

С.А. Клименко, д.т.н., проф.,
С.Ан. Клименко, к.т.н.,
М.Ю. Копейкіна, к.т.н., с.н.с.,
А.С. Манохін, к.т.н.,

Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України

ПОКРИТТЯ ДЛЯ РІЗАЛЬНИХ ІНСТРУМЕНТІВ З ПОЛІКРИСТАЛІЧНИХ НАДТВЕРДИХ КОМПОЗИТІВ НА ОСНОВІ КУБІЧНОГО НІТРИДУ БОРУ

З метою вдосконалення різальних інструментів з полікристалічних надтвердих композитів на основі кубічного нітриду бору (ПКНБ) необхідно створювати покриття, принцип роботи яких ґрунтується на комплексі трибологічних і механо-хімічних ефектів, що обумовлюють здатність покриттів зберігати свою цілісність і властивості під дією високих температур і контактних напружень.

Однією з основних тенденцій у розробки таких покриттів є забезпечення нанорозмірності як структурних елементів, так і окремих шарів в багатошарових композиціях. Формування нанорозмірної структури матеріалу покриттів пов'язано з вибором зернистості, оптимальної за критерієм міцності, виходячи з балансу між залежністю по Холу-Петчу і виразом, що визначає швидкість зернограничної повзучості при зменшенні розміру зерен.

Перспективними, з точки зору застосування на різальних інструментах з ПКНБ, є нанокompозитні покриття. Це обумовлено поєднанням високих значень фізико-механічних властивостей, стійкості до окислення і дисоціації хімічних сполук, що входять до їх складу, внаслідок особливостей структури нанокompозитних плівок.

Набув поширення спосіб створення нанокompозитних покриттів типу $n\text{MeN}/\alpha$ -фаза – вони формуються з нанозерен твердих нітридів перехідних металів з аморфної межкристалітної фазою-матрицею з TiB_2 , Si_3N_4 , BN та інших нітридів неметалів, що утворюють ковалентні зв'язки. Висока твердість таких покриттів обумовлена тим, що через малі розміри нанозерен зароджування і ковзання дислокацій пригнічуються, в той час як висока когезійна міцність тонкої межзереної фази блокує зернограничне ковзання. Аморфна складова при цьому здатна найкращим чином узгоджуватися з поверхнею нанокристалів і забезпечує гарне зчеплення, що призводить до суттєвого підвищення міцності у системі основа-покриття. Такі покриття мають незвичайну комбінацію механічних властивостей: – висока (40–100 ГПа) твердість; – високе (80–94%) пружне відновлення; – граничні (> 10%) пружні напруження; – висока (від 10 до більш ніж 40 ГПа) міцність на розтягнення, близька до ідеальної міцності для непластичних матеріалів. Більш того, наноструктура і відповідний їй надтвердий стан може залишатися стабільними при температурах, які перевищують 1100 °С.

Оцінка значень контактних навантажень на різальних інструментах з ПКНБ показує, що середні нормальні та дотичні контактні напруги при обробці сталей високої твердості досягають значень до 2500 і 1100 МПа відповідно. Знизити величину навантажень можна, якщо конструкція покриття буде включати верхній шар, що виконує функції приробки. Основною вимогою до такого прошарку є поєднання пластичності і міцності, при тому що твердість його може бути істотно нижче, ніж твердість основного масиву матеріалу покриття.

Матеріал шару приробки повинен мати аморфно-кристалічну низькомодульну структуру ($\alpha\text{-BN}$, $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ або $\alpha\text{-TiB}_2$), що дозволить йому виконувати роль твердого змащення.

Термостійкість є другою за значимістю вимогою, що пред'являються до покриттів на інструментах з ПКНБ. Найбільш термостійкими є покриття, що містять алюміній і хром. Оксидна плівка, яка утворюється на поверхні, захищає основний масив матеріалу покриття від окислення аж до температури 850 °С. Подібно механічним властивостям, термостійкість покриття також значною мірою визначається не тільки його хімічним складом, а й структурою. Зокрема, нанокompозитні системи типу $n\text{MeN}/\alpha$ -фаза характеризуються підвищеною термостійкістю.

