

УДК 621.762.242: 669.27

**В. П. Бондаренко**, член-кор. НАН України, **І. В. Андрєєв**, канд. техн. наук,  
**Л. Г. Тарасенко**

*Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, м. Київ, Україна*

## **ПЕРСПЕКТИВИ СТВОРЕННЯ ВИСОКОЕФЕКТИВНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ЗАХИСТУ ОБЕРНЕНИХ ДО ПЛАЗМИ ДЕТАЛЕЙ ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА (огляд)**

За результатами проведеного аналізу літературних джерел показано, що вольфрамові сплави є найбільш ефективними матеріалами для захисту обернених до плазми деталей термоядерного реактора і запропоновано комплекс досліджень з визначенням умов одержання перспективних захисних вольфрамових матеріалів на основі порошків вольфраму з різною формою та розмірами частинок на їх структуру і фізико-механічні властивості.

**Ключові слова:** дивертор, термоядерний реактор, вольфрамові матеріали.

Одним з найбільш крупних міжнародних інноваційних проєктів наразі є термоядерна енергетика. Зусиллями кількох держав Європи, Азії та США створюється сучасний інтернаціональний термоядерний експериментальний реактор (ІТЕР) (рис.1) [1–7]. Його характеристики мають наступні значення: радіус плазми: 6,2 м; об'єм плазми: 840 м<sup>3</sup>; сила струму плазми: 15МА; густина плазми: 10<sup>20</sup> м<sup>-3</sup>; температура плазми: 20кеВ, або 200 млн. град. Цельсія; термоядерна потужність: 500 МВт.

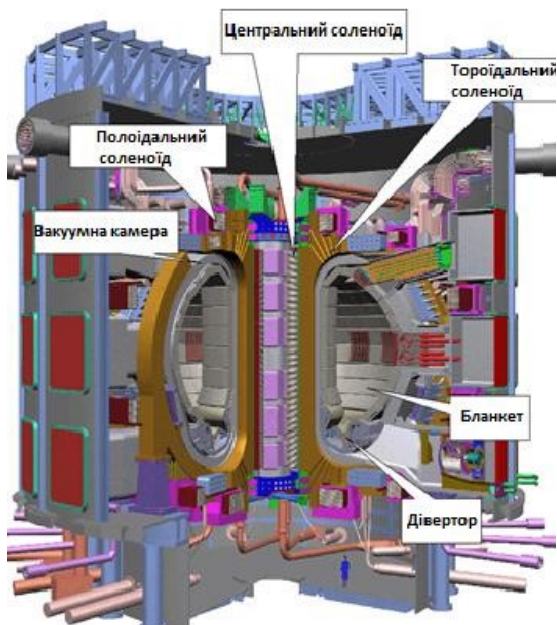


Рис. 1. Схема експериментального термоядерного реактора ІТЕР

Одним із провідних фахівців у галузі термоядерної енергетики, академіком РАН В. П. Смірновим, було показано, що в наш час на перший план виходить створення матеріалів для термоядерного реактора [3]. При цьому важливою проблемою є створення конструкційних матеріалів, в першу чергу матеріалів першої стінки робочої камери бланкета і дивертора (рис. 2, 3), які повинні мати високі ерозійну та корозійну стійкість при дії високоенергетичних потоків частинок випромінювання [8]. Особливо сильно розпилюються плити дивертора, бо він є єдиним місцем, де плазма торкається матеріалів токамака.

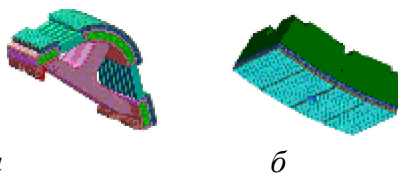


Рис. 2. Дом-лайнєр для диверторних касєт (а) і компонєнти 1-ої стінки (б) [7]

В роботі [9] показано, що із найбільш перспективним матеріалом для використання в якості конструкційних захисних елементів в ІТЕР є вольфрам (рис. 4), бо експлуатаційна

стійкість стінки з вольфраму в 20 разів перевищує стійкість стінки із заліза, міді, вуглецю, берилію і в 10 разів – з молібдену [10].



Рис. 3. 1/8 частина дивертора [7]

У 2006 році опублікована робота Міронова С. В., Азізова Е. А. та Євтікіна В. А. з співробітниками [11], в якій показано, що навіть при використанні стінки з вольфраму бажано створити рідке покриття з літію, яке весь час поновлюється через пори матеріалу стінки. Хоча ця ідея, ще тільки проробляється, але вона вказує на те, що на сьогоднішній день важливим є створення не тільки компактних, а й пористих матеріалів для плиток дивертора [12], які мало взаємодіяли би з розплавом і парою літію. Залежність розчинності металів в розплаві літію від оберненої температури наведена на рис. 5.

