

УДК 669.018.025

М.О. Юрчук, канд. техн. наук

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

## **ВПЛИВ ДІЇ РОЗТЯГУЮЧИХ НАПРУЖЕНЬ НА СТРУКТУРУ ТА ВЛАСТИВОСТІ СПЕЧЕНОГО У ВАКУУМІ МАЛОКОБАЛЬТОВОГО ТВЕРДОГО СПЛАВУ ВК15**

*The paper gives structural characteristics and values of the basic properties of WC–15Co laminated carbide in the form of rods sintered in vacuum under tensile stresses. The value of the ultimate load has been determined at which the cemented carbide fractures during sintering.*

В [1 – 3] наведено результати спікання твердосплавних виробів у вигляді кілець із сплаву ВК15 з обмеженням усадки від нуля до 100 % і встановлено, що навіть 100% – ве обмеження усадки при спіканні не спричиняє руйнування (розрив) сплаву. Тому за цієї схеми навантаження неможливо встановити розтягуючі напруження, за яких зразок, що спікається, розривається, а також визначити вплив на структуру і властивості сплаву критичних напружень.

Для усунення зазначених недоліків вибрано спікання сплаву під дією статичного одноосового навантаження. За такої схеми спікання сплаву стає можливим обмеження усадки і розтягування вихідного зразка аж до руйнування. Подібні експерименти в літературі не виявлені. Мета дослідження – визначити зміни структурних характеристик та основних властивостей при спіканні твердого сплаву під постійною дією розтягуючих навантажень, що можуть причинити розтягування зразка, що спікався, у крайньому разі до – руйнування (розриву) зразка, що спікався.

### **Методика проведення досліджень**

Для експериментів використали твердосплавну суміш ВК15 серійного виробництва. Середній розмір зерна карбиду вольфраму  $\bar{d}_{wc} = 1,6 \pm 0,1$  мкм. Вміст загального вуглецю при стехіометричному вмісті суміші  $C_{заг} = 5,20$  % (за масою) фактично було 5,10–5,30 % (за масою).

Методика підготовки суміші, пресування контрольних штабиків та експериментальних зразків, сушка, спікання, механічна обробка та визначення властивостей, хімічного складу і сте-реологічних характеристик сплаву аналогічна методиці наведеної в статті «Вплив дії розтягу-ючих напружень на структуру та властивості спеченого у вакуумі малокобальтового твердо-го сплаву ВК6» (див. попередню статтю).

Кінцеве спікання провели при 1350 оС. Значення розтягуючих напружень такі: 0,05; 0,10; 0,15; 0,20; 0,25; 0,47 та 1,03 МПа. Граничним одноосовим розтягуючим напруженням було взято навантаження, за якого експериментальний зразок під час спікання розривався.

**Властивості вільно спеченого у вакуумі сплаву та під дією розтягуючого одноосового напруження**

**Коефіцієнт усадки.** Коефіцієнт усадки за шириною та довжиною вільно спеченого у вакуумі штабика становив відповідно  $1,22 \pm 0,03$  та  $1,20 \pm 0,03$ . Під дією розтягуючого напруження  $0,05$  МПа (при якому зразок не розірвався) коефіцієнт усадки за довжиною зменшився. При напруженні  $0,10$  МПа, за якого зразок розірвався з утворенням „шийки”, коефіцієнт усадки за довжиною сплаву значно зменшився, а з подальшим збільшенням напруження – збільшувався. Коефіцієнт усадки за діаметром стержня зразка мав протилежну залежність: зі збільшенням значення розтягуючого напруження до  $0,10$  МПа коефіцієнт усадки за діаметром збільшувався (табл. 1), а з подальшим збільшенням навантаження – зменшувався.

