

УДК 669.018.025

В. П. Бондаренко¹, член-корр. НАН Украины; **І. О. Гнатенко¹**;
М. М. Прокопів¹, **І. В. Андреев¹**, кандидати технічних наук; **О. О. Матвійчук¹**; **В. Г. Заволокін²**

¹Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, м. Київ,

²Національний технічний університет України «КПІ», м. Київ

ВПЛИВ НАВАНТАЖЕННЯ ПРИ ІНДЕНТУВАННІ НА ПОВЕДІНКУ ГРАНИЦЬ WC–WC У ТВЕРДИХ СПЛАВАХ

Визначено поведінку границь різних типів у сплаві ВК28 спеченому за температури 1370 °С при навантаженні під час індентування. Застосування навантаження 400 г при індентуванні дало змогу дослідити поведінку різних типів границь WC–WC у сплаві. Встановлено, що границі WC–WC, які сильно і слабо травляться реактивом Мураками, гальмують поширення мікротріщин у твердому сплаві ВК28. Границі, що не травляться, мають різну міцність, у результаті чого одні з них виявляються після одного укола, інші тільки після двох уколів, розташованих близько один до одного. Це свідчить про те, що границь, які не травляться, значно більше, ніж їх можна визначити за теоремою Вульфа.

Ключові слова: твердий сплав, границі зерен, навантаження при індентуванні, структура твердого сплаву.

Вступ

У [1–9] зазначено, що властивості твердих сплавів безпосередньо залежать від їх структури. Відомо, що границі зерен є важливою складовою структури твердих сплавів, від якої залежать якість і функціональність твердосплавного інструменту. На думку окремих дослідників [1], границі зерен і блоків мають велику стійкість до деформації при передаванні її в суміжні зерна, у результаті чого карбідний скелет дрібнозернистих сплавів стійкіший до деформації, ніж крупнозернистих. Механічні характеристики твердих сплавів залежать не лише від розміру зерна WC, але й від ступеня контакту карбідних зерен. У [2; 3] зауважується, що при невеликих навантаженнях спостерігається локальне руйнування твердого сплаву на границях WC–WC. Зі збільшенням у сплавах вмісту зв'язуючої фази різко зменшуються зв'язність та суміжність карбідних зерен, тому руйнування границь WC–WC спричиняє значніше деформацію кобальтових прошарків.

У [4–6] зауважується, що енергія на границях зерен WC–WC залежить від конфігурації границі, тобто орієнтації зерен одне до одного, типу площин, що дотикаються, утворюючи границю(базисні чи призматичні) та типу поверхневого шару атомів (вольфраму чи вуглецю). Докладно стабільність границь вивчено в [6]. Як було показано, що існують три типи границь зерен: WC–WC без Co (низькоенергетичні), WC–WC з Co (високоенергетичні) і границі WC–WC з присутнім Co товщиною 10–20 нм, що робить їх стабільнішими та стійкішими до інфільтрації.

У [7–9] запропоновано розрізняти три типи міжзеренних границь WC–WC у твердих сплавах за ступенем їх травлення реактивом Мураками. Згідно з [10] класифікація границь така: WC–WC, що після травлення не мають чіткої межі відокремлення (їх товщина перевищує 0, але менша від 0,2 мкм), вважаються границями WC–WC з неповною відповідністю кристалічних ґраток контактуючих площин кристалів; WC–WC, що після травлення реактивом Мураками мають чітку межу товщиною 0,2–0,5 мкм, приймаються як границі WC–WC з повною невідповідністю кристалічних ґраток контактуючих площин кристалів; WC–WC, що не виявляються при травленні і при дослідженні структури перебувають в утвореннях зростків кількох зерен, вважаються границями WC–WC з ідеальною відповідністю кристалічних ґраток контактуючих площин кристалів WC.

Оскільки у твердих сплавах виявляються різні типи границь з різною поверхневою енергією, що залежить від орієнтації зерен WC одне до одного, ступеня їх чистоти та хімічного складу, міцність цих границь повинна різнитись. З огляду на викладене мета цієї роботи - дослідити поведінку границь WC–WC різних типів під навантаженням при їх індентуванні.

