

### Література

1. Rodriguez A. B., Sevillano J. G. Visoplastic flow of high density W-Ni-Fe alloys during liquid-phase sintering // Tungsten and Tungsten Alloys. Proc. of the first int. conf. on tungsten and tungsten alloys by the metal powder industries federation. November 15–18, 1992, Arlington, Virginia – № 1. – P. 61–68.
2. The effect of porosity on distortion of liquid phase sintered tungsten heavy alloys / X. Xu, A. Upadhyaya, R. M. German, R. G. Iococca // Int. J. Refr. Met. Hard Mat. – 1999. – 17. – P. 369–379.
3. Upadhyaya A., German R. M. Gravitational effects during liquid phase sintering // Mater. Chem. and Phys. – 2001. – 67. – P. 25–31.
4. Вплив вмісту зв'язки на формозміну виробів з вольфрамових сплавів в процесі рідкофазного спікання / В. П. Бондаренко, І. В. Андреев, О. М. Барановський, В. В. Щербань // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр. – Вып. 12. – К.: ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2009. – С. 407–413.
5. Андреев І. В. Деякі аспекти в'язко-пластичної течії виробів із важких сплавів на основі вольфраму // Сверхтвердые матер. – 2015. – № 2. – С. 70–75.
6. Kingery W. D. Densification during Sintering in the Presence of a Liquid Phase. II. Experimental // J. of Appl. phys. – 1959. – 30. – N 3. – P. 307–310
7. Тяжелые сплавы типа ВНЖ-90. 1. Влияние легирования и режимов получения порошков вольфрама на их строение, микроструктуру и свойства спеченных сплавов / К. Б. Поварова, П. В. Макаров, А. Д. Ратнер, и др. // Металлы. – 2002. – № 4. – С. 39–48.

Надійшла 05.07.17

УДК 62-987:621.921.34

**С. І. Шестаков**, канд. техн. наук, **В. П. Бондаренко**, чл.-кор. НАН України  
*Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, м. Київ*

### **ЗАСТОСУВАННЯ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТВЕРДОСПЛАВНИХ МАТРИЦЬ АПАРАТІВ ВИСОКОГО ТИСКУ ДЛЯ СПІКАННЯ АЛМАЗНО-ТВЕРДОСПЛАВНИХ ПЛАСТИН**

*В апараті високого тиску для спікання алмазно-твердосплавних пластин встановлено розподіл основних компонент тензорів напружень і деформацій. Наведено результати оцінювання міцності та довговічності матриці. Подано рекомендації щодо її оптимального скріплення, а також за складом і структурою використовуваного твердого сплаву ВК6, що сприяє підвищенню за даними розрахунків експлуатаційної стійкості матриці в 1,8–2 рази.*

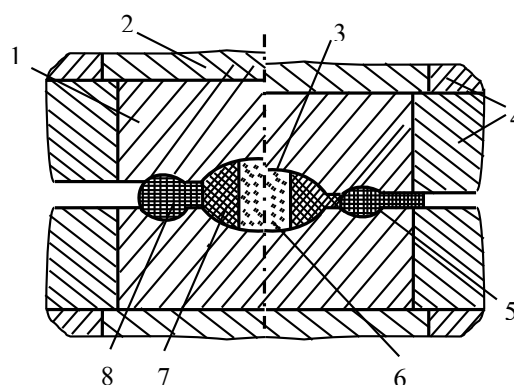
**Ключові слова:** *твердий сплав, склад, структура, апарат високого тиску, матриця, напружений стан, міцність, довговічність.*

До найбільш перспективних виробів для оснащення гірського породоруйнівного інструменту належать алмазно-твердосплавні пластини (АТП) [1], що складаються з алмазного полікристалічного шару і підкладки з твердого сплаву, які спікаються як одне ціле за високого тиску та високої температури.

Однією з основних статей, що визначають собівартість виробництва таких пластин, є витрати з виготовлення і експлуатації апаратів високого тиску (АВТ), і зокрема, використовуваних у них твердосплавних матриць типу «тороїд» (рис. 1). Слід зауважити, що частина вартості блок-матриці в собівартості виробництва АТП діаметром 13,5 мм становить 11,3%, а АВТ загалом – близько 20%. З огляду на постійне підвищення цін на твердий сплав та інші супутні матеріали до пріоритетів належить подовження терміну служби апаратів і підвищення якості АТП, що в них спікаються.



а



б

в

Рис. 1. Спрощена схема АВТ «тороїд» у вихідному стані (а, б) і в процесі спікання АТП (в): 1 – матриця, спечена з твердого сплаву ВКБ; 2 – вставка опорної плити; 3 – центральне заглиблення; 4 – сталеві скріплючі кільця; 5 – тороїдальне заглиблення; 6 – реакційна комірка; 7 – реакційний контейнер; 8 – деформовне ущільнення

АВТ типу «тороїд» складається зі співвісно розташованих верхньої та нижньої матриць, скріплених блоками сталевих кілець (див. рис. 1). Матриці мають заглиблення, що утворюють при стисканні порожнину високого тиску, частина якої займає робочий об'єм, утворений матеріалом контейнера, де розміщують зразки АТП, які спікають.

При зближенні матриць під дією зусилля преса такий контейнер, що містить виріб, який спікається, передає на зразок робочий тиск і електроізолює струмопровідні деталі АВТ. Крім того, витиснена з робочої порожнини під дією високого тиску частина контейнера утворює деформуюче ущільнення, що перешкоджає подальшому витіканню контейнера, а також доволі ефективно скріплює робочу поверхню матриці.

Відмітна особливість зазначених апаратів полягає в наявності кільцеподібних канавок на повернутих одна до одної поверхнях матриць, при зближенні яких утворюються тороїдальна порожнина, заповнена матеріалом контейнера.

Згідно з результатами аналізу кількох десятків зруйнованих матриць встановили, що їх передчасне руйнування спричинили тріщини на робочій і опорній поверхнях (рис. 2), а також незворотне формозмінення лунки і запірного пояса, що розмежовує центральне та тороїдальне поглиблення матриці. Водночас довели, що такі руйнування є наслідком несприятливого напруженого стану матриці в процесі спікання АТП. На нашу думку, насамперед це зумовлено як далекими від оптимальних значеннями окремих геометричних параметрів матриць (у тому числі відповідальних за створення і утримання тиску), так і

недостатньо ефективним бічним підтриманням матриць, створюваним після їх запресовування з натягом у блок сталевих скріплюючих кілець.