Таблиця 1. Значення коефіцієнта усадки за довжиною та діаметром зразка твердого сплаву ВК15, спеченого в вакуумі під дією одноосового розтягуючого напруження

| Розтягуюче напруження, МПа | Коефіцієнт усадки |                 |
|----------------------------|-------------------|-----------------|
|                            | за довжиною       | за діаметром    |
| 0,05                       | $1,18 \pm 0,03$   | $1,33 \pm 0,03$ |
| 0,10                       | $1,04 \pm 0,03$   | $1,72 \pm 0,03$ |
| 0,15                       | $1,07 \pm 0,03$   | $1,60 \pm 0,03$ |
| 0,20                       | $1,11 \pm 0,03$   | $1,53 \pm 0,03$ |
| 0,25                       | $1,14 \pm 0,03$   | $1,48 \pm 0,03$ |
| 0,47                       | $1,16 \pm 0,03$   | $1,41 \pm 0,03$ |
| 1,03                       | $1,19 \pm 0,03$   | $1,23 \pm 0,03$ |

Вигляд зразків, спечених під дією розтягуючих напружень показаний на рис. 1.

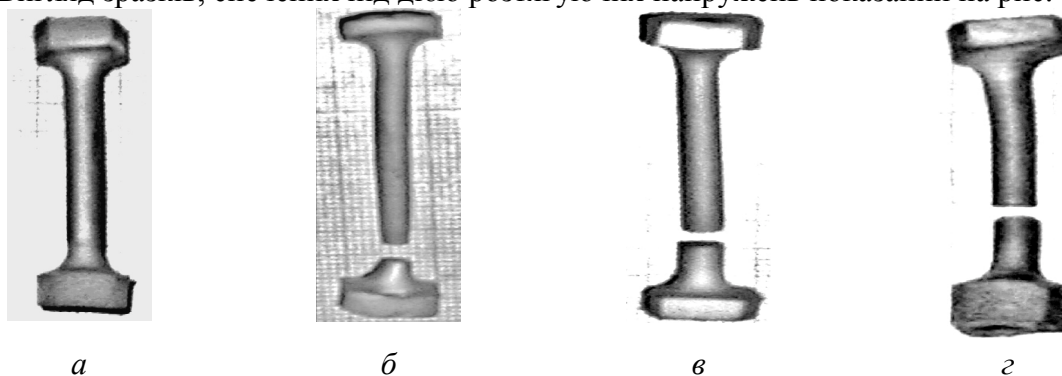


Рис. 1. Зовнішній вигляд зразків, спечених під дією розтягуючих напружень: а – зразок не розірвався,  $\sigma_{розт} = 0,05$  МПа; б – зразок розірвався, відбулося розтягування за довжиною та зменшення за діаметром зразка з утворенням „шийки”,  $\sigma_{розт} = 0,10$  МПа; в – зразок розірвався, відбулося розтягування за довжиною та зменшення за діаметром зразка без утворення „шийки”,  $\sigma_{розт} = 0,25$  МПа; г – зразок при значному розтягуючому напруженні; розтягування за довжиною та зменшення за діаметром зразка майже не відбулося,  $\sigma_{розт} = 1,03$  МПа

**Густина.** Густина вільно спеченого у вакуумі штабика становила  $14,01 \pm 0,2$  г/см<sup>3</sup>. Густина сплаву при спіканні під дією одноосового розтягуючого напруження практично не змінилась (табл. 2). Отже, у кожному випадку спікання густина сплаву, спеченого під напруженням, має тенденцію до збільшення, що не виходить за довірчу межу випадкової похибки вимірювання.

Таблиця 2. Значення густини твердого сплаву ВК15, спеченого у вакуумі під дією одноосового розтягуючого напруження

| Розтягуюче напруження, МПа | Густина $\rho$ , г/см <sup>3</sup> |
|----------------------------|------------------------------------|
| 0,05                       | $14,15 \pm 0,20$                   |
| 0,10                       | $14,10 \pm 0,20$                   |
| 0,15                       | $14,15 \pm 0,20$                   |
| 0,20                       | $14,10 \pm 0,20$                   |
| 0,25                       | $14,10 \pm 0,20$                   |
| 0,47                       | $14,10 \pm 0,20$                   |
| 1,03                       | $14,10 \pm 0,20$                   |

**Твердість.** Твердість за Роквеллом *HRA* вільно спеченого у вакуумі штабика становила  $86,0 \pm 0,6$ . Твердість сплаву підвищується при його спіканні під розтягуючим напруженням (табл. 3). Максимальне підвищення твердості встановлено при спіканні сплаву під дією напруження 0,05 МПа, за якого зразок ще не розірвався, але максимально видовжився по осі зразка та максимально зменшився за діаметром.