Методика дослідження

З метою встановлення впливу навантаження на поведінку границь WC–WC у твердих сплавах виготовили зразки з твердого сплаву BK28. Як вихідні використовували порошки кобальту та високотемпературного карбіду вольфраму. Розміри карбідних часточок становили +40–80 мкм. Оскільки часточки WC мали розвинену неправильну форму, для зручності їх пресування та кращого подальшого спікання їх вкривали шаром кобальту. Замішування здійснювали в середовищі спирту з додаванням пластифікатора протягом 24 год у шаровому млині. Готові суміші сушили та пресували на гідравлічному пресі при тиску 100 МПа.

Заготовки піддавали нормалізуючому спіканню за температури 1150 °С, а потім спікали за температури 1370 °С. На спечених зразках готували шліф та досліджували мікроструктуру твердих сплавів за допомогою оптичного мікроскопу МИМ-8М зі збільшенням $\times 700$. Сплав попередньо травили реактивом Муракамі протягом 240 с.

Поведінки границь при навантаженні визначали за допомогою мікротвердоміру ПМТ-3, оснащеного камерою-відеоокуляром, якою фотографували структуру сплаву до та після прикладення навантаження; збільшення становило $\times 700$ крат.

При вимірюванні навантаження становило 200 та 400 г, витримка - 5 с. Використовували індентор по Віккерсу (чотиригранну піраміду з кутом 136°). Середній діаметр відбитка становив 17 мкм.

Місце уколу вибирали з метою визначення поведінки границь WC–WC різних типів (сильно травляться; слабо травляться; не травляться реактивом Муракамі).

Дослідження здійснювали для таких видів границь: границі, що сильно травляться реактивом Муракамі (згідно з [10] їх товщина становить 0,2–0,5 мкм); границі, що слабо травляться (товщина 0–0,2 мкм); границі, що не травляться і не виявляються реактивом Муракамі (границя лежить у площині зерна, форма якого не задовольняє умови формування форми зерен при їх зростанні (Теорема Вульфа) і їх умовно можна розмежувати).

Результати експерименту та їх обговорення

Характерний вигляд структури твердого сплаву BK28 до та після інденування при навантаженні 200 та 400 г показано на рис.1.