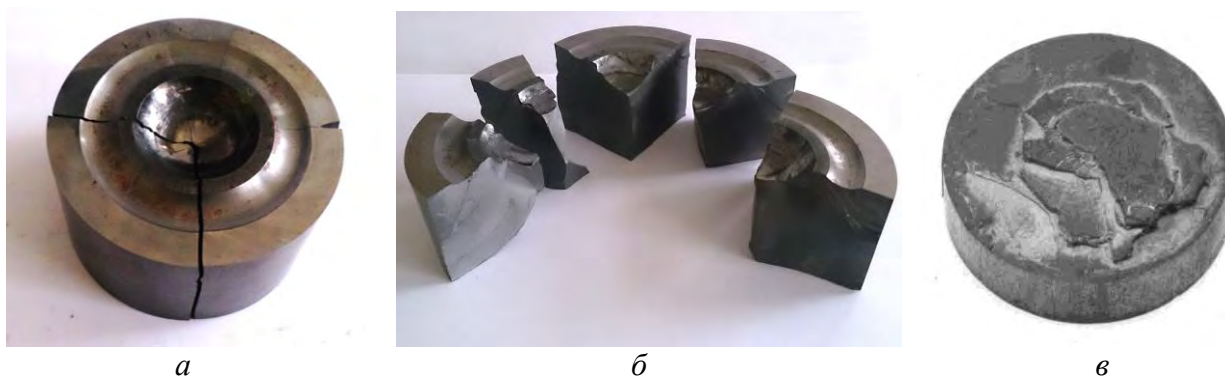


Рис. 2. Загальний вигляд найхарактерніших руйнувань твердосплавних матриць АВТ типу «тороїд»: а, б – наскрізні радіальні тріщини, які зароджуються на робочій поверхні матриці та її фрагментація після випресування з блоку скріплюючих кілець; в – тріщини і великі відколи на опорній поверхні матриці

Доцільно зауважити, що радіальні тріщини спричиняють понад 60% випадків передчасного руйнування матриць при спіканні. Разом з тим, як засвідчує практика і чисельне моделювання напружено-деформованого та граничного станів матриці, наявність у ній радіальних тріщин, що розвиваються процесах синтезу надтвердих матеріалів і спікання пластин, не перешкоджає подальшій експлуатації АВТ, залишковий ресурс яких може сягати 80% загального, а фрагментація матриці (рис. 2, б) спостерігається вже після її випресування з блоку скріплюючих кілець.

У зв'язку із зазначеним об'єктами дослідження і оптимізації були склад і структура твердосплавних матриць з лункою діаметром ~30 мм, а також деякі геометричні та силові параметри, відповідальні за безаварійну експлуатацію АВТ загалом. Як критерій оптимізації брали запас міцності матриці після запресовування в бандажний блок і одноразового термосилового навантаження, а також кількість циклів її навантаження до появи мікротріщин.

Розраховували зазначені параметри статичної та втомної міцності АВТ за раніше запропонованим підходом [2], згідно з яким напружений стан матриці при циклічному навантаженні описується векторами напруг  $\sigma_2$  і  $\sigma_1$ , які визначаються МКЕ і відповідають режимам спікання АТП та подальшого розвантаження апарату. У такому разі гранично допустима кількість циклів навантаження матриці визначається з числового розв'язання системи рівнянь:

$$\begin{aligned} \frac{|\sigma_a|}{|\sigma_+|} &= \left( 1 - \frac{|\sigma_m|}{|\sigma_+|} \eta \right) [1 - m_N \lg(N_1)]; \\ \frac{|\sigma_a|}{|\sigma_+|} &= \left( 1 - \frac{|\sigma_m|}{|\sigma_+|} \eta \right) [1 - m_N \lg(N_2)], \end{aligned} \quad (1)$$

де  $\sigma_a$ ,  $\sigma_m$  – вектори відповідно амплітудних та середніх напружень циклу;  $\sigma_+$ ,  $\sigma_-$  – вектори границь міцності твердого сплаву відповідно на розтягування і стиснення, визначені з

урахуванням масштабного фактору і структурного стану матеріалу;  $m_N$  – коефіцієнт, що характеризує кут нахилу втомної прямої в координатній системі  $(\sigma_{-1} - \lg N)$ ;  $\eta$  – параметр, що враховує взаємну орієнтацію у просторі напружень векторів  $\sigma_+$  і  $\sigma_m$ ;  $\sigma_{-1}$  – границя втоми матеріалу при знаковмінному гармонійному циклічному навантаженні.

Таким чином, для визначення граничної кількості циклів навантаження твердосплавної матриці тороїдального типу необхідно знати характеристики її напружено-деформованого та граничного станів у режимах розвантаження (описується вектором  $\sigma_1$ ) і спікання (описується вектором  $\sigma_2$ ), основні границі міцності на розтягування, стискання і кручення (визначуваними векторами у відповідному просторі напружень), експериментально

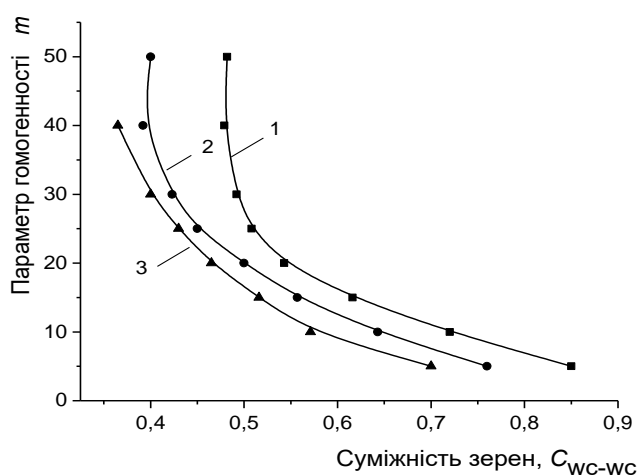


Рис. 3. Залежності параметрів гомогенності твердого сплаву ВК6 від суміжності карбідних зерен для дрібно- (1) середньо- (2) і крупнозернистих (3) твердих сплавів

встановлені залежності зазначених характеристик міцності та втоми від температури спікання, масштабного фактору, складу та структури сплаву і особливостей його карбідного скелета. Останнє можливо врахувати введенням у розрахунки залежності одного з основних параметрів моделі – коефіцієнта гомогенності матеріалу  $m$  [2] від суміжності карбідних зерен  $C_{wc-wc}$  (рис. 3) [3].

