

УДК 669.017.16

Шаломєєв В. А.<sup>1</sup>, Вініченко В.С.<sup>2</sup>, Пархісенко Д.І.<sup>3</sup>, Іванченко Є.Ю.<sup>4</sup>,  
Єршов А.В.<sup>5</sup>

<sup>1</sup> д-р техн. наук, професор, проректор з наукової роботи НУ «Запорізька політехніка»,

<sup>2</sup> канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри фізичного матеріалознавства НУ «Запорізька політехніка»,

<sup>3</sup> аспірант НУ «Запорізька політехніка»,

<sup>4</sup> аспірантка НУ «Запорізька політехніка»,

<sup>5</sup> д-р техн. наук, професор, професор кафедри фізики НУ «Запорізька політехніка»

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ НЕМЕТАЛІЧНИХ ЧАСТИНОК ДВООКИСУ ТОРІЯ НА СХИЛЬНІСТЬ ДО РОЗШАРУВАННЯ ДРОТІВ ІЗ ВОЛЬФРАМОВИХ СПЛАВІВ**

Вольфрам добре відомий для багатьох високотемпературних застосувань у світлотехнічній промисловості, електронно-променевих трубках, катодах та анодах рентгенівських трубок, нагрівачах та екранах печей, а також для бронебійних боєприпасів та в аерокосмічній техніці. Завдяки своїй високій густині ( $19,250 \text{ т/м}^3$ ), вольфрам є доцільним матеріалом для реалізації радіаційного захисту. Особливо розширило область його застосування використання як матеріалу для виробництва ниток у лампах розжарювання. Це призвело до швидкого зростання кількості досліджень, пов'язаних із матеріалознавством вольфраму.

Його стали розглядати як конструкційний матеріал для передових

технологій, зокрема, у космічних ядерних енергетичних системах. Вольфрамові матеріали викликали великий інтерес у дослідженнях ядерного синтезу. У зв'язку з цим слід відмітити проєкт міжнародного термоядерного експериментального реактора (ITER) і рішення використовувати вольфрам як матеріал броні. Нещодавно було ініційовано всесвітні амбіції щодо демонстраційного реактора термоядерного синтезу (DEMO), які включають проєкти щодо дослідження дії опромінення та експерименти з плазмою. Тому інтерес до вольфрамових матеріалів з технологічної та наукової точок зору нині високий, як ніколи раніше[1].

Через його високу температуру плавлення, теплопровідність, стійкості до розпилення вольфрам (W) є основним претендентом як конструкційний матеріал для компонентів з високим тепловим потоком в області дивертора термоядерного реактора. Проте залишаються деякі недоліки, пов'язані з термомеханічними властивостями, наприклад, низькотемпературна крихкість, висока температура переходу від пластичності до крихкості, рекристалізаційне окрихчування та окрихчування при нейтронному опроміненні.

Відомі [2] ефекти опромінення в W включають розпухання порожнин, зміцнення, що визначається підвищенням твердості при вдавлюванні або границі плинності, зниження пластичності, що супроводжує таке зміцнення опроміненням, пластичну нестабільність із супутнім падінням плинності, підвищення температури переходу з пластичного стану в крихкий та зниження теплопровідності. Хоча є лише обмежена інформація про механічні властивості опроміненого W, очевидно, що опромінення посилює окрихчування [2]. Зокрема, Краутвассер і Дерц повідомляють, що температура переходу в крихкий стан (ТПК) збільшувалась з  $\sim 80$  °C до опромінення до  $\sim 900$  °C після нейтронного опромінення при  $250\text{--}300$  °C для нелегованого W. Цинкл та Віффен прийшли до висновку, що для W, опроміненого при  $400\text{--}500$  °C, відбувається майже повна втрата пластичності. Ці автори очікують, що мінімальна робоча температура W складе  $\sim 900$  °C, щоб уникнути серйозної радіаційної крихкості. Така висока мінімальна робоча температура викликає занепокоєння. Фактично, температура рекристалізації нелегованого W нижче  $1200$  °C, як визначено за допомогою короткочасної термообробки, і, за оцінками, значно нижча за  $1000$  °C, якщо час роботи збільшується до тисяч годин. Огрубління зерна в результаті рекристалізації негайно призводить до збільшення ТПК.