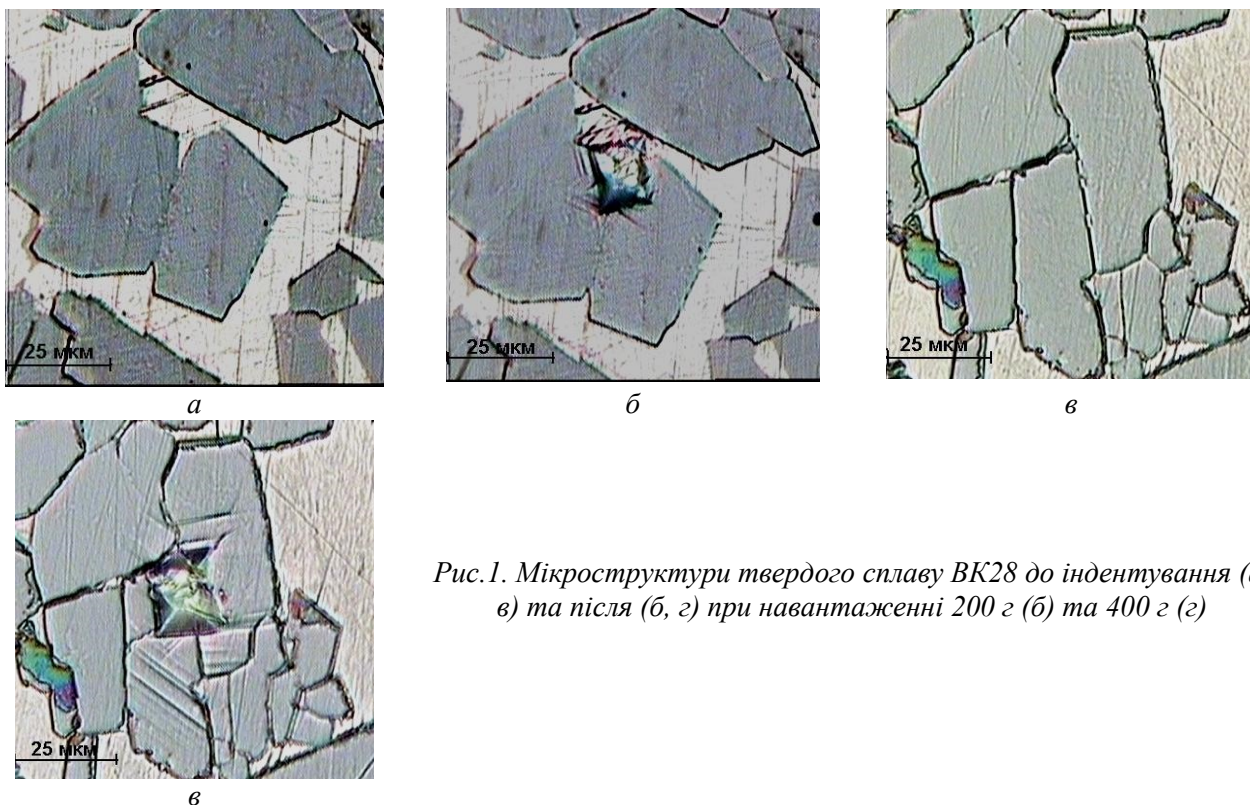


Рис.1. Мікроструктури твердого сплаву BK28 до інденування (а, в) та після (б, г) при навантаженні 200 г (б) та 400 г (г)

Як впливає з рис. 1, б, прикладення навантаження масою 200 г не призводить до змін будови зерен WC та границь WC–WC. Іншими словами, границі у твердому сплаві BK28 доволі міцні й не руйнуються при навантаженні 200 г. У свою чергу, навантаження 400 г суттєво впливає на стан поверхні зерен WC та їх границь.

Мікроструктуру сплаву BK28 до індентування (а, в) та після (б) при навантаженні 400 г зображено на рис. 2.

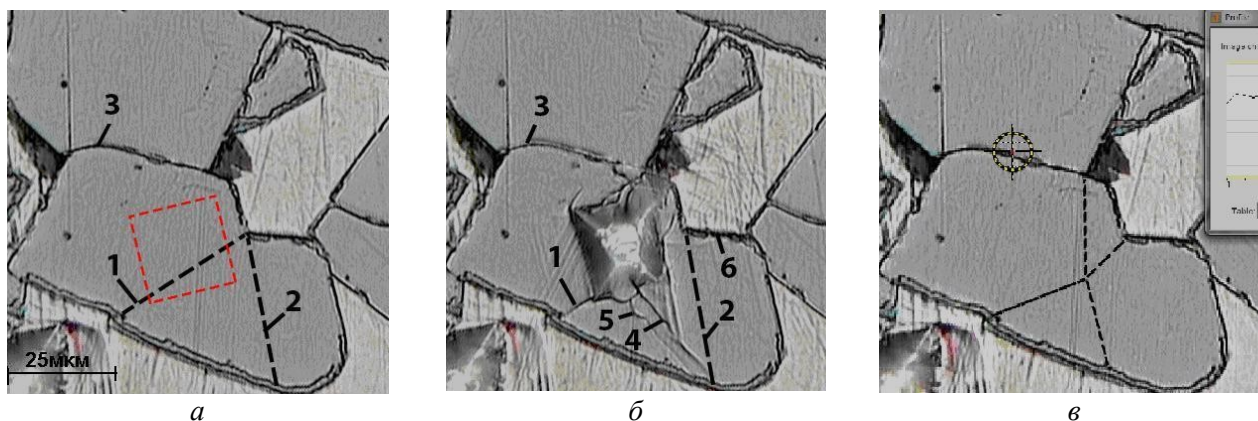


Рис. 2. Мікроструктура сплаву BK28 до (а, в) та після (б) індентування при навантаженні 400 г; 1, 2 – невидимі границі зерен; 3–6 – видимі границі зерен.