Крім того, в якості вихідних даних мають бути визначені напруження на бічній поверхні матриці після її запресування в блок скріплюючих кілець і навантаження робочими тиском і температурою. Оскільки зони, де безпосередньо відбувається спікання і утворюється

деформуюче ущільнення, практично недоступні для вимірювання тиску відповідними датчиками, розподіл нормальних і дотичних напружень, що діють на матрицю в робочому режимі та необхідних для прогнозу її довговічності, визначався аналізом пластичної течії матеріалу контейнера за методикою, запропонованою в [4; 5].

Багаторічна практика експлуатації промислових АВТ засвідчує, що величина і характер розподілу в матриці напружень, її статична і втомна міцність істотно залежать від підтримувального стискуючого напруження  $\sigma_c$ , що постійно діє на матрицю з боку сталевих кілець бандажного блоку і значно підвищується при навантаженні матриці робочими тиском і температурою. Визначимо необхідні значення  $\sigma_c$  за умови, що еквівалентні напруження, обчислювані за критерієм міцності [2], в режимах запресування матриці в бандаж та її навантаження робочими тиском і температурою не перевищують граничні для твердого сплаву характеристики міцності.

У результаті розрахунків отримали розподіл компонент тензора напружень в усіх елементах блок-матриці (рис. 4), а також розподіл нормальних і дотичних напружень на границях їх контакту.

Як впливає з рис. 4, максимальне радіальне і тангенціальне напруження, що дорівнює 2,5 ГПа, отримано в матриці на осі симетрії в нижній точці порожнини поглиблення. Рівень інших компонент тензора напруження в матриці відносно невисокий, що пов'язано з відсутністю навантаження у вертикальному напрямку. У зазначеній області має максимальне значення 2,6 ГПа і інтенсивність координатних напружень  $\sigma_i$ . Аналізуючи розподіл еквівалентних напружень в матриці, наведений на рис. 4, г і отриманий відповідно до запропонованого критерію статичної міцності, зазначимо, що максимальне безрозмірне еквівалентне напруження  $\sigma_e / \sigma_+$ , що становить відповідно 0,65 і 0,85, отримано в нижній області поглиблення і на поверхні матриці, що контактує з першим скріплюючим кільцем з бандажного блоку.

З огляду на те що скріплючі напруження, внаслідок різної жорсткості матриці в осьовому напрямку, дуже чутливі до складального натягу, його подальше збільшення в процесі складання блок-матриці небажано, щоб уникнути зростання пластичної деформації внутрішніх поверхонь скріплюючих кілець і руйнування матриці ще при складанні в напрямку площини, яка проходить через точки, де еквівалентні напруження мають максимальні значення.

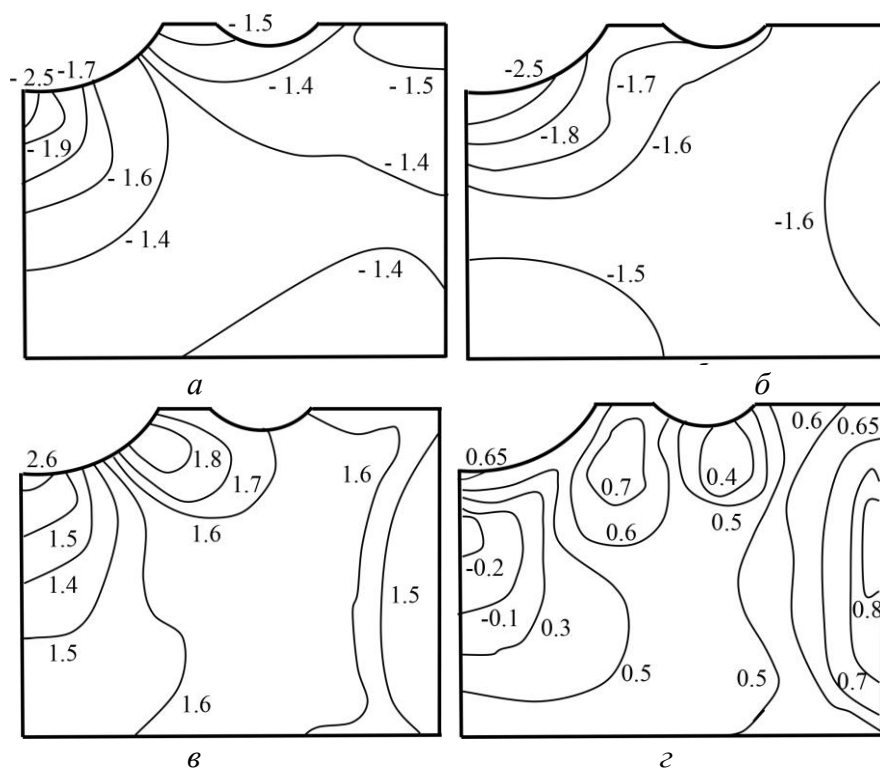


Рис. 4. Розподіл в матриці після її запресування у бандажний блок радіальних (а) і тангенціальних (б) напружень, інтенсивності напружень (в), а також безрозмірних еквівалентних напружень (г), розрахованих за критерієм статичної міцності

Оскільки згідно зі здійсненим кінцевоелементним моделюванням, запас міцності матриці після складання блок-матриці малий, спробуємо визначити шляхом варіювання

необхідний рівень скріплюючих напружень, під дією яких матриця як при складанні АВТ, так і робочому тиску експлуатується в безпечному режимі.

Для визначення оптимального значення скріплюючих напружень  $\sigma_c$  розроблено методику, згідно з якою результуючі компоненти тензора напружень  $\sigma_{ij}$  у циліндричній системі координат мають вигляд

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^p + k_c \sigma_{ij}^c, \quad (2)$$

де  $\sigma_{ij}^p$  – компоненти тензора напружень, що діють в матриці в робочому режимі, отримані з урахуванням температурного приросту тиску в реакційній зоні;  $k_c$  – коефіцієнт;  $\sigma_{ij}^c$  – компоненти тензора напружень в матриці, що виникають внаслідок дії скріплюючих напружень  $\sigma_c$ .

