

**М.М. ПРОКОПІВ**, канд. техн. наук,  
ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України, Київ,  
**О.В. ХАРЧЕНКО**, мл. наук. співроб.,  
ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України, Київ

## **ВПЛИВ ВЕЛИЧИНИ ВАКУУМУ ПРИ ОХОЛОДЖЕННІ НА СТРУКТУРУ ТА ВЛАСТИВОСТІ СПЛАВУ ВК100М ПІСЛЯ КОМПРЕСІЙНОГО СПІКАННЯ ПІД ТИСКОМ ГАЗУ**

Представлені результати досліджень впливу величини вакууму при охолодженні на структуру та властивості сплаву ВК100М після компресійного спікання. Показано, що оптимальна структура та максимальні фізико-механічні властивості сплаву ВК100М після компресійного спікання під тиском  $P = 2,5$  МПа, отримуються при охолодженні з вакуумом  $P = 1 \times 10^{-4}$  МПа.

**Ключові слова:** вакуум, компресійне спікання, модуль Вейбула, пори, залишкова мікропористість.

### **Вступ**

Встановлено, що відпал незалежно від величини вакууму збільшує середній розмір зерна  $d_{wc}$ , не впливає на залишкову мікропористість і максимальний розмір крупних зерен  $WC$ , зменшує вміст кобальту в сплаві [1]. Проте не враховується, що при проведенні відпалу відбувається додатковий нагрів зразків, і це може впливати на зміну як параметрів структури, так і значень фізико-механічних властивостей. В той же час невідомо, як зміниться структура та властивості після компресійного спікання якщо охолодження провести у вакуумі, виходячи з проведених досліджень.

Тому мета даної роботи – дослідити вплив величини вакууму при охолодженні на структуру та фізико-механічні властивості сплаву ВК100М після компресійного спікання.

### **Методика дослідження**

Для дослідження було виготовлено зразки  $5 \times 5 \times 35$  мм зі стандартної суміші сплаву ВК100М (ГОСТ 3882-74) виробництва КЗТС (Росія). Для отримання рівномірного складу за вуглецем здійснювали попереднє спікання у водневому середовищі при температурі  $950 - 980$  °С [2]. Вакуумно-компресійне спікання зразків проводили в напівпромисловій установці виготовленій в ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України під тиском газу ( $P = 2,5$  МПа) по розро-

© М.М. Прокопів, О.В. Харченко, 2013

бленому режиму (рисунок). Тиск газу 2,5 МПа забезпечує одержання високощільної структури даного сплаву [3]. Нагрівання зразків при спіканні в інтервалі температур 900 – 1350 °С здійснювали зі швидкістю 3 – 5 град/хв.

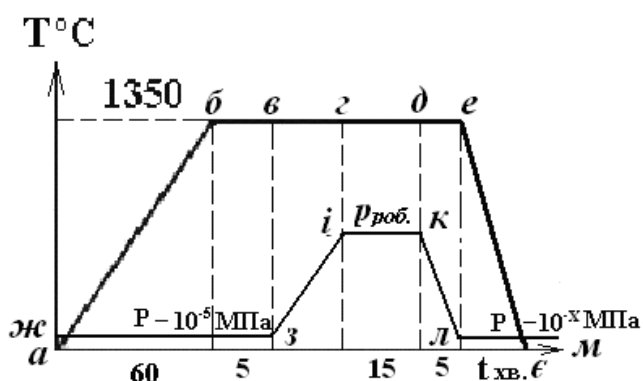


Рисунок – Графіки режимів спікання під робочим тиском та охолодження в вакуумі: а-б-в-г-д-е-є – графік зміни температури, ж-з-і-к-л-м – графік зміни тиску.