На рис. 2, а велике зерно поділено відповідно до теореми Вульфа на кілька випуклих зерен, ідеальними границями (які не травляться) і показано (квадратна область) місце уколу пірамідою Вікерса. Зовнішній вигляд зерна після індентування показано на рис. 2, б. Окрім відбитку піраміди на рис. 2, б помітні лінії ковзання, одна з яких (праворуч) перетворилась на мікротріщину. Це сприяло зниженню напруження на на границі 2 і вона після уколу не виявилась. На границі 1 чітко виявилась мікротріщина (див. рис. 2, а і б). Крім того, з'явилися мікротріщини 4 і 5, а також група мікротріщин близько верхньої вершини відбитка. Можливо, система ідеальних границь WC–WC має вигляд як на рис. 2, в. Проте в першому приближенні можна вважати, що схема на рис. 2, а наближена до реальної. Границі 3 і 6 дещо розширились, але тріщин у них не з'явилось. Слід зазначити, що вихідні границі в частинці WC не розділилися

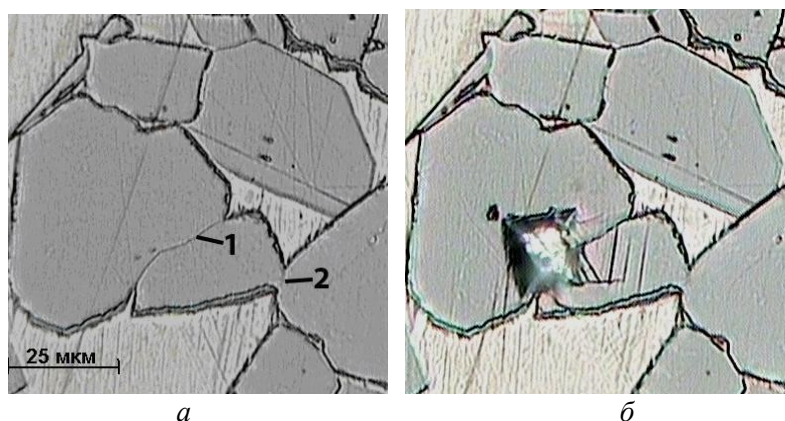


Рис. 3. Мікроструктура сплаву BK28 до індентування (а) та після (б) при навантаженні 400 г; 1, 2 – видимі границі зерен

кобальтовими прошарками, тому можна вважати, що в них $\alpha_{т-т} < 2\alpha_{т-р}$. Проте блоки істотно розорієнтовані, тому границі та блоки сильно травляться. На представлених рисунках границь, що слабо травляться, не виявили. Але вони помітні на іншому скупченні блоків на рис. 3, б.

Мікроструктуру сплаву BK28 з приведеною границею WC–WC, що слабо травиться реактивом Мураками, до індентування показано на рис. 3, а та після (рис. 3, б), при навантаженні 400 г.

На рис. 3, а чітко видно дві границі, що слабо травляться. Укол було нанесено близько границі 1 (рис. 3, б). Чітко видно рівні лінії ковзання біля відбитка. Границя 1 стала виразнішою, проте тріщини ані в зерні, ані на границі 1 не виникли. Границя 2 взагалі не змінилась. Як свідчать

отримані дані, границі, які сильно та слабо травляються, доволі міцні або здатні релаксувати напруження, які в них виникають. Водночас границі, що не травляються реактивом Муракамі, доволі крихкі й руйнуються раніше від інших.

Ділянку мікроструктури твердого сплаву ВК28 із зображенням границь, що сильно травляються реактивом Муракамі, до інденування показано на рис. 4, а, після – на рис. 4, б при навантаженні 400 г.

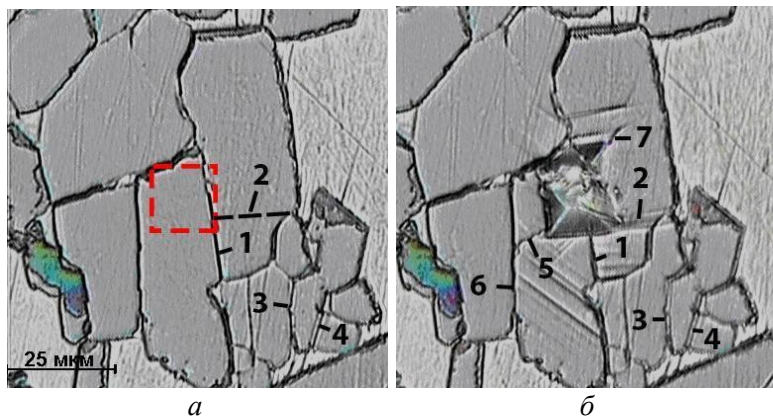


Рис. 4- Мікроструктура сплаву ВК28, до інденування (а) та після (б) при навантаженні 400 г; 2, 7 – невидимі границі; 1, 3, 4, б – видимі границі зерен

На рис. 4, а і б перевірили поведінку границь, що сильно травляються, на іншій частинці WC сплаву ВК28. Як і на рисунку 3, б, на рис. 4, б з'явилися лінії ковзання. Границя 1 не змінилась. Дещо з'явилась ідеальна границя 2. Ширшими стали границі 3 і 4. Інші границі не змінилися. Водночас виникла мікротріщина 5, що проходить через два протилежні кути відбитка прямо по зерну WC. Ця мікротріщина з'явилась в місцях пересічення системою ковзання границі 6 і 3. Вона не проходить по ідеальних границях. Найімовірніше вона виникає в зерні WC через його високу крихкість.

