

УДК 621.81:621.337

**Д. А. Котляр, С. К. Аврамчук, Ю. О. Федоран, А. В. Степаненко, О. І. Бєлий**

**ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ФОРМУВАННЯ В УМОВАХ ГАРЯЧОГО ПРЕСУВАННЯ ЕЛЕКТРОДІВ З ПОДВІЙНОГО КАРБІДУ ВОЛЬФРАМУ ПРИ ЙОГО ВЗАЄМОДІЇ З ВОЛЬФРАМОМ І ВУГЛЕЦЕМ**

*Проведено аналіз недоліків одержання електродів з реліту шляхом переплавлення в печах електроопору та індукційного нагрівання з наступним подрібненням або термовідцентровим розпиленням. Досліджено формування подвійного карбіду вольфраму ( $WC + W_2C$ ) в умовах гарячого пресування подрібненого реліту та суміші реліту з вольфрамом і вуглецем (96 та 4 ваг. % відповідно). Показано, що при температурі пресування  $\sim 1900$  °C формується заготовка електроду з потрібними структурними характеристиками, вольфрам повністю переходить в карбід та напівкарбід з такими ж просторовими групами грааток, що і в реліті.*

***Ключові слова:** карбід вольфраму, реліт, гаряче пресування, рентгеноструктурний аналіз.*

Порошки подвійного карбіду вольфраму  $WC + W_2C$  (реліту) широко застосовуються, як складова зносостійкого наплавочного матеріалу для деталей, що працюють в умовах інтенсивного абразивного зношування при наявності помірних ударних навантажень, таких як шарошкові бурові долота, замки бурильних труб, зубки ковшів екскаваторів, деталі дробильних апаратів, конуси засипних апаратів доменних печей [1–5]. Сплав має унікальний комплекс фізико-механічних властивостей – високу міцність, пластичність, твердість та модуль пружності. Згідно ТУУ 24.338769698-001-2006 реліт має вміст вольфраму 95,8–96,4% та зв’язаного вуглецю 3,6–4,0%, кількість вільного вуглецю не перевищує 0,05%, а заліза — 0,15%.

Існуюча технологія отримання порошків реліту полягає у виготовленні заготовок із карбідів вольфраму  $WC + W_2C$  шляхом їх переплавлення в електричних печах опору чи плазмо-дуговим методом з наступною розливкою у форми для отримання зливка, з якого після механічного подрібнення, за допомогою ситової класифікації виділяють дев’ять фракцій. Нижня фракція складає розмір зерна 0–0,04 мм, а верхня — 1,6–2,5 мм. Недоліком цієї технології є неоднорідність зливка за складом та структурним станом із-за умов кристалізації, коли біля стінок форми внаслідок максимального переохолодження формується дрібнокристалічна структура, а в зонах, що знаходяться в умовах меншого переохолодження із-за меншої кількості центрів кристалізації створюється можливість їх інтенсивного росту до більших розмірів. Як відомо, матеріали з крупнокристалічною структурою мають більш низькі значення ударної в’язкості та пластичності і тому можуть руйнуватись під дією менших

---

© Котляр Дмитро Андрійович, Аврамчук Світлана Константинівна, канд. техн. наук, наукові співробітники Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України; Степаненко Артур Валентинович, канд. фіз.-мат. наук, науковий співробітник цього ж інституту; Федоран Юрій Олексійович, провідний інженер цього ж інституту; Бєлий Олександр Іванович, канд. техн. наук Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України.

зовнішніх навантажень. Крім того, порошки, що отримують у процесі механічного подрібнення зливків, характеризуються наявністю дефектів у вигляді тріщин, а також успадковують всі дефекти литва — неоднорідність складу, пори й раковини, що суттєво знижує зносостійкість наплавлення з такого матеріалу.

В останні роки широко застосовується плавлений карбід вольфраму у вигляді сферичних гранул, що вигідно відрізняється від традиційного подрібненого карбиду вольфраму підвищеною твердістю (до  $HV$  3000), високою міцністю і хорошими технологічними характеристиками. Ці якості дозволили значно розширити можливості застосування даного матеріалу, особливо в процесах плазмо-порошкового і лазерного наплавлення, а також при одержанні зносостійких композиційних покриттів методом просочення.