Після цього напуск азоту з балонів до тиску  $P = 2,5$  МПа в робочу зону печі відбувався впродовж 10 хв. (лінії в-г-д-е). Спікання під тиском відбувається на протязі 15 хв. після чого проводимо зменшення тиску до  $P = 1 \times 10^{-5}$  МПа,  $1 \times 10^{-4}$  МПа,  $1 \times 10^{-3}$  МПа (лінія к-л) при температурі спікання. Охолодження до кімнатної температури (лінія е-є) проводимо із заданим вакуумом.

Дослідження мікроструктури проводили на шліфу виготовленому на стороні зразка що не контактував з графітовою тарілкою. Дрібну мікропористість (до 50 мкм), скупчення зв'язки та зерен WC досліджували відповідно ГОСТ 9391-80 на оптичному мікроскопі МИМ-6 при збільшенні  $\times 100$  та визначали на полірованих не травлених зразках. Розподілення зерен по фракціям, визначали по методу Глаголева, при збільшенні  $\times 1350$  на травлених в реактиві Мураками, шліфах за допомогою оптичного мікроскопу МИМ-8М та мікроскопу ЛОМО «Метам Р-1».

Фізико-механічні властивості визначали по стандартним методикам.

### Результати дослідження.

Охолодження у вакуумі з різною величиною після компресійного спікання діє аналогічно на сплав як і відпал з цим же вакуумом. Збільшення величини вакууму при охолодженні з  $1 \times 10^{-5}$  МПа до  $1 \times 10^{-3}$  МПа приводить до міграції кобальту із об'єму сплаву на поверхню. В результаті цього відбувається насичення поверхневого шару кобальтом, за рахунок зменшення його в об'ємі.

Отриманий результат дозволив уточнити величину вакууму при якому відбувається його міграція при спіканні твердих сплавів.

Структурні характеристики зразків після компресійного спікання і охолодженого під тиском, та після охолодження при різному вакуумі наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Структурні характеристики зразків

Характеристики структури	Тиск охолодження МПа			
	2,5	$1 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-3}$
Вміст вільного вуглецю (мас. %)	0,1	0,1	0,1	немає
Ширина кобальтового прошарку, мкм	0,2 – 0,3; 0,5	0,3 – 0,5; 1,0	0,2 – 0,5	0,2 – 0,3
Середній розмір зерен WC $d_{wc}$ , мкм	1,43	1,50	1,52	1,55
Об'ємна доля пор, %	B1 0,2	B1 0,2	A2 0,1	A2 0,1
Максимальний розмір окремих зерен WC, мкм	10 – 12	12 – 15	12 – 15	12 – 15
Вміст кобальту (мас. %)	9,9	9,9	9,5	8,9
Розмір пор більше 50 мкм	54, 65	–	–	–

За середнім розміром зерен WC сплав охолоджений у вакуумі  $P = 1 \times 10^{-5}$  МПа відповідає максимальному значенню допустимого (1,1 – 1,5) інтервалу розмірів стандартних сплавів групи OM. Разом з тим, залишкова мікропористість значно менша ніж після спікання цього ж сплаву, в вакуумі, але вища ніж мікропористість (A1-0,01) сплавів закордонного виробництва. До того ж в структурі відсутні окремі великі пори розміром  $> 50$  мкм, що характерно для структури сплаву після спікання під тиском.

Наявність окремих великих (12 – 15 мкм) зерен карбиду вольфраму, а також окремих до (1,0 мкм) кобальтової фази вказує на неоднорідність отриманої структури, що формується в процесі спікання.

Це характеризує нерівномірність структури по всьому об'єму сплаву, і як наслідок зниження фізико-механічних характеристик від максимально можливих.

Збільшення вакууму до  $P = 1 \times 10^{-4}$  та  $1 \times 10^{-3}$  МПа залишає вміст вільного вуглецю на рівні 0,1 %, та максимальний розмір зерен WC –  $12 \div 15$  мкм. Зменшує ширину кобальтового прошарку до 0,2 – 0,5 та 0,2 – 0,3 мкм відповідно. Проте збільшує середній розмір зерна до 1,55 мкм при вакуумі  $P = 1 \times 10^{-3}$  МПа.