Логічним продовженням концепції структурно зумовленої термостійкості є наступний підхід. Зерна, в тому числі і нанорозмірні, з яких складається масив покриття, контактують з вільною поверхнею і границі зерен є провідниками для кисню, обумовлюючи окислювальні процеси у всьому обсязі покриття. В якості методу підвищення термостійкості покриття пропонується використовувати інтергранулярну склоподібну фазу, формування якої можна забезпечити в нанокompозитах, наприклад, шляхом збільшення (> 40%) вмісту кремнію і, відповідно, фази $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$. При концентрації кремнію більше 50% структура покриття аморфна і аж до температури 1300 °С окислюється виключно тонкий поверхневий шар покриття без будь-яких змін в його об'ємі.

Інший механізм підвищення стійкості інструментів з ПКНБ реалізується при використанні «самоадаптивних» покриттів. Основна ідея полягає не в запобіганні окисленню, а в використанні цього явища для управління параметрами контактної взаємодії при різанні та зниження коефіцієнту тертя і, отже, термобаричного навантаження в зоні контакту. Подібні покриття в процесі різання окислюються, утворюючи поліоксидну вторинну структуру (трібоплівку), що виграє роль твердого змащення. Наприклад,

при точінні інструментом з покриттям AlN-Ti(Cr)B_2 на його поверхні формується поліоксидна трібоплівка, що включає Al_2O_3 , Fe_2O_3 і оксинітрид алюмінію $\text{Al}_x\text{O}_y\text{N}_z$. Дані сполуки мають термостабільність до $1300\text{ }^\circ\text{C}$, крім того в таких системах утворюються гомогенні ряди твердих розчинів оксидів, що мають гарну змащувальну здатність. Дослідження елементного складу покриття після обробки різанням показали, що на глибині 70 нм має місце різке збільшення кількості кисню і, таким чином, зовнішній нанорозмірний шар інтенсивно окислюється, переходячи в продукти зносу, і знову окислюється. При цьому в шарі, розташованому на глибині від 30 до 70 нм , утворюються обмежені тверді розчини на основі Al_2O_3 (системи $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-AlN}$).

Подальший розвиток такого підходу може бути пов'язаний зі створенням систем, що містять SiC і AlN , які є хімічно стабільними при температурах понад $1300\text{ }^\circ\text{C}$.

Розроблено концепцію підвищення стійкості різальних інструментів з ПКНБ, яка базується на зменшенні температури в контактній зоні різання при нанесенні на робочі поверхні інструменту покриття, що зменшує коефіцієнт тертя. Таким покриттям може бути плівка з BN . Основною відмінністю цього покриття є його аморфно-кристалічний структурний стан і близькість за хімічним складом до матеріалу основи. Ефект досягається за рахунок: – зниження твердості в порівнянні з інструментальною основою, що зменшує внутрішні залишкові напруження в покритті і знижує крихкість його матеріалу; – зменшення модуля Юнга, що підвищує пружні властивості покриття і стійкість до абразивного стирання; – зниження коефіцієнта тертя, що сприяє зменшенню термобаричного навантаження на робочих ділянках інструменту. Випробування, проведені на машині тертя, показали зниження коефіцієнта тертя від $0,4$ до $0,3$ в діапазоні швидкостей відносного переміщення $75\text{--}90\text{ м/хв}$.

Ще одним підходом до підвищення стійкості інструменту, в якому явно проявляється ідея використання покриття як проміжного середовища, що надає прямий вплив на параметри процесу різання, є введення до складу покриття компонентів, які є інгібіторами протікання хімічних реакцій в зоні контактної взаємодії інструментального композиту з оброблюваним матеріалом. Пригнічуючи хімічно обумовлений механізм зношування різальних інструментів з ПКНБ, такі покриття збільшують їх стійкість при високошвидкісному різанні або при обробці конструкційних матеріалів, компоненти яких виявляють високу хімічну активність в парі з нітридом бору.

На основі аналізу результатів значної кількості досліджень механізму впливу покриттів на зношування інструментів з ПКНБ можна виділити кілька взаємопов'язаних підходів для їх створення: – вибір структурних складових покриття, які в процесі обробки різанням забезпечують формування на робочих поверхнях інструменту високотемпературних поліоксидних трібоплівок, що грають роль твердого змащення і ефективно знижують інтенсивність зношування інструменту; – введення до складу покриття сполук, що є інгібіторами реакцій хімічної взаємодії та дозволяють зрушити початок активної хімічної взаємодії в зоні обробки в діапазон більш високих швидкостей різання; – зниження коефіцієнта тертя і контактних навантажень на робочих ділянках інструменту за рахунок твердого змащення і шару покриття з функцією приробки; – забезпечення необхідного структурного стану покриття.