Сферичні частки литих карбідів вольфраму ( $WC-W_2C$ ) мають відмінну мікроструктуру і характеризуються високою мікротвердістю. При відповідності кожної частки стехіометричному складу, що являє собою евтектичний сплав, який складається з 78...82%  $W_2C$  і 18...22%  $WC$  (при 3,9...4,1%  $C$ ) [6], показники мікротвердості мають максимальні значення. Дотримання такого співвідношення є необхідною умовою одержання матеріалу, використання якого забезпечує можливість створення композиційних покриттів, що мають найвищу зносостійкість. Одним з найбільш ефективних методів одержання сферичних часток карбідів вольфраму є метод термовідцентрового розпилення електродів, що представляють собою циліндричні литі стрижні діаметром 29...30 мм і довжиною 200...250 мм, які виготовлюють шляхом виплавки в печах електроопору або індукційного нагрівання. Печі електроопору забезпечують високу продуктивність, але при плавленні суміші з декількох компонентів властивості яких відрізняються (табл. 1) порушується однорідність їхнього розподілу в об'ємі стрижня, що впливає на електроопір, температуру плавлення на різних ділянках стрижня. Процес розпилення ведеться при великих швидкостях обертання злитків (4000...10000 об/хв). В якості джерела нагрівання застосовується енергія струменя дугової плазми [7, 8].

Таблиця 1

**Фізичні характеристики складових сумішей, що використовують при отриманні стрижнів подвійного карбиду вольфраму**

Найменування матеріалу	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$\lambda$ , Вт/(см · °C)	$T_{пл}$ , °C	Питомий опір, мкОм · см
W	19,3	1,30	3380	5,5
WC	15,6	1,79	2870	19,2
$W_2C$	17,2	0,29	2800	81,0

Для забезпечення однорідності структури електрода, від якої залежить стабільність процесу краплеутворення, нами була застосована технологія гарячого пресування, яка дозволяє із заданої суміші порошоків отримувати стрижень для розпилення при  $T_{пл}$ , що дорівнює  $\sim 0,8$  °C.

Фазовий склад порошоків, що використовували при виготовленні гарячепресованих стрижнів сплаву, визначали за допомогою дифрактометра “ДРОН-3М” у монохроматичному  $Cu-K\alpha$ -випромінюванні методом крокового сканування (35 кВ, 35 мА; час експозиції в точці 3...7 с, крок 0,05°). Обробку даних рентгенівських досліджень з розрахунком коефіцієнта текстури фаз здійсню-

вали з використанням програми для повнопрофільного аналізу рентгенівських спектрів від суміші полікристалічних фазових складових PowderCell 2.4 [9]. Результати емісійного спектрального аналізу вихідних порошків наведені в табл. 2.

Таблиця 2

**Результати емісійного аналізу вихідних порошків для отримання стрижнів WC + W<sub>2</sub>C гарячим пресуванням**

Вихідні порошки	WC + W <sub>2</sub> C <sub>вих.</sub>	WC + W <sub>2</sub> C <sub>гар. прес.</sub>	W <sub>вих.</sub>
Co	>1	~1	–
Mo	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-2</sup>	–
Fe	0,1	< 0,1	10 <sup>-3</sup>
Ni	0,1	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-3</sup>
Si	0,1	0,1	10 <sup>-3</sup>
Al	10 <sup>-3</sup>	–	–
Ti	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-3</sup>	< 10 <sup>-3</sup>
Cu	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-4</sup>	–
Mg	> 10 <sup>-3</sup>	> 10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-3</sup>
Mn	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-3</sup>	–
B	+	+	+

Примітка. W — основа.

Процес отримання стрижнів WC + W<sub>2</sub>C здійснювали з використанням індукційної печі діаметром нагрівача 175 мм та висотою зони однорідного розігріву 60–70 мм. Максимальна температура гарячого пресування T = 2500 °C. Швидкість нагріву відповідала 125 °C/хв, а тиск — 30 МПа.