Разом з тим відбувається зменшення кобальту в об'ємі сплаву до 8,9 (мас. %) при охолодженні у вакуумі з  $P = 1 \times 10^{-3}$  МПа.

Фізико-механічні властивості представлені в табл. 2.

Таблиця 2 – Фізико-механічні властивості

Властивості	Тиск охолодження МПа			
	2,5	$1 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-3}$
Коерцитивна сила $H_c$ кА/м	16,6	16,6	16,6	16,8
Межа міцності при згині $R_{bm}$ МПа	1920	2140	2150	1920
Твердість HRA	89,7	89,7	89,8	89,9
Коефіцієнт тріщиностійкості $K_{IC}$ МПа·м <sup>1/2</sup>	11,5	12,4	12,8	11,8
Модуль Вейбула $m$	10	17	20	11

Як видно з табл. 2 охолодження у вакуумі  $1 \times 10^{-5}$  МПа на 120 МПа збільшується межа міцності при згині, та суттєво на  $0,9 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$  тріщиностійкість сплаву. Коерцитивна сила при цьому залишається незмінною.

Подальше збільшення вакууму до  $1 \times 10^{-4}$  МПа підвищує тріщиностійкість на  $0,4 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$  не впливає на межу міцності при згині та коерцитивну силу.

При охолодженні з вакуумом  $P = 1 \times 10^{-3}$  МПа із збереженням значення коерцитивної сили і твердості відбувається зменшення границі міцності при згині та тріщиностійкості на рівень значення зразків охолоджених під тиском.

### Обговорення результатів

Збільшення вакууму при охолодженні після компресійного спікання під тиском  $P = 2,5$  МПа від  $1 \times 10^{-5}$  до  $1 \times 10^{-3}$  МПа приводить до міграції кобальту із об'єму сплаву на поверхню, а також до скупчення його в об'ємі що підтверджують результати досліджень опубліковані в [5]. Як результат відбувається збільшення середнього розміру зерна WC внаслідок збільшення рекристалізації через рідку фазу.

Несуттєве підвищення межі міцності у зразків після охолодження у вакуумі  $1 \times 10^{-4}$  МПа можна пояснити незначним збільшення середнього розміру зерен карбїду вольфраму.

Збереження на одному рівні коерцитивної сили можливо пов'язане з компенсацією двох факторів: збільшення середнього розміру зерен карбїду вольфраму, що повинно збільшити силу, а з іншої сторони, можливим очищенням кобальтової зв'язки від розчинених у кобальті газів.

В той же час значне на  $0,9$  підвищення тріщиностійкості, що не корелюється із збільшенням твердості, лише пов'язано з дегазацією газів із його об'єму, аналогічно, як це відбувається зі зразками після водневого спікання.

Разом з тим, зменшення межі міцності, тріщиностійкості та збільшення

твердості при збільшенні вакууму до  $P = 1 \times 10^{-3}$  МПа пояснюється зменшенням вмісту кобальту в структурі сплаву [5].

### **Висновки**

1. Охолодження у вакуумі при величині  $P = 1 \times 10^{-5}$  МПа після компресійного спікання ліквідує пори більше 50 мкм, збільшує межу міцності при згині, та тріщиностійкість в 1,1 рази, порівнянно із охолодженням під тиском газу. Збільшується модуль Вейбула з 10 при охолодженні під тиском до 17

2. Охолодження у вакуумі при величині  $P = 1 \times 10^{-4}$  МПа після компресійного спікання збільшує межу міцності при згині в 1,1 рази, тріщиностійкість в 1,1 рази та твердість на 0,3 сплаву ВК100М в порівнянні з зразками охолодженими під тиском газу 2,5 МПа. Збільшується модуль Вейбула з 17 при охолодженні з вакуумом  $P = 1 \times 10^{-5}$  МПа до 20.

3. При збільшенні величини вакууму до  $P = 1 \times 10^{-3}$  МПа межа міцності при згині, коефіцієнт тріщиностійкості зменшується до значення вихідних значень.