Таблиця 3. Значення твердості за Роквеллом твердого сплаву ВК15, спеченого у вакуумі під дією одноосового розтягуючого напруження

| Розтягуюче напруження, МПа | Твердість за Роквеллом ( <i>HA</i> ) |
|----------------------------|--------------------------------------|
| 0,05                       | $87,5 \pm 0,2$                       |
| 0,10                       | $87,1 \pm 0,2$                       |
| 0,15                       | $87,0 \pm 0,2$                       |
| 0,20                       | $87,0 \pm 0,2$                       |
| 0,25                       | $87,0 \pm 0,2$                       |
| 0,47                       | $87,0 \pm 0,2$                       |
| 1,03                       | $87,0 \pm 0,2$                       |

**Хімічний склад твердого сплаву після вільного спікання у вакуумі та спікання у вакуумі під дією розтягуючого напруження**

Хімічний склад сплаву при спіканні практично не змінився. Вміст загального вуглецю у вільно спеченому сплаві становив  $5,12 \pm 0,25$  % (за масою), у сплаві, спеченому під навантаженням –  $5,1$ – $5,3$  % (за масою) (табл. 4).

Таблиця 4. Хімічний склад твердого сплаву ВК15, спеченого у вакуумі під дією одноосового розтягуючого напруження

| Розтягуюче напруження, МПа | Вміст $C_{\text{заг}}$ , % (за масою) у сумішах, одержаних подрібненням спечених експериментальних зразків | Вміст включень виділеного вільного вуглецю $C_{\text{в}}$ , % |
|----------------------------|--|---|
| 0,05                       | $5,15 \pm 0,25$  | 0,1   |
| 0,10                       | $5,16 \pm 0,25$  | 0,1   |
| 0,15                       | $5,12 \pm 0,25$  | 0,1   |
| 0,20                       | $5,18 \pm 0,25$  | 0,1   |
| 0,25                       | $5,20 \pm 0,25$  | 0,1   |
| 0,47                       | $5,10 \pm 0,25$  | 0,1   |
| 1,03                       | $5,13 \pm 0,25$  | 0,1   |

Вміст включень вільного вуглецю у структурі сплаву, спеченого як вільно, так і під навантаженням, перебував у межах, характерних для сплаву, що виготовляється серійно (0,2 %) (табл. 4). У контрольних штабиках та зразках  $\eta_1$ -фази не виявлено.

**Структурні характеристики твердого сплаву після вільного спікання у вакуумі та спікання в вакуумі під дією розтягуючого напруження** Вміст пор розмірами до 50 та 50–107 мкм після вільного спікання перебуває в таких самих, як і у сплаві, що виготовляється серійно (до однієї пори розміром до 107 мкм) (табл. 5).

Таблиця 5. Структурні характеристики вільно спеченого в вакуумі твердого сплаву ВК15

| Кількість пор розмірами |                 | Розподіл перетину зерен карбиду вольфраму за розмірами, % |         |         |         |             |             | Ширина прошарку кобальтової фази в 10 полях зору окуляра мікроскопа, мкм |
|-------------------------|-----------------|---|---------|---------|---------|-------------|-------------|--|
| до 50 мкм, %            | 50–100 мкм, шт. | 0,5 мкм   | 1,0 мкм | 2,0 мкм | 3,0 мкм | 4,0–5,0 мкм | 6,0–7,0 мкм |  |
| 0,2                     | –               | –   | 45      | 26      | 18      | 10          | 1           | 0,5–1,0–2,0  |

При спіканні сплаву під дією розтягуючого напруження пори на шліфах експериментальних зразків розмірами до 50 і 50 – 100 мкм у сплаві зникають (табл. 6).