Порошок подрібненого реліту просівали на ситі 200 мкм і засипали в графітову (МПП-7) пресформу, що забезпечувало одержання 12 штабиків розміром 4 × 4 × 40 мм. Початок пресування подрібненого реліту відбувався після досягнення температури 2200 °C і тиску 20 МПа та закінчувався при температурі 2500 °C. Для суміші (змішування у барабані протягом 24 год) 50% (мас.) реліту та суміш вольфраму з ламповою сажею (96 та 4% (мас.) відповідно) пресування заготовки здійснювали при 1800–1950 °C.

Ретельні рентгеноструктурні дослідження подрібнених вихідних порошків реліту, що використовували для отримання стрижнів, їх суміші з вольфрамом і сажею, а також складу гарячепресованого стрижня показали наступне. У вихідних порошках реліту відсутній вільний вольфрам (рис. 1) та відзначається наявність карбіду вольфраму (32% (мас.)), а також напівкарбіду вольфраму (68% (мас.)).

На рентгенограмах суміші реліту з вольфрамом і сажею (рис. 2) та після гарячого пресування (рис. 3) спостерігали повний перехід вольфраму в карбід (28% (мас.)) і напівкарбід (72% (мас.)). Після розпилення співвідношення карбіду та напівкарбіду в гранулах (рис. 4) складало — 10 і 85% (мас.) відповідно, залишок — W [10, 11].

## II. Результати наукових досліджень

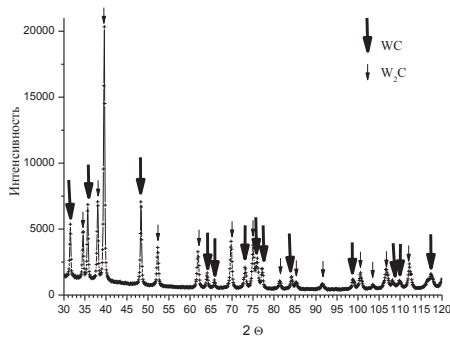


Рис. 1. Вихідний порошок реліту

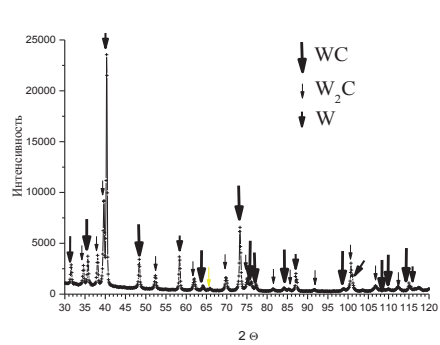


Рис. 2. Суміш реліту з вольфрамом і сажою

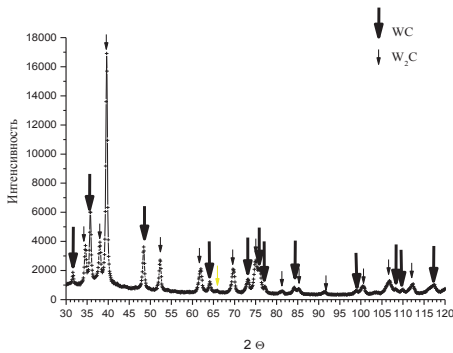


Рис. 3. Суміш після гарячого пресування

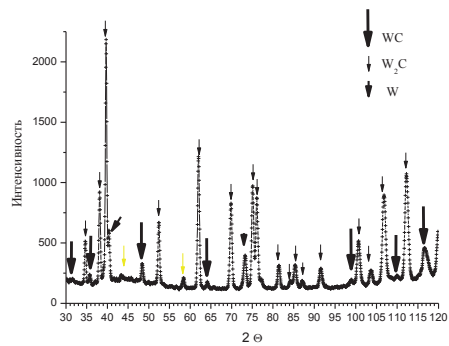


Рис. 4. Розпилений реліт

Як у вихідному реліті, так і після гарячого пресування і розпилення W<sub>2</sub>C фаза мала гексагональну ґратку із просторовою групою P3m1, а WC-фаза — гексагональну із просторовою групою P6m2.