**Список літератури:** 1. Прокопів М.М. Вплив величини вакууму при відпалі вище лінії солідусу на структуру та фізико-механічні властивості сплаву ВК100М після компресійного спікання / М.М. Прокопів, О.В. Харченко // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения. – 2012. – № 15. – С. XX – XX. 2. Бондаренко В.П. Спекание вольфрамовых твердых сплавов в прецизионно контролируемой газовой брете / В.П. Бондаренко, Э.Г. Павлоцкая. – К.: Наук. Думка, 1995. – 204 с. 3. Фальковский В.А. Твердые сплавы / В.А. Фальковский, Л.И. Клячко. – М.; Изд. Дом «Руда и металлы», 2005. – 414 с. 4. Прокопів Н.М. Влияние условий спекания на структуру и физико-механические свойства особомелкозернистого твердого сплава ВК 100М / Н.М. Прокопів, Л.И. Александрова, О.В. Харченко // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения. – 2008. – Вып. 11. – С. 337—344. 5. Лисовский А.Ф. Миграция расплавов металлов в спеченных композиционных телах / А.Ф. Лисовский. – К.: Наукова думка, 1984. – 256 с.

*Надійшла до редколегії 22.08.13*

УКД 621.793.5

**Вплив величини вакууму при охолодженні на структуру та властивості сплаву вком після компресійного спікання під тиском газу / М.М. ПРОКОПІВ, О.В. ХАРЧЕНКО // Вісник НТУ «ХПІ». – 2013. – № 57 (1030). – (Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія). – С. 149 – 154. – Бібліогр.: 5 назв.**

Представленные результаты исследований влияния величины вакуума при охлаждении на структуру и свойства сплава ВК100М после компрессионного спекания. Показано, что оптималь-

ная структура и максимальные физико-механические свойства сплава VK100M после компрессионного спекания под давлением  $P = 2,5$  МПа, получают при охлаждении с вакуумом  $P = 1 \times 10^{-4}$  МПа.

**Ключевые слова:** вакуум, компрессионное спекание, модуль Вейбула, поры, остаточная микропористость.

Presented results of researches of influence of size of vacuum at cooling on a structure and properties of alloy of VK100M after compression sintering. It is noted that optimum structure and maximal fiziko-mechanical properties of alloy of VK100M after compression sintering force-feed  $P = 2,5$  МПа, turn out at cooling with the vacuum of  $P = 1 \times 10^{-4}$  МПа.

**Keywords:** vacuum, compression sintering, module of Weibull, pores, remaining microporosity.

УДК 621.762.2:621.926.54

*Г.А. БАГЛЮК*, д-р техн. наук, ст. науч. сотруду., ИПМ НАНУ, Киев,

*А.А. ХОМЕНКО*, вед. инж., ИПМ НАНУ, Киев,

*Д.А. ГОНЧАРУК*, мл. науч. сотруду., ИПМ НАНУ, Киев

## **НОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ТОНКОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Проанализированы основные тенденции в усовершенствовании высокоэнергетических мельниц для тонкого помола. Выделены основные возможные пути решения проблем, связанных с недостатками известных высокоэнергетических дезинтеграторов. Проведен обзор и анализ последних нововведений в области высокоэнергетического помола.

**Ключевые слова:** высокоэнергетическое измельчение, мельница, порошковые материалы, тонкий помол.

### **1. Введение**

Порошки, близкие по химическому составу, могут иметь различные свойства, которые определяются методом получения порошка. Таким образом, становится актуальной задача исследования методов и режимов получения порошков, а в частности конструктивных особенностей аппаратов для получения и обработки порошков.

Наибольшее распространение, благодаря своей производительности и экономности в ресурсах, получили механические методы получения порошков и устройства для механического получения порошков.

© Г.А. Баглюк, А.А. Хоменко, Д.А. Гончарук, 2013