

20. Zhou W., Chen G., Duan S., et al. (2025). Laser efficient truing and rotary precision dressing of concave-surface coarse-grained diamond grinding tools. *Journal of Materials Processing Technology*, 337, 118726.

УДК 519.688:536.2

DOI: 10.33839/2708-731X-28-1-329-339

О. О. Матвійчук¹, Н. В. Литошенко¹, кандидати технічних наук, **В. І. Шеремет²**

¹*Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України,
вул. Автозаводська, 2, 04074 м. Київ, Україна, e-mail: lytnat@ukr.net*

²*Інститут матеріалознавства та зварюванням. Є. О. Патона, НТУУ «КПІ»
вул. Політехнічна, 35, навчальний корпус 9, 03056, Київ, Україна*

ЗАЛИШКОВІ ТЕРМІЧНІ НАПРУЖЕННЯ В БАГАТОШАРОВИХ ФУНКЦІОНАЛЬНО ГРАДІЄНТНИХ СПЛАВАХ WC–Co

Завдання наукового дослідження полягає в тому, щоб оцінити рівень залишкових термічних напружень методом математичного моделювання в сплаві з тришаровою структурою WC–30%Co–TiC–WC–30%Co (об'ємних відсотків) та мікроградієнтом кобальта на границях шарів, а також розробити технологічні рекомендації для уникнення формозміни багатошарового композиту.

Встановлено, що величина залишкових термічних напружень першого і другого роду суттєво залежить від структурних і технологічних параметрів багатошарових градієнтних твердих сплавів.

Ключові слова: залишкові термічні напруження, багатошарові функціонально градієнтні тверді сплави WC–Co, мікроструктурні параметри, метод математичного моделювання.

Вступ

Функціонально градієнтні матеріали є унікальними, оскільки забезпечують високу твердість і в'язкість руйнування завдяки поєднанню різних мікроструктур та властивостей у приповерхневому шарі та в об'ємі твердосплавного виробу [1]. Серед найбільш поширених підходів до отримання градієнтних твердих сплавів використовуються такі: створення вільного від γ -фази (кубічних карбонітридів) чи збагаченого нею приповерхневого шару, використання карбідів подвійних властивостей, моделювання двошарових твердих сплавів WC–Co чи макроградієнтних WC–Co завдяки міграції Co. Створені в такий спосіб композити знайшли застосування в різних видах інструменту. Серед них ударні свердла з двошаровою градієнтною твердосплавною головкою, які виготовляються фірмою Ceratizit шляхом пресування та спікання двох градуйованих порошків. Вставки для ударного свердління з функціонально градієнтних твердих сплавів WC–Co, отриманих за технологією, розробленою та впровадженою в Element Six Group, використовуються для покращення продуктивності і збільшення терміну служби інструменту. Інші типи промислових композитів, які позначаються в літературі як «марки DP», та GC80 були розроблені та запатентовані фірмою Sandvik для виробництва твердосплавного інструменту. Сійкі до зносу зовні та жорсткі у центрі бури використовуються при ударному бурінні для видобутку корисних копалин. Технологія, розроблена і впроваджена в університеті Юти, широко використовується при виготовленні вкладишів для гірничого інструменту та бурових доліт для буріння нафти і газу.

Сучасні публікації про багатошарові чи градієнтні тверді сплави WC–Co охоплюють дослідження їх структури, методів виготовлення, механічних властивостей та застосувань. Вплив складу кубічного карбїду (TiC, TaC, NbC) і технологічних параметрів (спікання в рідкій фазі, спікання в твердому стані) на формування зносостійких поверхонь, багатих γ -фазою, в цементованих карбїдах було досліджено в [2]. Встановлено, що формування зносостійких поверхневих шарів залежить від співвідношення TiC/(Ta,Nb)C, часу спікання, температури і атмосфери спікання. Товщина і морфологія градуйованих шарів залежить від температури обробки. Зразки, азотовані за температур рідкої фази демонстрували вищу шорсткість, ніж зразки, азотовані у твердому стані. Товщина γ -багатої зовнішньої поверхні збільшується з додаванням Fe до зв'язуючих фаз з Co та Ni [3].

В [4] автори детально розглянули явище міграції рідкої фази в двошарових цементованих карбїдах, яка спостерігається за певних умов, коли два різномірних сплави WC–Co з'єднуються. Встановлено, що розмір зерна WC і вміст вуглецю впливають на розподіл рідкої фази під час спікання. Крім того, початковий вміст Co і, таким чином, частка рідкої сполучної фази в кожній з двох половин також є причиною, що зумовлює перерозподіл зв'язуючої фази. Ці фактори важливо враховувати, щоб зберегти або уникнути градієнта, залежно від функціонального призначення композиту. Встановлено, що міграція рідкої фази та градієнти, що не контролюються належним чином, можуть не тільки змінити властивості обох складових двошарового матеріалу, але й мати шкідливий вплив на інтерфейс та викликати деформування його частин.