Розподіл зерен тугоплавкої складової за розмірами у сплаві після вільного спікання перебуває в межах, характерних для промислового середньозернистого твердого сплаву. Після спікання сплаву під дією розтягуючого напруження розподіл зерен (особливо в місцях очікуваного розриву зразка) наближається до рівня дрібнозернистого сплаву. При переході від вільного спікання до спікання сплаву під дією розтягуючого напруження ширина прошарку зв'язки зменшується, табл. 5–8.

Таблиця 6. Структурні характеристики твердого сплаву ВК15, спеченого у вакуумі під дією одноосьового розтягуючого напруження

| Кількість пор розмірами |                 | Розподіл перетину зерен карбиду вольфраму за розмірами, % |         |         |         |             |             | Ширина прошарку кобальтової фази в 10 полях зору окуляра мікроскопа, мкм |
|-------------------------|-----------------|---|---------|---------|---------|-------------|-------------|--|
| до 50 мкм, %            | 50–100 мкм, шт. | 0,5 мкм   | 1,0 мкм | 2,0 мкм | 3,0 мкм | 4,0–5,0 мкм | 6,0–7,0 мкм |  |
| 0,05                    | –               | –   | 48      | 23      | 18      | 10          | 1           | 0,5–1,0  |
| 0,10                    | –               | –   | 46      | 25      | 19      | 9           | 1           | 0,5–1,0  |
| 0,15                    | –               | –   | 47      | 24      | 17      | 11          | 1           | 0,5–1,0  |
| 0,20                    | –               | –   | 46      | 24      | 20      | 9           | 1           | 0,5–1,0  |
| 0,25                    | –               | –   | 45      | 25      | 18      | 11          | 1           | 0,5–1,0  |
| 0,47                    | –               | –   | 45      | 23      | 20      | 11          | 1           | 0,5–1,0  |
| 1,03                    | –               | –   | 44      | 27      | 17      | 11          | 1           | 0,5–1,0  |

**Стереологічні характеристики твердого сплаву ВК15 після вільного спікання у вакуумі та спікання у вакуумі під дією розтягуючого напруження**

Середній розмір перетину зерен тугоплавкої складової, площі питомої поверхні міжфазних та міжкарбідних меж, середня умовна товщина зв'язки та відносна частка контактної поверхні зерен тугоплавкої складової вільно спеченого сплаву наведені в табл. 7, сплаву, спеченого під дією розтягуючого напруження, у табл. 8.

Таблица 7. Стереологичні характеристики структури вільно спеченого у вакуумі твердого сплаву ВК15

| Середній розмір зерна WC $\bar{d}_{wc}$ , мкм | Площа питомої поверхні  |  | Середня умовна товщина Со-фази $\bar{L}_{Co}$ , мкм | Відносна частка контактної поверхні зерен $C_{wc-wc}$ , % |
|---|---|--|---|---|
|   | міжфазних меж $\sum S_{wc-co}$ , мкм <sup>2</sup> /мкм <sup>3</sup> | міжкарбідних меж $\sum S_{wc-wc}$ , мкм <sup>2</sup> /мкм <sup>3</sup> |   |   |
| 2,29±0,1                                      | 1,13±0,10   | 0,52±0,1   | 0,93±0,1  | 42±1  |

Об'ємні частки карбідної складової та зв'язки у сплаві не змінилися при вільному спіканні та після спікання сплаву під дією розтягуючого напруження: об'ємна частка карбідної складової  $V_{Vwc} = 76 \pm 2$  %, об'ємна частка зв'язки  $V_{Vco} = 24 \pm 1$  %.

Для наочності характеру зміни стереологічних характеристик структури сплаву графіки зміни деяких величин залежно від значення напруження наведені на рис. 2–4.