Розподіл і значення компонент тензора напружень  $\sigma_{ij}^p$  переважно визначаються розподілом на робочій поверхні матриці контактних напружень  $\sigma_k$  і  $\tau_k$  та скріплюючих

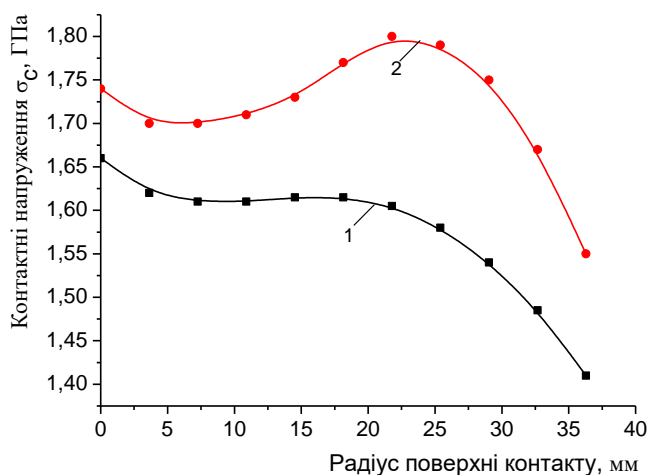


Рис. 5. Розподіл нормальних напружень на границі контакту матриці з блоком скріплюючих кілець: 1 – після складання блок-матриці (або в режимі розвантаження); 2 – у робочому режимі

дією радіальної складової робочого навантаження, що спричиняє збільшення зовнішнього радіуса матриці.

Розподіл нормальних і дотичних напружень на робочій поверхні матриці в процесі стискання і подальшого нагрівання (рис. 6) встановлено, як зазначалося, у результаті розрахунку методом ліній ковзання пластичної течії контейнера з пресованого літографського каменю.

напружень  $\sigma_c$  (рис. 5) з урахуванням їх приросту в робочому режимі.

Аналізуючи показані на рис. 5 криві, зазначимо істотну неоднорідність розподілу контактних напружень по висоті матриці, що зростає в робочому режимі. Максимальне значення контактних напружень отримано на бічній поверхні матриці і, зокрема, на окружності, що перебуває на відстані 21,8 мм від опорної поверхні матриці. У цьому самому місці згідно з розрахунками спостерігається максимальна відмінність скріплюючих напружень в режимах розвантаження і спікання, що становить 0,21 ГПа. Такий чималий приріст скріплюючих напружень в робочому режимі, а також пластичне деформування перших двох сталевих кілець зумовлені

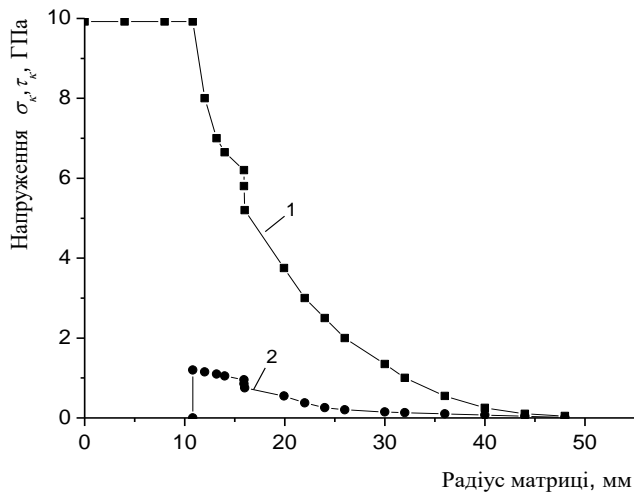


Рис. 6. Розподіл нормальних  $\sigma_k$  (1) і дотичних  $\tau_k$  (2) напружень на робочій поверхні матриці в режимі спікання АТП

Як вихідні дані приймали, що константи в умові пластичності Кулона, що характеризують залежність опору зсуву матеріалу контейнера від досягнутого тиску, залежать також від неоднорідного температурного поля. Тоді діючі на матрицю дотичні напруження  $\tau_k$ , напрямком дії яких збігається з напрямком витікання матеріалу контейнера в процесі стискання, визначаються рівнем нормальних напружень  $\sigma_k$ , і становлять  $\tau_k = 0,51 + 0,16 \sigma_k$  [4; 5].

Розподіл температури в АВТ отримано відповідно до методики, викладеної в [6]. Встановлено, що коли при спіканні АТП температура в центрі реакційного об'єму становить близько

1500 °С, на границі контакту реакційного контейнера з твердосплавною матрицею вона не перевищує 800 °С, а на границі контакту матриці з бандажним блоком і в основному тілі матриці – 200–300 °С. Разом з тим, розрахована температура у твердосплавних елементах АВТ доволі висока, що спричиняє необхідність урахування залежності основних фізико-механічних властивостей матеріалів від досягнутої температури.

Відповідні до зазначеного розподілу нормальних і дотичних напружень на робочій поверхні матриці характеристики її напружено-деформованого і граничного станів у вигляді ізоліній однакових напружень показано на рис. 7. Тут так само внаслідок осесиметричності твердосплавної матриці і діючих на неї термосилових навантажень, а також симетричності розглянутого типу АВТ відносно площини роз'єму блок-матриць, об'єктом дослідження була четверта частина осьового перетину матриці і контактуючих з нею деталей оснастки.

Аналіз отриманих результатів показує, що в режимі робочого навантаження практично вся матриця, як і в режимі запресування, експлуатується в умовах, близьких до всебічного нерівномірного стиснення. Найвище стискуюче напруження отримали безпосередньо на робочій поверхні матриці та в близько розташованих до неї областях спеченого твердого сплаву. Найбільші значення стискуючих напружень – 5,45 і 8,52 ГПа – отримали відповідно для радіальних і осьових напружень. Проте, якщо перші з них досягають максимуму на кромці поглиблення матриці, то другі – у нижній точці заглиблення. Для розподілу осьових напружень характерна наявність локального максимуму – 3,9 ГПа на кромці опорної поверхні матриці, зумовленого різким зростанням контактних напружень (рис. 8), які прямують до нескінченності зі збільшенням радіуса зазначеної поверхні.