Отже, якщо в зерні WC виникає таке напруження, що лінії ковзання доходять до границь зерен WC, то можуть з'являтися мікротріщини, навіть не пов'язані з наявністю ідеальних границь. Для виключення можливості виявлення мікротріщин необхідно або істотно збільшити зерно, щоб лінії ковзання не доходили до границі, або значно зменшити зерно, щоб лінії ковзання в ньому були короткими і відповідно біля їх вершин не утворювалось значне напруження.

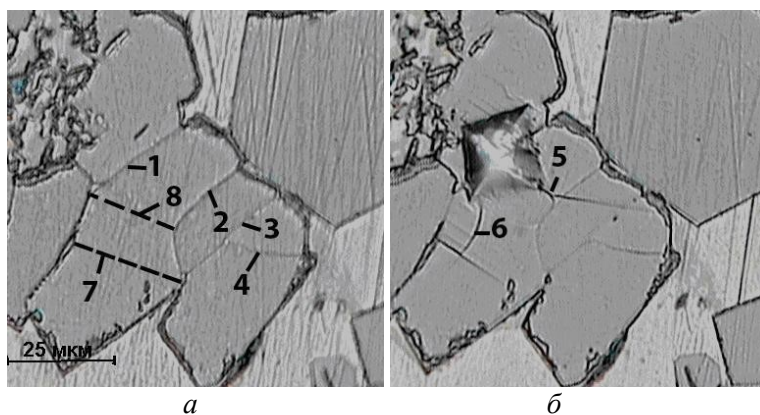


Рис. 5.- Мікроструктура сплаву ВК28 до інденування (а) та після (б) при навантаженні 400 г; 7, 8 – невидимі границі зерен; 1, 2, 3, 4 – видимі границі зерен

На рисунку 5 зображена мікроструктуру сплаву ВК28 до інденування зображено на рис. 5, а, після – на рис. 5, б при навантаженні 400 г. На рис. 5 відбиток нанесено на границі 1, що слабо травляються. Як і в попередніх випадках, руйнування по границі не виявлено. Лише верхня частина границі 1 стала чіткішою. Інші границі, що слабо травляються (2–4), навіть стали менш видимими. Водночас від двох нижніх вершин відбитка з'явилися мікротріщини 5 і 6, які проходять близько ідеальних границь 7 і 8. При зустрічі з границями 2 і 7 поширення мікротріщин 5 і 6 зупинилось. Отже, як ідеальні, так і границі, що слабо травляються, можуть зупиняти поширення мікротріщин.

На рисунку 6 зображена мікроструктура сплаву ВК28, до інденування(а) та після(б), навантаження 400 грам.

На рис. 6 видно, що границя 1, яка слабо травиться, після інденування границі 2 виявилась чіткіше, як границя, що сильно травиться, але мікротріщини в цьому місці не з'явилися. Чіткішою стала й частина границі 2, розміщеної поблизу відбитка. Отже, доходимо висновку, що границі, які слабо і сильно травляються, доволі міцні й можуть деформуватись.