Таблица 8. Стереологичні характеристики структури твердого сплаву ВК15, спеченого у вакуумі під дією одноосового розтягуючого напруження

| Розтягуюче напруження, МПа | Місце на зразку, де обраховувались стереологічні характеристики | Середній розмір зерна WC $\bar{d}_{wc}$ , мкм | Площа питомої поверхні  |  | Середня умовна товщина Со-фази $\bar{L}_{Co}$ , мкм | Відносна частка контактної поверхні зерен $C_{wc-wc}$ , % |
|----------------------------|---|---|---|--|---|---|
|                            |   |   | міжфазних меж $\sum S_{wc-co}$ , мкм <sup>2</sup> /мкм <sup>3</sup> | міжкарбідних меж $\sum S_{wc-wc}$ , мкм <sup>2</sup> /мкм <sup>3</sup> |   |   |
| 0,05                       | від очікуваного   | 0   | 1,30±0,10   | 1,43±0,11  | 0,42±0,10   | 34±1,0  |
|                            |   | 20  | 1,79±0,10   | 1,28±0,10  | 0,49±0,10   | 36±1,0  |
| 0,10                       | розриву   | 40  | 1,98±0,10   | 1,22±0,10  | 0,508±0,10  | 40,2±1,0  |
|                            |   | 0   | 1,25±0,10   | 1,49±0,11  | 0,41±0,10   | 35±1,0  |
|                            |   | 20  | 1,71±0,10   | 1,32±0,10  | 0,485±0,10  | 37,1±1,0  |
| 0,15                       | розриву   | 40  | 1,86±0,10   | 1,24±0,10  | 0,50±0,10   | 39±1,0  |
|                            |   | 0   | 1,73±0,10   | 1,45±0,11  | 0,45±0,10   | 36,9±1,0  |
|                            |   | 20  | 1,84±0,10   | 1,30±0,10  | 0,49±0,10   | 38,9±1,0  |
| 0,20                       | розриву   | 40  | 1,91±0,10   | 1,23±0,10  | 0,50±0,10   | 40±1,0  |
|                            |   | 0   | 1,80±0,10   | 1,37±0,10  | 0,473±0,10  | 38,1±1,0  |
|                            |   | 20  | 1,89±0,10   | 1,26±0,10  | 0,50±0,10   | 40±1,0  |
| 0,25                       | розриву   | 40  | 1,95±0,10   | 1,21±0,10  | 0,505±0,10  | 41,3±1,0  |
|                            |   | 0   | 1,82±0,10   | 1,32±0,10  | 0,48±0,10   | 39±1,0  |
|                            |   | 20  | 1,91±0,10   | 1,23±0,10  | 0,505±0,10  | 40,8±1,0  |
| 0,47                       | розриву   | 40  | 1,97±0,10   | 1,19±0,10  | 0,51±0,10   | 42±1,0  |
|                            |   | 0   | 1,87±0,10   | 1,23±0,10  | 0,49±0,10   | 40,8±1,0  |
|                            |   | 20  | 1,98±0,10   | 1,18±0,10  | 0,508±0,10  | 41,8±1,0  |
| 1,03                       | розриву   | 40  | 2,02±0,10   | 1,17±0,10  | 0,51±0,10   | 42±1,0  |
|                            |   | 0   | 1,98±0,10   | 1,19±0,10  | 0,50±0,10   | 41±1,0  |
|                            |   | 20  | 2,14±0,10   | 1,15±0,10  | 0,51±0,10   | 42±1,0  |
|                            |   | 40  | 2,14±0,10   | 1,15±0,10  | 0,51±0,10   | 42±1,0  |