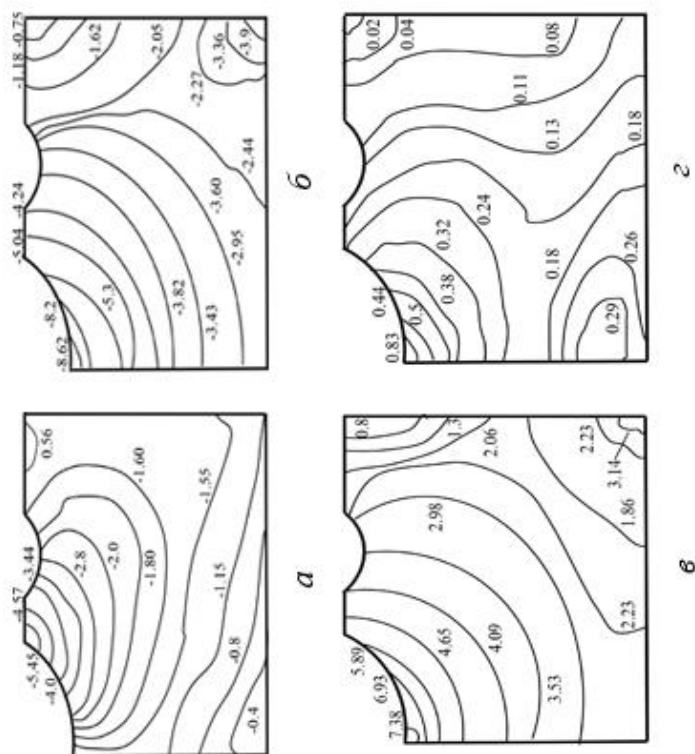


Рис. 7. Розподіл в матриці у процесі спікання АП радіальних (а) та осьових (б) напружень, інтенсивності напружень (в), а також безрозмірних еквівалентних напружень (г), розрахованих за критерієм статичної міцності

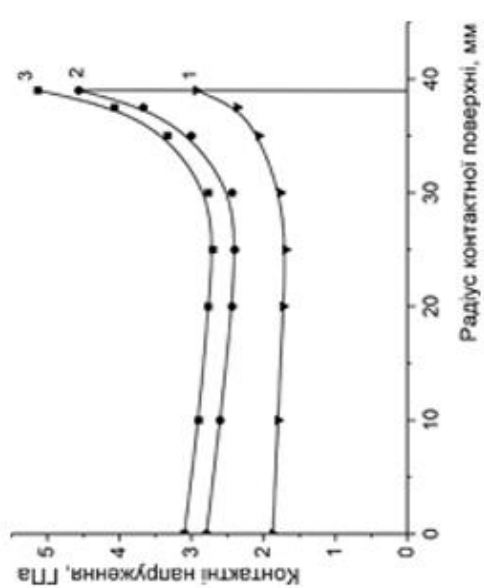


Рис. 8. Розподіл нормальних напружень на опорній контактній поверхні матриці залежно від досягнутого в АВТ тиску: 1 – 6 ГПа; 2 – 9 ГПа; 3 – 10 ГПа



Як впливає з результатів дослідження, на величину і характер розподілу контактних напружень (рис. 9), а також на міцність матриці при одноразовому термосиловому навантаженні впливає висота матриці. З урахуванням того, що висота серійної матриці становить близько 35 мм, відхилення висоти матриці від базового розміру як у бік збільшення, так і зменшення призводить до підвищення еквівалентних напружень. Для матриць висотою понад 40 мм ці напруження в небезпечній точці перевищують граничні для твердого сплаву, що зумовлено зніженням міцності матеріалу внаслідок масштабного фактору. Разом з тим заданими розрахунків, зменшення висоти матриці до 30 мм спричиняє появу еквівалентних напружень, які перевищують на опорній поверхні граничне значення. Це зумовлено появою в матриці розтягуючих напружень внаслідок кільцевого вигину, що виникає, у свою чергу, через зниження її згинальної

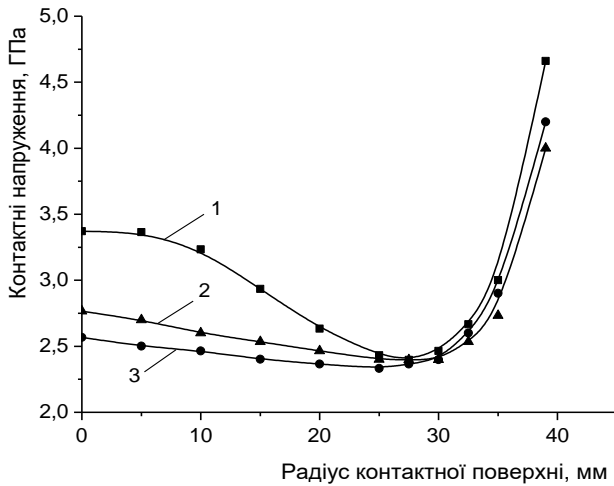


Рис. 9. Розподіл напружень на границі контакту матриці висотою 30 (1), 35 (2) і 40 мм з твердосплавної вставкою з сплаву ВК15 опорної плити АВТ

жорсткості. Знаючи контактне напруження на робочій, бічній і опорній поверхнях матриці, доцільно поставити завдання, спрямоване на пошук оптимального значення скріплюючих напружень. Варіюючи їх значення, визначимо міцність базової матриці після її скріплення бандажним блоком і за подальшого навантаження робочим тиском та нагрівання. Згідно з умовою (2) коефіцієнт  $k_c$  в численних експериментах змінювався від 1 до 2, де нижня границя відповідає тиску 1,0 ГПа, тобто мінімально можливому значенню  $\sigma_c$ , створюваному бандажним блоком, при якому матриця внаслідок недостатнього підтримання руйнується вже при першому циклі навантаження; при цьому верхня границя відповідає тиску 2,0 ГПа. Збільшення тиску понад зазначену границю недоцільне, оскільки в цьому випадку матриця може зруйнуватись тільки від бічних скріплюючих напружень ще у процесі складання блок-матриці.

жорсткості.