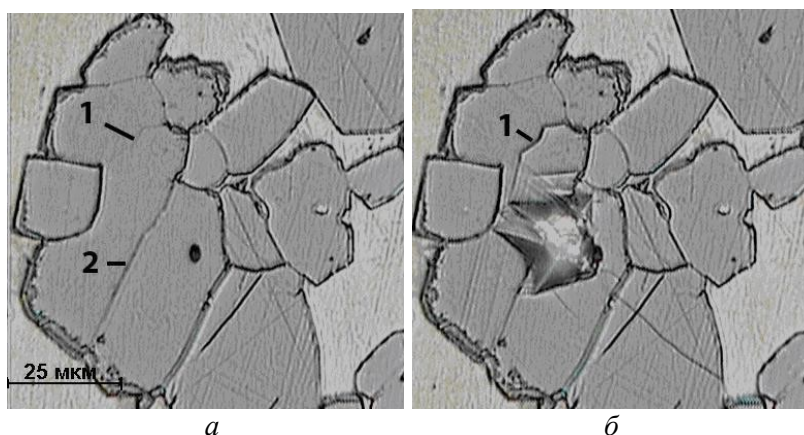


Рис. 6. Мікроструктура сплаву BK28 до індентування (а) та після (б) при навантаженні 400 г; 1, 2 – видимі границі зерен

Мікроструктуру сплаву BK28 до індентування зображено на рис. 7, а, після першого індентування – на рис. 7, б, після другого індентування – на рис. 7, в при навантаженні 400 г.

На рис. 7 продемонстровано вплив двох уколів на границях 1, що доволі об'єктивно повинно бути ідеальною границею. Після першого індентування на зазначеному зерні WC границя 1 не виявилась, але виявились границі 2–4, які належать до

таких, що слабо травляться. Границя 1 виявилась тільки після нанесення другого уколу (рис. 7, в). Водночас границі 2 і 3 не змінились, а границя 4 виявилась доволі істотно. Отримані результати засвідчують, що ідеальні границі доволі міцні й не тріскаються навіть за значного напруження.

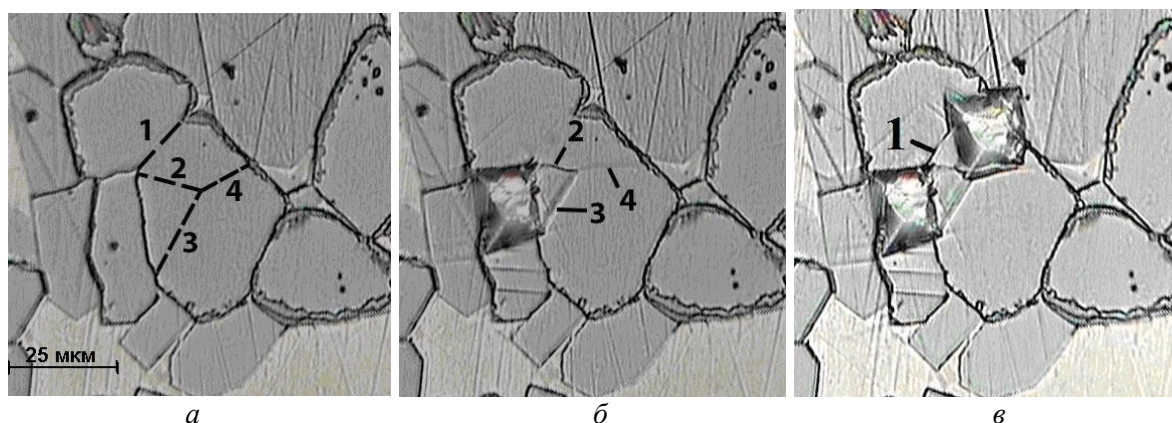


Рис. 7. Мікроструктура сплаву BK28 до індентування (а) та після (б, в) при навантаженні 400 г; 1–4 – невидимі границі зерен

Висновки

Визначено поведінку границь різних типів у сплаві BK28, спеченому за температури 1370 °C при навантаженні під час індентування. Встановлено таке.

1. Границі, що сильно травляться, не реагують на укол пірамідою Віккерса при навантаженні 400 г, а тільки частково змінюються їх ширина і глибина без виникнення мікротріщин, тому що напруження в них можуть релаксувати.

2. Границі, що слабо травляться, після нанесення на них уколом стають чіткішими, але мікротріщини в них не виникають.

3. Границі, що не травляться, мають різну міцність. У результаті одні з них виявляються після першого уколу, інші - тільки після двох уколів, розташованих близько один до одного. Це свідчить про те, що границь, які не травляться, значно більше, ніж можна визначити за теоремою Вульфа.

4. Мікротріщини виникають лише в місцях перетину довгої лінії ковзання з границею, що сильно травиться.

5. Границі, що сильно і слабо травляться, гальмують поширення мікротріщин.

6. Якщо лінії ковзання короткі або не досягають границі зерна, мікротріщини біля їх кінців не виникають.