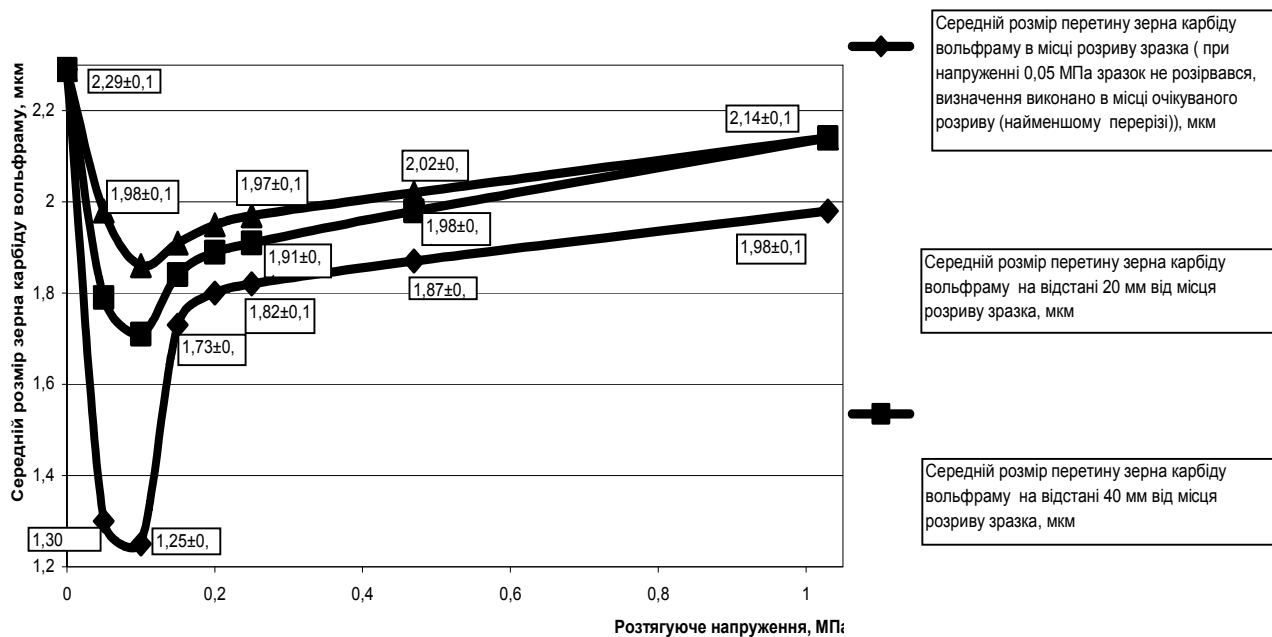


Рис. 2. Середній розмір перетину зерна карбіду вольфраму у твердому сплаві BK15 після вільного спікання у вакуумі та спікання у вакуумі під дією розтягуючого напруження