Знаючи контактне напруження на робочій, бічній і опорній поверхнях матриці, доцільно поставити завдання, спрямоване на пошук оптимального значення скріплюючих напружень. Варіюючи їх значення, визначимо міцність базової матриці після її скріплення бандажним блоком і за подальшого навантаження робочим тиском та нагрівання. Згідно з умовою (2) коефіцієнт  $k_c$  в численних експериментах змінювався від 1 до 2, де нижня границя

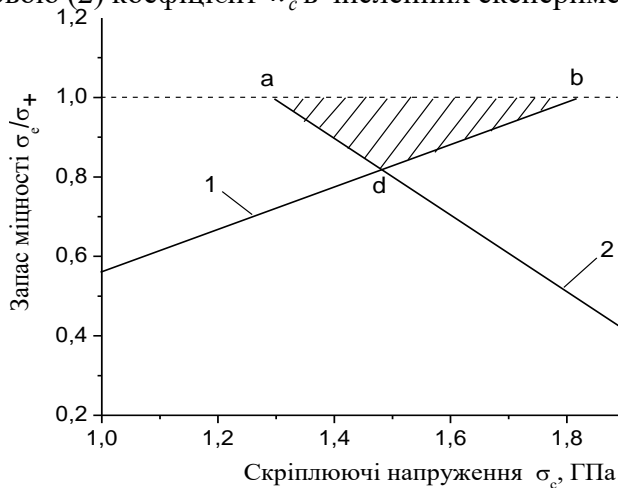


Рис. 10. До визначення оптимальних значень скріплюючих напружень, що діють на матрицю з боку блоку бандажних кілець: 1 – режим запресування матриці в бандажний блок; 2 – режим спікання АТП

відповідає тиску 1,0 ГПа, тобто мінімально можливому значенню  $\sigma_c$ , створюваному бандажним блоком, при якому матриця внаслідок недостатнього підтримання руйнується вже при першому циклі навантаження; при цьому верхня границя відповідає тиску 2,0 ГПа. Збільшення тиску понад зазначену границю недоцільне, оскільки в цьому випадку матриця може зруйнуватись тільки від бічних скріплюючих напружень ще у процесі складання блок-матриці.

Результати розрахунків для двох основних схем навантаження твердосплавної матриці показано на рис. 10. Наведена на рис. 10 горизонтальна

лінія, що відповідає  $\sigma_e = 1$ , позначає граничний стан матеріалу, після якого несуча здатність матриці в небезпечних точках вичерпується вже після першого циклу навантаження.

За характером побудованих залежностей виду  $\sigma_e = f(\sigma_c)$  можна встановити інтервал оптимальних значень  $\sigma_c$ , за яких у жодній з небезпечних точок матриці напруження  $\sigma_e$  не перевищує допустиме.

Інтервал значень скріплюючих напружень, що забезпечують умови безпечної експлуатації матриці, за даними розрахунків становить від  $\sigma_a = 1,30$  ГПа до  $\sigma_b = 1,82$  ГПа. При  $\sigma_c = 1,48$  ГПа точка  $d$  на рис. 10 відповідає напруженому стану, за якого матриця має однакову міцність в обох режимах. Якщо матриця інтенсивно експлуатується, значення  $\sigma_c$  слід вибирати з області  $\sigma_a < \sigma_c < \sigma_b$ . Якщо для режиму експлуатації матриці характерні значні перерви в роботі, значення  $\sigma_c$  доцільно вибирати з області  $\sigma_a < \sigma_c < \sigma_d$ . Вибір оптимальних значень скріплюючих напружень  $\sigma_c$  із зазначеного діапазону кращий, незважаючи на те, що при навантаженні матриці робочим тиском напруження збільшуються порівняно з вихідним станом. Зокрема, це зумовлює той факт, що під час випробувань матриці не руйнуються при  $\sigma_c < \sigma_a$ . Як видно з рис. 10, у робочому режимі приріст напружень становить близько 15%, що порівняно з аналогічним приростом напружень в блок-матриці АВТ типу «ковадло із заглибленнями» [3]. Визначене за розрахунками на міцність АВТ оптимальне значення скріплюючих напружень, що дорівнює 1,48 ГПа, забезпечує підвищення статичної міцності матриці шляхом зниження  $\sigma_e$  з 0,91 до 0,81 і відповідає осьовому натягу близько 15 мм, з яким матриця згідно з технологічним процесом запресовується в попередньо складений блок бандажних кілець.

Таким чином, у результаті проведених досліджень встановлено основні причини руйнування матриці після її запресування в блок скріплюючих кілець і в режимі однократного термосилового навантаження тиском і температурою, що відповідає технологічним режимам спікання АТП. Разом з тим, результати аналізу доволі великої кількості зруйнованих у процесі експлуатації матриць свідчать про втомний характер їх руйнування, що призводить до необхідності додаткового оцінювання довговічності основних елементів АВТ. Критерієм такого оцінювання потрібно взяти кількість циклів навантаження матриці до створення мікрodefектів.

У процесі комп'ютерного моделювання втомної міцності будемо вирішувати ще одну практично важливе завдання, що полягає в оптимізації складу і структури твердого сплаву з метою підвищення експлуатаційної стійкості матриці та апарату високого тиску типу «тороїд» загалом.

Режим роботи зазначеного апарату можна охарактеризувати як повторно-змінний або режим, характерний для малоциклового термосилового навантаження [7; 8].

Під час комп'ютерного моделювання один цикл термосилового навантаження матриці, як показано на рис. 11, містить періоди набору тиску, нагрівання реакційної суміші шляхом прямого пропускання електричного струму (що зумовлює підвищення тиску до 9–10 ГПа), витримування за досягнутого тиску і температури протягом регламентованого певного технологічного режиму спікання, а також період зняття температури і остаточного розвантаження АВТ шляхом зняття тиску [9].

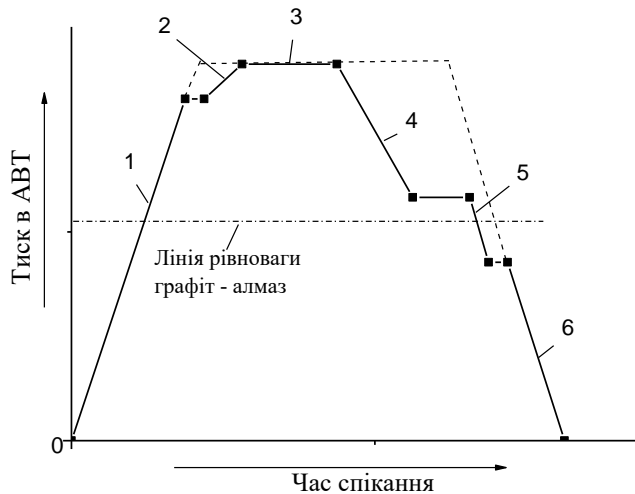


Рис. 11. Графік зміни тиску в АВД типу «тороїд» за один цикл спікання АТП та його лінійна апроксимація, яка використовується в розрахунках експлуатаційної стійкості твердосплавної матриці: 1 – ділянка набору тиску; 2 – нагрівання реакційної суміші до температури спікання; 3 – витримування при досягнутому тиску; 4 – зняття температури; 5, 6 – зняття тиску.