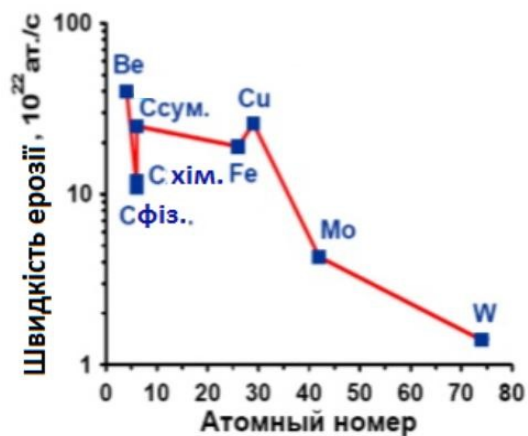


Рис. 4. графік залежності швидкості ерозії матеріалів від їх атомного номера

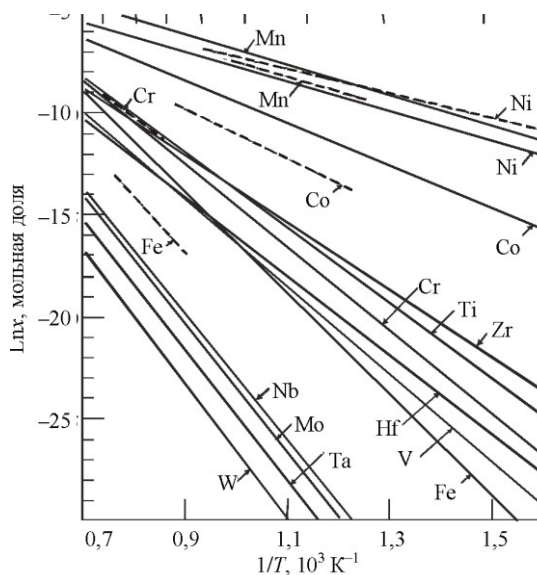


Рис. 5. Розчинність металів у літії високої чистоти: — — розрахунок, ---- — експеримент

Найменшу розчинність має вольфрам. Незначно більшу розчинність мають тантал, молібден та ніобій. Найбільшу розчинність мають Ni, Mn, Co. Проміжні значення розчинності мають Hf, V, Fe, Cr, Ti, Zr. Тому і з позиції розчинності в літії найбільш перспективним є вольфрам.

Пористі матеріали з вольфраму можна отримати лише спіканням пресовок з порошку вольфраму. Однак чистий вольфрам погано спікається. Тому вирішено досліджувати спікання

пресовок із порошку вольфраму, у які будуть додані більш легкоплавкі метали, що будуть мати високі ерозійну та корозійну стійкість та активувати процес спікання вольфраму.

В ІНМ ім. В. М. Бакуля НАН України розроблено наукові основи та технологічні аспекти отримання порошків вольфраму різної форми та розмірами частинок від 1 до 700 мкм (рис. 6) [13; 14].

Використання таких порошків створює можливості отримувати пористі матеріали з різними розмірами і формою пор, різною міцністю каркасу із зерен вольфраму, різною здатністю капілярного транспортування літію. Вимоги до таких матеріалів наведено в роботах [15–18].