Відомо [3], що верхня та нижня межі робочої температури компонентів, зокрема, дивертора з використанням вольфрамових матеріалів будуть визначатися температурою рекристалізації та температурою переходу в крихкий стан відповідно. Однак нейтронне опромінення може збільшити ТПК і може змінити температуру рекристалізації. Таким чином, діапазон

робочих температур, який визначається температурою рекристалізації та ТПК, може бути звужений нейтронним опроміненням. Для вирішення цих проблем протягом останнього десятиліття в рамках спільних науково-дослідних робіт університетів Японії виконувалась розробка радіаційно-стійких матеріалів W з покращеними термомеханічними властивостями. Було розглянуто кілька методів модифікації, наприклад, подрібнення зерна, деформаційне зміцнення, легування та дисперсійне зміцнення, з метою покращення пластичності та в'язкості навіть при нейтронному опроміненні.

Полікристалічний вольфрам зазвичай виробляється методом порошкової металургії та комерційно доступний у багатьох формах. У роботі [4] автори дійшли висновку, що на в'язкість руйнування і температуру крихко-в'язкого переходу полікристалічного вольфраму і вольфрамових сплавів сильно впливають режими виробничого процесу.

Відомо [5], що для зниження температури електродів і, тим самим, збільшення терміну їх служби до матеріалу додають  $\text{ThO}_2$  або  $\text{La}_2\text{O}_3$ . Зокрема, короткодугові лампи оснащені вольфрамовими електродами піддаються високому тепловому навантаженню під час роботи. Номінальні струми становлять понад сто ампер, що призводить до температури кінчика катода близької до точки плавлення вольфраму, а додавання до вольфраму двоокису торію дозволяє знизити температуру нагрівання електроду і тим самим подовжити термін його експлуатації.

Кілька досліджень марок полікристалічного вольфраму показують сильний вплив анізотропної мікроструктури, ступеня деформації та розміру зерен на механічні властивості. Зокрема повідомляється, що більш високі ступені деформації приводять до підвищення міцності та пластичності полікристалічного вольфраму за рахунок зменшення розміру зерна та збільшення співвідношення сторін [6].

Наведений огляд спонукав авторів даної роботи дослідити структуру та властивості промислових дротів із вольфрамоторієвих сплавів марок ВТ7, ВТ10, ВТ15 виготовлених за прийнятою на підприємстві технологією. Їх хімічний склад наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 - Хімічний склад досліджених сплавів, % мас.

Марка сплаву	$\text{ThO}_2$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$	$\text{CaO}$	$\text{Mo}$
ВТ-7	0,6	0,0012	0,0018	0,002	0,002	0,004
ВТ-10	1,1	0,0015	0,0016	0,002	0,002	0,005
ВТ-15	1,6	0,0012	0,0016	0,002	0,003	0,004

Статистичний аналіз кількості розширеного дроту (що з браком) різних марок показав, що найменший процент браку характерний для дроту із сплаву марки ВТ7, а найбільший у дроті марки ВТ15.

Дослідження мікроструктури дроту усіх досліджених сплавів показало, що вона має характерну для даних матеріалів волокнисту будову. У всіх зразках спостерігається порівняно дисперсні частинки  $\text{ThO}_2$ , проте в окремих місцях зустрічаються більш крупні частинки  $\text{ThO}_2$ . При цьому їх відносна кількість збільшується з підвищенням концентрації  $\text{ThO}_2$  (рис. 1).

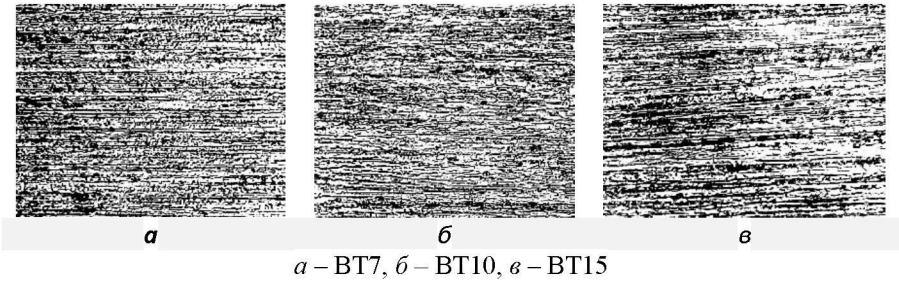


Рисунок 1.- Мікроструктура дротів із вольфрамоторієвих сплавів ( $\times 1000$ )

З метою уточнення причин з'явлення більш крупних частинок  $\text{ThO}_2$  в мікроструктурі дроту при його деформаційному переробленні дослідили структуру штабиків після високотемпературного спікання (рис. 2) та кування їх до діаметра 9 мм із наступним відпалом для вирівнювання структури (рис.3).

