheskii zhurnal – Russian chemical journal*. 52, 6, 79 – 94 [in Russian].
  5. Fedorchenko, I.M., & Andriyevskiy R.A. (1963). *Osnovy poroshkovoii metallurhii [Powder Metallurgy Fundamentals]*. Kiev: Izd-vo Akad. Nauk Ukrainy [in Russian].
  6. Bondarenko, V.P., Andreyev, I.V., Savchuk, I.V., et al. (2005). Osobennosti vosstanovleniia volframa iz yeho oksida WO<sub>3</sub> v zakrytom reaktore [Features of the reduction of tungsten from its oxide WO<sub>3</sub> in a closed reactor]. *Sverkhtverdye materialy – Superhard materials*, 2, 35–44 [in Russian].
  7. Bondarenko, V.P., & Andreyev, I.V. (2006). Kineticheskii analiz reaktsii vosstanovleniia WO<sub>3</sub> vodorodom v zakrytom reaktore [Kinetic analysis of the reactions of reduction of WO<sub>3</sub> with hydrogen in a closed reactor]. *Sverkhtverdye materialy – Superhard materials*, 2, 43–51 [in Russian].
  8. Bondarenko, V.P., Andreyev, I.V., Savchuk, I.V., et al. (2013). Recent researches on the metal-ceramic composites based on the decamicron-grained WC. *Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 39, 18–31.
  9. Andreiev, I.V., Bondarenko, V.P., & Tarasenko L.G. (2016). Some Features of Sintering of Tungsten Powders. *Science of Sintering*, 48, 191–196.

УДК 669.018.025

DOI: 10.33839/2708-731X-24-1-367-371

**О. О. Матвійчук**, канд. техн. наук, **В. П. Бондаренко**, член-кор. НАН України,  
**О.В. Євдокимова**, канд. техн. наук

*Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України,  
вул. Автозаводська 2, 04074 м. Київ, e-mail: o.o.matviichuk@gmail.com*

### **ОБҐРУНТУВАННЯ ВМІСТУ ПОЛІМЕРНОГО ЗВ'ЯЗУЮЧОГО В ТВЕРДОСПЛАВНІЙ СУМІШІ ПО КРИТЕРІЮ ЗБЕРІГАННЯ КАРКАСУ ПІСЛЯ ВІДГОНКИ ПОЛІМЕРУ**

Надано обґрунтування вмісту полімерного зв'язуючого в твердосплавній суміші, достатнього для виготовлення плавких філаментів, що застосовуються в 3D друці методом поширового нарощування. Верхній вміст полімерного зв'язуючого, при якому зберігається каркас після відгонки та відбувається усадка при спіканні, становить 62,5 % (об.) або 37,5 % (об.) наповнювача. Нижній граничний вміст зв'язуючого, при якому в'язкість прямує до нескінченності і виріб надрукувати неможливо, становить 36 % (об.) або 64 % (об.) наповнювача. Оскільки обґрунтування вмісту каучука і парафіна або полімеру по критерію зберігання металевого каркасу після відгонки зв'язуючого не існує, цілком логічним буде прийнятим вміст зв'язуючого у твердосплавній суміші для виготовлення філаменту 50 % (об.), що відповідає практиці твердосплавного виробництва для отримання щільних деталей після відгонки зв'язуючого та спікання. Вміст зв'язуючого менше 50 % (об.) треба уточнювати експериментально при використанні різних видів полімерів.

**Ключові слова:** тверді сплави, 3D друк, високонаповнені полімери, адитивне виробництво