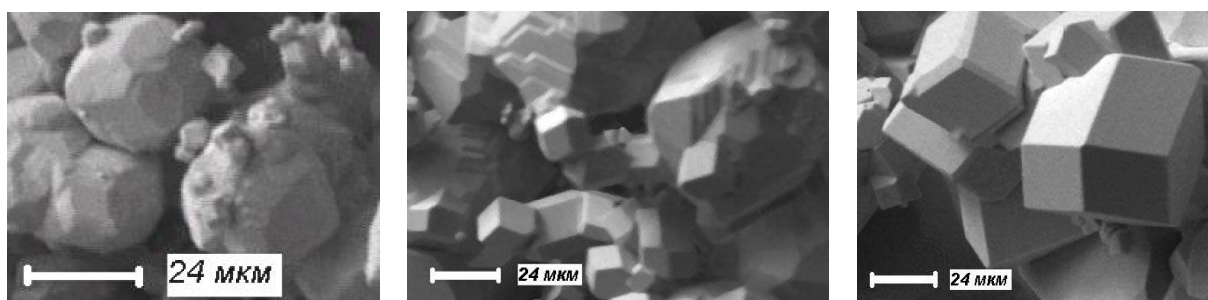


Рис. 6. Порошки вольфраму з різною формою та розмірами частинок

Згідно з уявленнями автора роботи [19] (Я. Е. Гегузін) активувати спікання повинні матеріали, що розчиняють в значній кількості вольфрам. Одним із таких матеріалів є нікель. Однак в зв'язку з тим, що нікель сильно розчинюється в розплаві літію (див. рис. 5) необхідно визначити можливість активування процесу спікання вольфраму іншими матеріалами, що слабо розчиняються в розплаві літію, але самі значно розчиняють вольфрам.

Виходячи із вище наведеного, на думку авторів даної роботи, в області одержання захисних вольфрамових матеріалів для потреб атомної галузі доцільним та актуальним буде проведення наступних робіт:

- дослідження закономірностей впливу розмірів і форми частинок вольфраму на формування порової структури спечених вольфрамових однофазних матеріалів;
- вивчення закономірностей впливу штучного фракційного складу порошку вольфраму на формування порової структури спечених вольфрамових однофазних матеріалів;
- дослідження закономірностей впливу покриттів частинок вольфраму металами, що розчиняють вольфрам чи розчиняються у вольфрамі, на формування порової структури спечених вольфрамових однофазних матеріалів;
- встановлення закономірностей розпилення отриманих пористих і компактних матеріалів пучками електронів, нейтронів та іонів літію;
- вивчення процесів взаємодії пористих вольфрамових матеріалів з парами літію та рідким літієм;
- оцінка газопроникності та одержання механічних властивостей пористих матеріалів.

Успішне проведення таких досліджень дозволить розробити та ефективно застосувати нові високоефективні вольфрамові матеріали у якості захисних конструкційних елементів термоядерного реактора.

*По результатам проведенного анализа литературных источников было показано, что вольфрамовые сплавы являются наиболее эффективными материалами для защиты повернутых к плазме деталей термоядерного реактора и предложен комплекс исследований с определением условий перспективных защитных вольфрамовых материалов*

на основе порошков вольфрама с разной формой и размерами частиц на их структуру и физико-механические свойства.

**Ключевые слова:** дивертор, термоядерный реактор, вольфрамовые материалы.

*The results of the analysis of the literature showed that tungsten alloys are the most effective materials to protect the inverse plasma fusion reactor components and the complex of research to determine the conditions obtaining promising protective tungsten materials based on tungsten powders with different particle size and shape of their structure and physical and mechanical properties.*

**Key words:** diverter, thermonuclear reactor, tungsten materials.

### Література

1. European fusion power plant studies / Cook I., Maisonnier D., Taylor N. P. et al. // Fusion Sci. Techn. – 2005. – Vol. 47. – P. 384–392.
2. Велихов Е. П., Смирнов В. П. Состояние исследований и перспективы термоядерной энергетики: доклад // Вестник Российской академии наук. – 2006. – Т. 76, N 5. – С. 419–426.
3. Смирнов В. П. Термоядерная энергетика – крупнейший международный инновационный проект // Рос. хим. журн., 2008. – С. 79–94.
4. Энергетика будущего. Международный проект ИТЭР. Под ред. академика Е. П. Велихова, УТС-Центр, 2005. – 34 с.
5. Велихов Е. П., Путвинский С.В. Термоядерная энергетика, статус и роль в долгосрочной перспективе, Термоядерный реактор. 1999, <http://thermonuclear.narod.ru/rev.html>.
6. Велихов Е. П. Энергетика будущего // Международный проект ИТЕР, М. – С. 40–43.
7. Сворень Р. Н., Термоядерная энергетика, сквозь тернии к звездам // Наука и жизнь. – 2001. – Ч. 2. – № 9.
8. Глебовский В. Г. Исследование процессов получения и особенностей свойств высокочистого вольфрама // с: фізична: Ядра, частинки, поля. – Вісник Харківського університету, № 845, вып. 2.– 2009. – Вип. 1/41. – С. 67–70.
9. Голубчиков Л. Г., Курбатов Д. К. Материаловедческие задачи реактора ИТЕР // Вопросы атомной науки и техники // Сер. Термоядерный синтез– 2004. – С. 80–94.
10. Даценко О. А., Кондрик А.И. Перспективы использования вольфрама в термоядерных установках // сер. фізична: Ядра, частинки, поля, вип. 2, т. 46, Вісник Харківського університету, 2010. – № 899. – С. 4–13.
11. Experiments with lithium limiter on T-11M tokamak and applications of the lithium capillary-pore system in future fusion reactor devices / S. V. Mirnov, E. A. Azizov, V. A. Evtikhin et al. // Plasma Physics and Controlled Fusion, 2006. – vol. 48. – № 6. – P. 821–837.
12. Евтихин В. А., Голубчиков Л. Г. Дивертор термоядерного реактора. Пат. РФ № 2051430, февраль – 1996 г. МПК G21B1/00. – Заявл. 07.02.1995, Опубл. 27.12.1995.
13. Особенности восстановления вольфрама из его оксида WO<sub>3</sub> в закрытом реакторе / В. П. Бондаренко, И. В. Андреев, И. В. Савчук, и др. // Сверхтвердые материалы. – 2005. – №2. – С. 35–44.
14. Андреев И. В., Бондаренко В. П. Новое направление в технологии получения порошков вольфрама // Современные спеченные твердые сплавы: Сб. науч. трудов / под общ. ред. Н. В. Новикова. – Киев: ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2008. – С. 216–225.