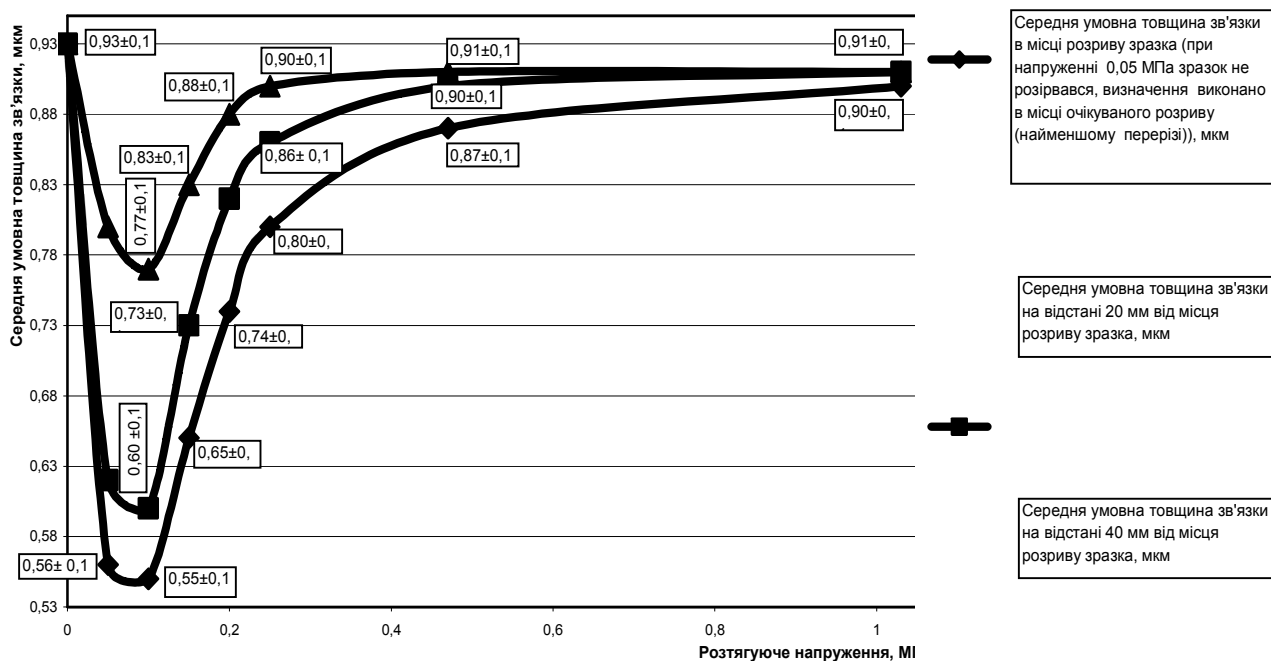


Рис. 3. Середня умовна товщина зв'язки у твердому сплаві BK15 після вільного спікання у вакуумі та спікання у вакуумі під дією розтягуючого напруження

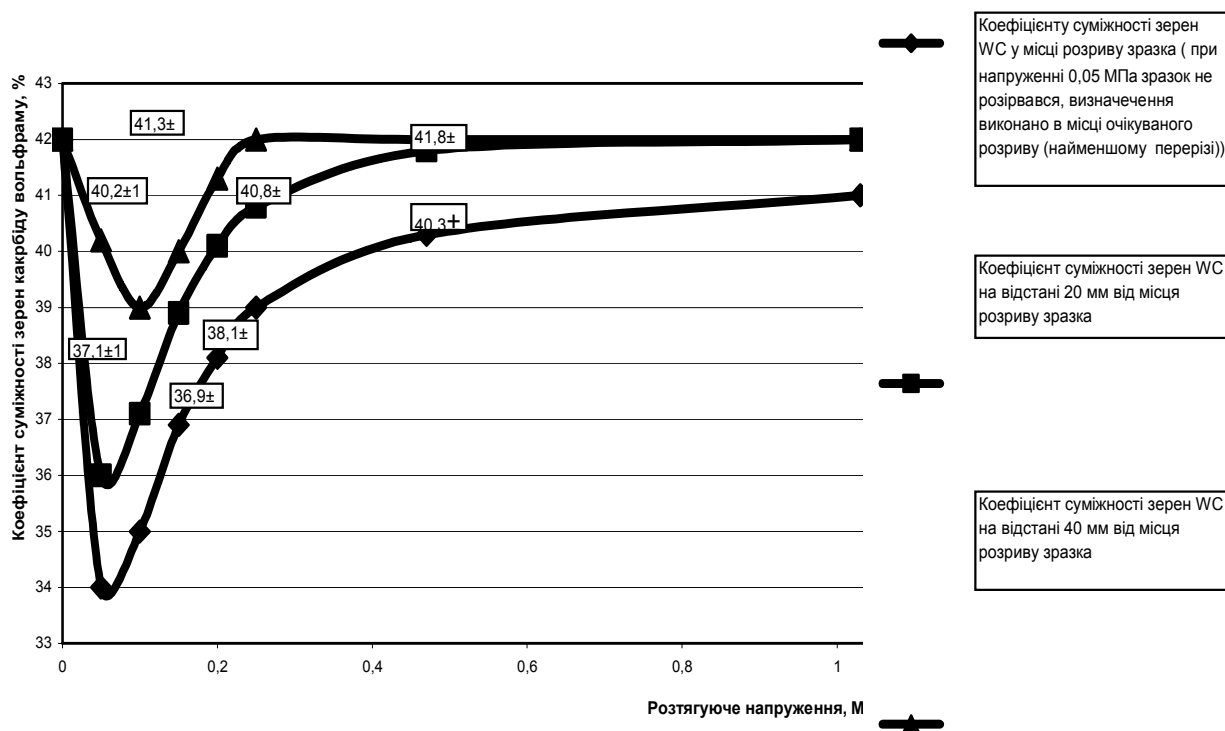


Рис. 4. Коефіцієнт суміжності зерен карбідів вольфраму у твердому сплаві BK15 після вільного спікання у вакуумі та спікання у вакуумі під дією розтягуючого напруження