Таким чином, проведені рентгенівські дослідження системи WC–W<sub>2</sub>C сумішей вихідних порошків реліту, вольфраму та сажі при одержанні стрижнів для розпилення порошків подвійного карбиду вольфраму показали можливість зниження температури їх формування до T ~1900 °C шляхом застосування технологій гарячого пресування вказаних порошків.

*Проведен анализ недостатков получения электродов из релита путем переплавления в печах электросопротивления и индукционного нагрева с последующим дроблением или термоцентробежным распылением. Изучено формирование двойного карбида вольфрама (WC + W<sub>2</sub>C) в условиях горячего прессования дробленого релита и смеси релита с вольфрамом и углеродом. Показано, что при температуре прессования ~1900 °C формируется заготовка электрода с необходимыми структурными характеристиками, вольфрам полностью переходит в карбид и полукарбид с такими же пространственными группами кристаллических решеток, что и в релите.*

**Ключевые слова:** карбид вольфрама, релит, горячее прессование, рентгеноструктурный анализ.

*The analysis of the shortcomings of tungsten carbide electrodes manufacturing by remelting furnaces resistivity and induction heating followed by crushing or termotsentrobezhnym spray. The formation of the double tungsten carbide (WC + W<sub>2</sub>C) in hot pressing a mixture of crushed relite and relite and tungsten and carbon is studied. It is shown that at a temperature of ~1900 °C pressing emerging billet electrode with the necessary structural characteristics, tungsten is fully transferred in carbide and semicarbide with the same space group of the crystal lattices as in relite.*

**Keywords:** tungsten carbide, relit, hot pressing, x-ray analysis.

- 1 Юзвенко Ю. А. Особенности газоабразивного износа композиционных сплавов / Ю. А. Юзвенко и др. // Автомат. сварка. – 1972. – № 8. – С. 35–35.
- 2 Жудра А. П. Новые композиционные сплавы и результаты исследования их свойств / А. П. Жудра, А. И. Белый // Теоретические и технологические основы наплавки. Наплавленный металл. – К.: Наук. думка, 1977. – С. 151–157.
- 3 Ткаченко М. Е. Разработка и промышленное внедрение композиционного сплава на основе релита для армирования шарошек буровых долот. В книге: Наплавка износостойких и жаростойких сталей и сплавов. Наплавочные материалы / М. Е. Ткаченко, А. И. Подугольников. – К.: Наук. думка, 1983. – С. 17–20.
- 4 Дудко Д. А. Наплавка и армирование зубьев ковшей экскаваторов износостойким композиционным сплавом / Д. А. Дудко и др. // Сварочное производство. – 1977. – № 6. – С. 16–18.
- 5 Дудко Д. А. Эффективность наплавки композиционными сплавами деталей, работающих в резиновых смесях / Д. А. Дудко и др. // Автомат. сварка. – 1974. – № 4. – С. 12–15.
- 6 Самсонов Г. В. Карбиды вольфрама / Самсонов Г. В., Витрянюк В. Н., Чаплыгин Ф. И. – К.: Наук. думка, 1974.
- 7 А. с. 1381840 СССР. Установка центробежного распыления стержней из тугоплавких материалов / А. И. Белый, Б. В. Данильченко, В. С. Гончаренко, В. И. Дзыкович. – Опубл. 15.10.1987.
- 8 Пат. 20516А Україна. Спосіб одержання гранульованих тугоплавких матеріалів / К. А. Ющенко, О. П. Жудра, О. І. Білий, В. І. Дзыкович. – Опубл. 15.07.1997.
- 9 [ftp://ftp.bam.de/Powder\\_Cell/pcw23.exe](ftp://ftp.bam.de/Powder_Cell/pcw23.exe).
- 10 Махненко В. И. Математическое моделирование процесса получения сферических гранул плавящихся карбидов вольфрама / В. И. Махненко, Е. А. Великоиваненко, А. П. Жудра и др. // Автомат. сварка. – 2004. – № 2. – С. 3–10.
- 11 Дзыкович В. И. Влияние процесса термоцентробежного распыления на свойства сферических частиц карбидов вольфрама // Автомат. сварка. – 2009. – № 4. – С. 52–55.