15. Маханьков А. Н. Вольфрамовая облицовка диверсорной мишени для термоядерного реактора токамак. Автореф. дис... канд. технич. наук: 01.04.13, 05.02.01 // Науч.-исслед. ин-т электрофиз. аппаратуры им. Д. В. Ефремова. – С. Петербург, 2003. – 25 с.
16. Коршунов С. Н. Исследование воздействия плазменных потоков и ионных пучков на обращённые к плазме материалы термоядерного реактора. Автореф. дис... канд физ.-мат. наук: 01.04.07 // М.: Моск. гос. Инженерно-физ. ин-т. – 2007. – 23 с.
17. Получение вольфрама особой чистоты / Ч. В. Копецкий, С. В. Плюшева, Л. Ф. Сатункина, З. Н. Цепкова // Металлы. – 1981. – №2. – С. 59–61.
18. Применение метода ионного обмена в технологии получения вольфрама и молибдена высокой чистоты / Г. Л. Клименко, А. А. Блохин, В. Г. Глебовский, и др. // Металлы. – 2001. – №3. – С. 49–51.
19. Гегузин Я. Е. Как и почему исчезает пустота // М.: Изд-во Наука. – 1976. – 207 с.
20. Гегузин Я. Е. Физика спекания // М.: Изд-во Наука. – 1984. – 312 с.

Надійшла 15.07.13

УДК 622.24 (085).(477.62)

**В. П. Бондаренко**, член-кор. НАН України;  
**В. П. Ботвинко, М. О. Юрчук, О. М. Ісонкін**, кандидати технічних наук

*Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, м. Київ*

### **ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЧИННИКІВ НА СТРУКТУРУ ТА ВЛАСТИВОСТІ МІКРОГРАНУЛ З WC-Ni ТВЕРДИХ СПЛАВІВ**

*Досліджено вплив технологічних факторів на структуру, мікротвердість, руйнівне навантаження при стисканні твердосплавних гранул зі WC-Ni твердих сплавів. Визначено оптимальні технологічні режими спікання для виготовлення найміцніших та найтвердіших гранул.*

**Ключові слова:** мікрогранула, міцність, мікротвердість.

Для виготовлення якісного породоруйнівного інструменту перспективним є використання зносостійких наповнювачів – твердосплавних мікрогранул високої міцності та твердості. Виготовляють такі гранули з твердих сплавів на основі карбіду вольфраму [1; 2].

У пропонованій роботі досліджено вплив технологічних чинників на структуру та властивості мікрогранул з твердих сплавів групи ВН. Суміш карбіду вольфраму та металевої зв'язки (нікелю) розмелювали протягом 50 годин у валковому кульовому млині. Виготовлені за технологією, наведеною в роботі [2], мікрогранули спікалися у вакуумній печі при температурах 1380–1420°C з витримкою 300 с.

З даних таблиці та рис.1–3 випливає, що температура спікання 1380 °C недостатня для отримання щільної структури, високої міцності та твердості мікрогранул (різний розмір кобальтових прошарків у сплавах ВН3, ВН6, ВН8 та низька мікротвердість).

За температури спікання 1400 °C розміри кобальтових прошарків у сплавах ВН3, ВН6, ВН8 стали одноріднішими, мікротвердість максимальною, розміри зерен карбіду вольфраму за класами зернистості рівномірнішими. При підвищенні температури спікання до 1420 °C посилюється неоднорідність розмірів кобальтових прошарків, збільшується