Необхідно зазначити, що показані на рис. 11 зміни тиску в рамках одного циклу навантаження мають умовний характер, оскільки не було враховано тимчасових проміжків між певними етапами термосилового навантаження АВТ, передбачених технологією спікання, протягом яких могла відбуватись релаксація напружень в матриці.

Як вихідні дані задавали фізико-механічні властивості твердих сплавів та використовуваних в АВТ інструментальних сталей, розподіли характеристик напружено-деформованого і граничного станів у матриці в початковому стані й робочому режимі (рис. 4 і 7).

Розраховані для цього режиму значення навантаженого об'єму і залежних від нього констант матеріалу з критерію статичної міцності [2] наведені в таблиці. Для порівняння в таблиці наведені аналогічні характеристики матеріалу для режиму запресовування.

### Значення механічних констант і навантаженого об'єму сплаву ВК6, отримані для різних видів напружено-деформованого стану АВТ

Вид навантаження матриці	Навантажений об'єм $V_H \cdot 10^{-6}, \text{ м}^3$	Механічні властивості твердого сплаву ВК6				
		$\sigma_+, \text{ ГПа}$	$\sigma_-, \text{ ГПа}$	$\tau_{кр}, \text{ ГПа}$	$\sigma_+ / \sigma_-$	$A$
Запресування у блок скреплюючих кілець	135,4	0,61	3,25	1,12	0,19	0,89
Навантаження робочими тиском і температурою	0,116	1,24	5,67	1,19	0,22	0,77

Оптимальні склад і структура твердосплавних матриць, що відповідають їх максимальній експлуатаційній стійкості в межах запропонованого підходу визначали шляхом варіювання для сплавів різної зернистості об'ємним вмістом кобальту VvCo від 4,5 до 25 мас.%. Залежності характеристик міцності від зазначених параметрів, а також масштабного фактору для твердих сплавів, що вирізняються нестандартним вмістом кобальту за масою, визначали інтерполяційним методом. З розгляду автоматично виключали варіанти матриць, з низькою статичною міцністю, а також матриці з накопиченою пластичною деформацією, що перевищує допустиму для даного твердого сплаву, зокрема, в області замикаючого пояску.

Як впливає з рис. 12, а найбільшу довговічність виявили матриці, спечені із середньозернистого сплаву, що містить близько 6,5 мас.% кобальту. На рис. 12, б у вигляді ізоліній показано результати оцінювання експлуатаційної стійкості матриці з оптимальними геометричними параметрами, умовами бічного підтримання, а також складом и структурою.

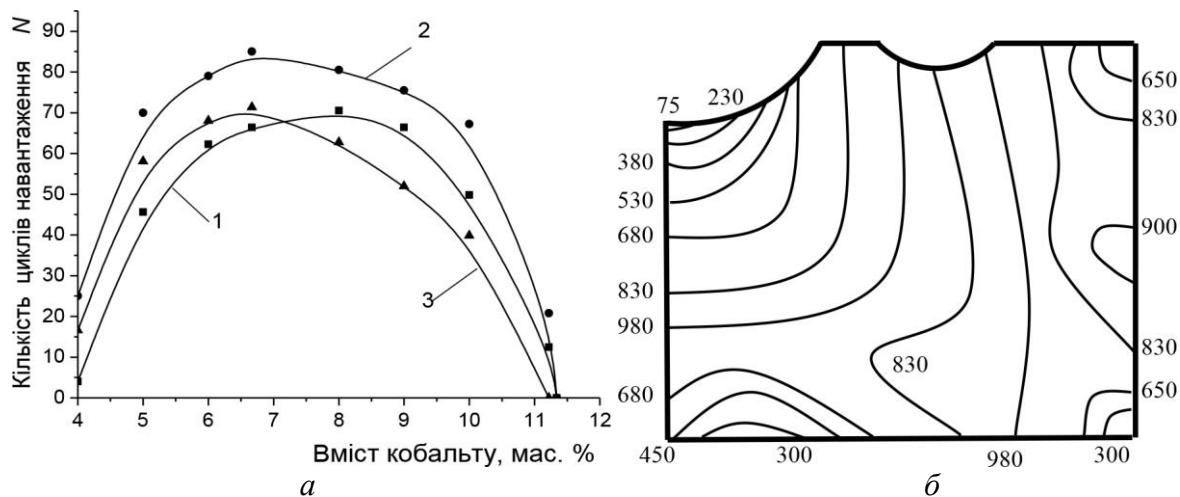


Рис. 12. Залежності експлуатаційної стійкості матриці від вмісту кобальту і середнього розміру зерна карбіду вольфраму ( $d_{WC}$ ) для дрібно (1), – середньо (2) і крупнозернистих (3) сплавів(а) і ізолінії числа циклів навантаження матриці до появи мікротріщин (б)

З огляду на те що в перерізі матриці з великим запасом міцності (малі або від'ємні еквівалентні напруження) розрахункове число навантажень АВТ може бути десятки або навіть сотні тисяч циклів, прийнято  $N < 1000$ . Як бачимо з рис. 12, робочий ресурс матриці насамперед вичерпується в зоні, що прилягає до нижньої точки поглиблення. І якщо кількість циклів навантаження в цій області для базового варіанта не більше 37 [10], матриця з оптимальними структурними параметрами здатна витримувати щонайменше 75 прес-спікань до появи мікрodefектів. За відсутності руйнування в цій області, що на практиці можливо через локальне зміцнення матеріалу або інші невраховані фактори (наприклад, короткочасну високотемпературну повзучість, релаксацію напруження), найнебезпечнішими стають прилеглі зони в області заглиблення, а також край плоского торця матриці та кромка заглиблення, де  $N$  за даними розрахунків не перевищує 300 циклів навантаження.

Таким чином, на підставі проведених розрахунків можна сформулювати рекомендації, спрямовані на оптимізацію складу та структури матриць, що дають змогу в сукупності з раніше встановленими оптимальними значеннями їх розмірів і умов термосилового навантаження підвищити їх експлуатаційну стійкість в 1,8-2 рази при спіканні АТП діаметром 13,5 мм.

Насамкінець зауважимо, що визначені в результаті розрахунків оптимальні значення параметрів гомогенності твердого сплаву  $m(n)$  надають можливість за припущення, що матриця працює в умовах, близьких до всебічного стискання, визначити необхідний рівень суміжності карбідних зерен. Так, для розрахункового оптимального значення  $m = 11,05$  коефіцієнт суміжності  $C_{wc-wc}$  згідно з даними рис. 3 повинен дорівнювати 0,62 для середньозернистих сплавів ВК6.