7. Для виключення можливості виникнення в зерні WC мікротріщин треба збільшувати розміри блоків, щоб лінії ковзання не досягали їх границь, або їх довжина повинна бути меншою, ніж критична.

Определено поведение границ разных типов в спеченном сплаве ВК28 при нагрузке во время индентирования. Применение нагрузки 400 г при индентировании позволило исследовать поведение разных типов границ WC-WC в сплаве. Установлено, что границы WC-WC, которые сильно и слабо травятся реактивом Мураками, тормозят распространение микротрещин в твердом сплаве ВК28. Границы, которые не травятся, имеют разную прочность, в результате чего одни из них проявляются после одного укола, другие только после двух уколов, расположенных близко друг к другу. Это свидетельствует о том, что границ, которые не травятся, значительно больше, чем их можно определить по теореме Вульфа.

Ключевые слова: твердый сплав, границы зерен, нагрузка при индентировании, структура твердого сплава.

In this study, it was determined the behavior of various types of grain boundaries WC-WC in the sintered cemented carbides WC-28% wt. Co after application of the load weighing 400 grams. It has been found that the boundaries WC-WC, which are strongly and weakly etching Murakami's reagent prevents the spread of microcracks in the cemented carbide. The boundaries WC-WC, which are not appear by etching, have different strength. Because some boundaries WC-WC detected after a single injection, others only after two injections, which are located close. These results indicate that the number of boundaries WC-WC that do not appear by etching, much more than they can be determined by the Wulff's theorem.

Key words: cemented carbide, grain boundaries, load under indentation, structure of cemented carbide.

Література

1. Бондаренко В.П. Термокомпрессионная обработка твердых сплавов/ В.П. Бондаренко, Н.М. Прокопий, О.В. Харченко// Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: сб. науч. тр. – К. : ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, ИПЦ «АЛКОН» НАН Украины, 2004. – Вып. 7. – С. 252–256.
2. 2. Лошак М.Г. Прочность и долговечность твердых сплавов/ М.Г. Лошак. – К. : Наук. думка, 1984. – 328 с.
3. Jaensson В.О. Die Untersuchung von Verformungserscheinungen in hochfesten WC-Co-Legierungen mit Hilfe eines neuen Lokalisierungsverfahrens für die Abdruck elektronen microscopie/ В.О. Jaensson// Prakt. Metallogr. – 1972. – 9. – N 11. – S. 624–641.
4. Buss Katharina. High temperature deformation mechanisms of cemented carbides and cermets/ Katharina Buss// These pour lobtention du grade de docteurs sciences; Ecole Polytechnique federal de Lausanne. – 2004.
5. Christensen M. Co-phase penetration of WC(1010)/ WC(1010) grain boundaries from first principles/ M. Christensen, G. Wahnstrom// Phys. Rev. B – 2003. – 67:115415.
6. Christensen M. Strength and Stability of Interfaces in Cemented Carbides/ M. Christensen// Thesis N 2133; Chalm. Univer. Technology. – Gothemburg, Sweden, 2004.
7. Бондаренко В.П. Начала феноменологии процесса формирования карбидного скелета в спеченных твердых сплавах системы WC–Co. Сообщение 1./ В.П. Бондаренко, Н.А. Юрчук, Н.М. Прокопий и др.// Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: сб. науч. тр. – К.: ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2009. – Вып. 12. – С. 375–381.
8. Бондаренко В.П. О перспективах управления состоянием межкарбидных границ в твердых сплавах WC–Co/ В.П. Бондаренко, Н.В. Новиков, И.А. Гнатенко// Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: сб. науч. тр. – К.: ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2010. – Вып. 13. – С. 381–392.
9. Бондаренко В.П. Перспективы управления процессом формирования карбидного скелета в спеченных твердых сплавах системы WC–Co / В.П. Бондаренко, И.А. Гнатенко// Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения : сб. науч. тр. – К.: ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2011. – Вып. 14. – С. 423–437.
10. Пат. України № 108551 на винахід, МПК: G01N 1/26, G01N 1/32, G01 1/04. Спосіб оцінки параметрів мікроструктури твердих сплавів і подібних двофазних матеріалів/ ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України. – Опубл. 12.05.2015, Бюл. № 9. – 11 с.

Надійшла 30.06. 15