Середній розмір перерізу зерна WC після вільного спікання перебуває на рівні параметрів середньозернистого серійного твердого сплаву, а після спікання сплаву під дією розтягуючого напруження наближається до рівня дрібнозернистого (див. табл. 8). Особливо це помітно при порівнянні перерізів зерен на місці очікуваного розриву і поблизу розриву зразка. Спостерігаються зменшення площі питомої поверхні міжкарбідних меж, середньої умовної розміру товщини зв'язки, відносної частки контактної поверхні зерен карбідів вольфраму та збільшення площі питомої поверхні міжфазних меж у сплаві після спікання у вакуумі під дією розтягуючого напруження. Необхідно зазначити, що дія розтягуючого напруження спричиняє перебудову структури сплаву: великі зерна пластинчастої форми спрямовуються до переміщення маси сплаву. У результаті такі зерна напруження прагне розташувати у сплаві паралельно.

### Висновки

1. Збільшення розтягуючого навантаження при спіканні сплаву спричинило зменшення коефіцієнта усадки за довжиною експериментального зразка. При цьому максимальне зменшення цього коефіцієнта спостерігається при напруженні 0,10 МПа, за якого зразок розірвався з утворенням у місці розриву „шийки”. Спікання сплаву під напруженням зумовило збільшення коефіцієнта усадки за діаметром. Максимальний приріст спостерігається також при напруженні 0,10 МПа.

2. Спікання сплаву під дією розтягуючого напруження починаючи з 0,05 МПа спричиняє повне зникнення пористості сплаву.

3. Помітної зміни густини, твердості, коерцитивної сили у сплаві після його спікання у вакуумі під дією розтягую-

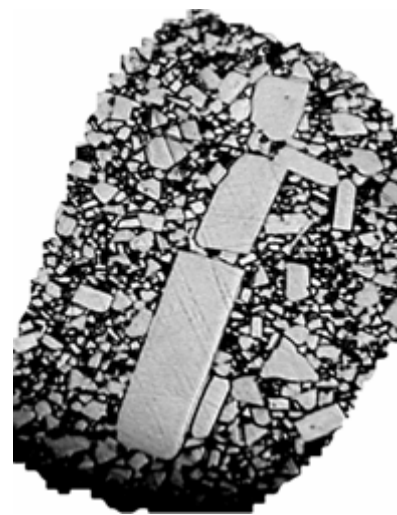


Рис. 6. Великі зерна карбідів вольфраму пластинчастої форми розвернуті вздовж напрямку переміщення маси сплаву

чого напруження не виявлено.

4. Розтягуюче напруження при спіканні зумовлює перебудову структури сплаву: великі зерна WC розвертаються вздовж напрямку дії сили (рис. 5). Зазначені обставини дають підставу для припущення про можливість значної анізотропії властивостей одержаного таким методом сплаву.

### **Література**

1. Особенности технологии изготовления и вопросы организации производства твердосплавных колец большого диаметра / В.П. Бондаренко, К.И. Сирота, А.А. Яремчук и др. // Твердосплавная штамповая оснастка в электротехнической промышленности.— Таллин: Изд-во ЭстНИИ ПТИ, 1975.—С. 42—43.
2. Изготовление твердосплавных колец больших диаметров с ограничением усадки при спекании / В.П. Артюхов, В.П. Бондаренко, Н.И. Семенченко, А.А. Яремчук // Технология изготовления твердосплавных изделий.—К.: Изд-во ИСМ АН УССР, 1978. — С. 102—107.
3. Бондаренко В.П., Сотникова Л.Л., Юрчук М.О. Деякі властивості спечених твердосплавних виробів у вигляді кілець із різною величиною обмеження процесу усадки // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент: техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр. – К.: Изд-во ИСМ НАН Украины, 2007. – Вып. 10. С. 400—406.

*Надійшла 29.05.08*