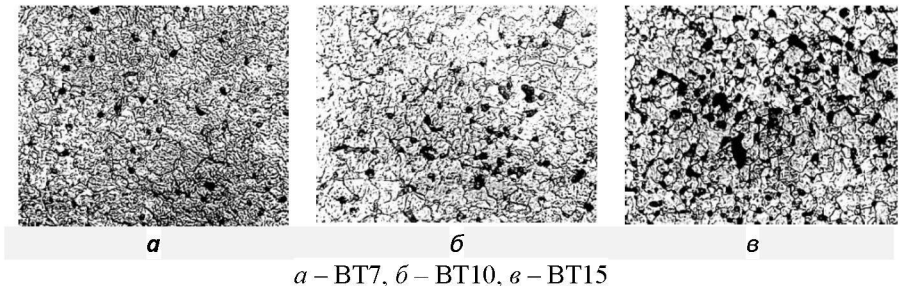


Рисунок 2.- Мікроструктура штабиків із вольфрамоторієвих сплавів ( $\times 1000$ )

На рисунках 2 і 3 спостерігається та ж закономірність щодо дисперсності частинок  $\text{ThO}_2$  що і в дротах, проте вони дещо крупніші. Тобто, ймовірно, при деформаційному переробленні відбувається подрібнення частинок  $\text{ThO}_2$ . Крім того видно, що із штабиків з більш крупними

частинками ThO<sub>2</sub> (сплав ВТ15 рис. 2) отримуються дрони теж з більш крупними частинками (сплав ВТ15 рис 1).

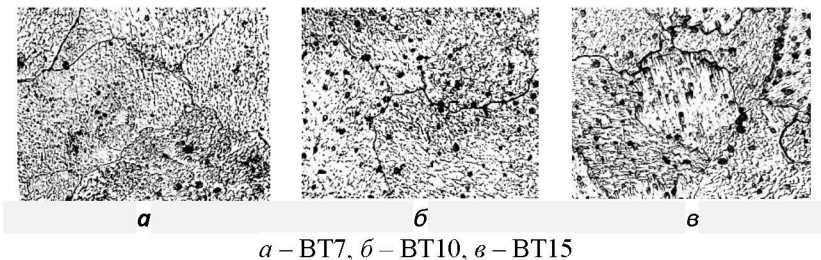


Рисунок 3.- Мікроструктура прутків із вольфрамоторієвих сплавів діаметром 9 мм після кування та відпалу ( $\times 1000$ )

Таким чином, на основі результатів проведеного дослідження, можна вважати, що одною із ймовірних причин нестабільності властивостей і наявності розшарування дротів є нерівномірний за величиною розподіл частинок ThO<sub>2</sub>.

### Список використаних джерел

1. Rieth, M., Doerner, R., Hasegawa, A., Ueda, Y., & Wirtz, M. (2019). Behavior of tungsten under irradiation and plasma interaction. *Journal of Nuclear Materials*, 519, 334-368.
2. Katoh, Y., Snead, L. L., Garrison, L. M., Hu, X., Koyanagi, T., Parish, C. M., ... & Hasegawa, A. (2019). Response of unalloyed tungsten to mixed spectrum neutrons. *Journal of Nuclear Materials*, 520, 193-207.
3. Nogami, S., Hasegawa, A., Fukuda, M., Rieth, M., Reiser, J., & Pintsuk, G. (2021). Mechanical properties of tungsten: Recent research on modified tungsten materials in Japan. *Journal of Nuclear Materials*, 543, 152506.
4. Rupp, D., Mönig, R., Gruber, P., & Weygand, S. M. (2010). В'язкість руйнування та мікроструктурна характеристика полікристалічного прокату вольфраму. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 28(6), 669-673.
5. Hoebing, T., Hermanns, P., Bergner, A., Ruhrmann, C., Traxler, H., Wesemann, I., ... & Awakowicz, P. (2015). Дослідження мерехтіння вольфрамівих катодів, легованих La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> і ThO<sub>2</sub>. *Journal of Applied Physics*, 118(2).
6. Conte, M., & Aktaa, J. (2019). Вплив виготовлення на мікроструктуру та механічні властивості руйнування полікристалічного вольфраму. *Nuclear Materials and Energy*, 21, 100591.