### Висновки

1. Грунтовно досліджено напружено-деформований та граничний стан АВТ типу «тороїд» для спікання алмазно-твердосплавних пластин.

2. Вперше в повному обсязі розглянуто основні технологічні етапи експлуатації АВТ, включаючи складання блок-матриці, режими створення та утримання високого тиску і високої температури, навантаження й розвантаження та особливості контактної взаємодії деталей.

3. Вперше крім традиційного обліку залежностей фізико-механічних властивостей твердих сплавів від температури нагрівання, складу і структури враховано певні особливості карбідного скелета, що виражаються в залежності параметра гомогенності не лише від масштабного фактору, виду і неоднорідності напруженого стану, а й розміру і суміжності карбідних зерен.

4. Розрахунково доведено, що оптимізація окремих геометричних параметрів і умов експлуатації основних елементів АВТ, і зокрема твердосплавних матриць тороїдального типу, поряд з оптимізацією складу і структури сплаву сприяють подовженню терміну їх експлуатації (або ресурсу) майже вдвічі.

*В аппарате высокого давления для спекания алмазно-твердосплавных пластин установлено распределение основных компонент тензоров напряжений и деформаций. Приведены результаты оценки прочности и долговечности матрицы. Даны рекомендации по ее оптимальному скреплению, а также по составу и структуре используемого твердого сплава ВК6, позволяющие повысить по данным расчетам эксплуатационную стойкость матрицы в 1,8–2 раза.*

**Ключевые слова:** твердый сплав, состав, структура, аппарат высокого давления, матрица, напряженное состояние, прочность, долговечность.

### THE USE OF THE COMPUTER MODELING FOR IMPROVING OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF HARD-ALLOY MATRICES OF HIGH-PRESSURE APPARATUSES INTENDED FOR SINTERING DIAMOND-HARD ALLOY PLATES

*As a result of the performed study the distributions of the basic components of stress and strain tensors in HPD have been obtained, the assessments of strength and fatigue life of the matrices have been made. We have also provided recommendations concerning the optimal matrix binding and the adjustment of the composition and structure of WC–6 wt.% Co cemented carbide used. According to the calculations this leads to 1.8–2 time increase in service durability of the matrices.*

**Key words:** hard alloy, composition, structure, high-pressure apparatus, matrix, stressed state, strength, durability.

### Література

1. Пат. 3854854 США, МКИ<sup>2</sup> В30 В 11/32. High pressure producing apparatus / Л. Ф. Верещагин, Л. Г. Хвосталцев.– Оpubл. 17.12.74.
2. Новиков Н. В., Куш В. И., Шестаков С. И. Применение критерия Писаренко – Лебедева для прогнозирования циклической прочности аппаратов высокого давления для синтеза алмазов и других сверхтвердых материалов // Вісн. Нац. техн. ун-ту України «Київський політехнічний інститут», Машинобудування. – 2010. – Вип. 58. – С. 171–176.
3. Chermant J. L., Deschanvres A., Osterstock F. Factors Influencing the Rupture Stress of Hardmetals // Powder Met. – 1977. – N 2. – P. 63–69.
4. Новиков Н. В., Левитас В. И. Моделирование термопластического течения материалов в аппаратах высокого давления / Вестн. АН УССР. Сер. А. – 1985. – № 1. – С. 28–33.

5. Левитас В. И., Душинская Г. В. Исследование напряженного состояния деформируемого уплотнения АВД типа «тороид» // Сверхтвердые матер. – 1983. – № 5. – С. 7–11.
6. Моделирование электрических, температурных полей и полей термонапряжений в АВД методом конечных элементов / Н. В. Новиков, В. И. Левитас, А. А. Лещук С. И. Шестаков и др. // Сверхтвердые матер. – 1983. – С. 3–8.
7. Серенсен С. В., Когаев В. П., Шнейдерович Р. М. Несущая способность деталей машин. – М.: Машиностроение, 1975. – 488 с.
8. Когаев В. П. Расчет на прочность при напряжениях, переменных во времени. – М.: Машиностроение, 1993. – 354 с.
9. Бочечка А. А., Гаргин В. Г. Оценка величины давления при спекании алмазно-твердосплавных пластин в аппарате высокого давления типа «тороид» // Сверхтвердые матер. – 1998. – № 3. – С. 31–39.
10. Компьютерное моделирование напряженно-деформированного и предельного состояний матриц аппаратов высокого давления для спекания алмазно-твердосплавных пластин / В. П. Бондаренко, С. И. Шестаков, Н. А. Юрчук и др. // Электрон. ресурс: сб. науч. тр. 5-й междунар. конф. «HighMatchTech». – 2015. – С. 67–73

Надійшла 22.06.17

УДК 669.018.025

**В. П. Бондаренко**, член-кор. НАН України, **І. О. Гнатенко**, канд. техн. наук,  
**О. О. Матвійчук**, **М. М. Прокопів**, канд. техн. наук<sup>1</sup>, **В. Г. Заволокін**<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, м. Київ

<sup>2</sup>Національний технічний університет України «КПІ», м. Київ

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКУ МІЖ ФОРМОЮ ПЕРЕТИНУ ЗЕРЕН ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО WC ТА ЇХ МІКРОТВЕРДІСТЮ

У роботі наведені результати дослідження мікротвердості зерен карбіду вольфраму WC в сплаві VK28. Встановлено, що базисні площини мають велику мікротвердість ніж призматичні.

**Ключові слова:** карбід вольфраму, твердий сплав, перетин зерен, мікротвердість.

### Вступ

Карбід вольфраму WC широко використовується для виготовлення виробів інструментального і конструкційного призначення, а також в якості захисних і функціональних покриттів, що працюють в екстремальних умовах. Властивості таких матеріалів в значній мірі будуть залежати від властивостей карбіду WC, які обумовлені технологією його отримання. Основний вплив на властивості карбіду вольфраму WC здійснюють температури відновлення вольфраму і науглецювання його до WC, а також умови отримання виробів, що містять WC. Про вплив температур відновлення вольфраму і науглецювання його до карбіду WC на властивості твердих сплавів повідомляли В.А. Івенсен зі співробітниками [1], Г.Е. Екснер [2], Ц. Юнкси [3], Е. Ласнер [4], В.П. Бондаренко зі