Автори [4] розробили емпіричну модель фазової міграції на основі параметризованого розміру зерна WC, об'ємного вмісту рідкої фази та вуглецю, та дійшли висновку, що виробництво двошарових цементованих карбїдів з великою різницею в розмірі частинок WC та/або у вмісті сполучного вимагає точного контролю параметрів процесу спікання. Спотворення форми, які можуть виникнути через різницю в усадці під час спікання в рідкій фазі двошарових композитів WC–Co можна уникнути шляхом регулювання вмісту зв'язуючої фази, температури і часу спікання.

Відомо, що величина залишкових термічних напружень є одним з найбільш важливих факторів, що впливає на фізико-механічні властивості багатошарових твердих сплавів WC–Co таких як: міцність, в'язкість руйнування, зносостійкість. Значення цих напружень можна встановити експериментально або за допомогою аналітичних чи числових розв'язків модельних задач. Вимірювання залишкових термічних напружень у багатошарових твердих сплавах WC–Co з градієнтною структурою потребує спеціалізованих методів, враховуючи їхню складну мікроструктуру та неоднорідність. Отже, метою роботи є визначення залишкових термічних напружень другого роду методом математичного моделювання в сплаві з тришаровою структурою WC–30%Co–TiC–WC–30%Co (об'ємних відсотків) та мікроградієнтом кобальта на границях шарів, а також розробка технологічних рекомендацій для зменшення внутрішніх напружень та уникнення формозміни багатошарового композиту.

Експериментальні та теоретичні методи визначення залишкових термічних напружень в сплавах WC–Co з градієнтною структурою

У твердих сплавах WC–Co напруження першого роду пов'язані з технологічними процесами та мають макроскопічний характер, тоді як напруження другого роду є наслідком різниці термомеханічних властивостей фаз і визначають мікромеханічну поведінку композиту. Обидва типи критично важливі для прогнозування довговічності та функціональності матеріалів у таких застосуваннях як різальні інструменти або бурові наконечники.

Напруження першого роду діють у макромасштабі, тобто на рівні всього компонента або його великих ділянок. Вони виникають через нерівномірне охолодження після спікання, механічної обробки або термічного циклу. Прикладом є випадок, коли поверхня твёрдосплавного виробу охолоджується швидше ніж його внутрішня частина, створюючи напруження розтягу на поверхні та напруження стиску всередині. Рівень термічних макронапружень впливає на міцність твёрдосплавного виробу вцілому, тобто сприяє тріщиноутворенню при механічному навантаженні, а також викликає деформацію або руйнування деталі під час експлуатації. Для зменшення макронапружень проводять оптимізацію технології, застосовуючи контроль швидкості нагріву, рівномірне охолодження, термічну обробку (відпал).

Напруження другого роду (мікроскопічні) є локальними напруженнями, що виникають в композиті WC–Co між фазами через суттєву різницю коефіцієнтів теплового розширення $\alpha_{WC} \sim 5.2 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, а $\alpha_{Co} \sim 13.8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Під час охолодження після спікання матриця Co стискається сильніше, ніж карбідний скелет WC, що призводить до стискання зерен WC через опір деформації та розтягування Co-матриці через обмеження її стиснення. Термічні мікронапруження суттєво впливають на властивості матеріалу, а саме: міцність, в'язкість руйнування, зносостійкість, мікротвердість, опір втомі. Стискаючі напруження в WC підвищують його стійкість до крихкого руйнування, а розтягуючі в кобальтовій фазі можуть сприяти пластичній деформації матриці. Для контролю рівня мікронапружень регулюють склад сплаву, змінюючи вміст і якість зв'язуючої фази, застосовують нанотехнології, вводячи добавки (наприклад, Cr або VC) для зменшення розміру зерен WC та покращення сумісності фаз. Дрібні зерна (~1 мкм) створюють більш рівномірний розподіл напружень, а крупні зерна (>3 мкм) концентрують напруження на межі фаз.

Для оцінки рівня залишкових термічних напружень використовують наступні методи вимірювання. Напруження першого роду визначають: методом рентгенівської дифракції (XRD), що дозволяє провести аналіз приповерхневих напружень; нейтронною дифракцією для вимірювання напружень у об'ємі матеріалу; методом свердлування (Hole-Drilling) для встановлення релаксації напружень. Для визначення термічних напружень другого роду застосовують метод високороздільної XRD або синхротронного випромінювання для аналізу локальних деформацій у фазах; електронну мікроскопію з EBSD, що дозволяє картування напружень у мікромасштабі.

Вимірювання залишкових термічних напружень у твердих сплавах WC–Co з градієнтною структурою потребує спеціалізованих методів, враховуючи їхню складну мікроструктуру та неоднорідність. Основні підходи, що застосовуються сучасними дослідниками, полягають в наступному.

1. Рентгенівська дифракція (XRD) забезпечує вимірювання зсуву дифракційних піків, що виникає через деформацію кристалічної ґратки. Для WC–Co аналізують окремо напруження в фазі WC та кобальтовій зв'язці, оскільки вони мають різні коефіцієнти теплового розширення. Для градієнтних структур використовують послідовне шліфування або травлення поверхні з подальшим XRD-аналізом кожного шару. Метод забезпечує високу точність та локальний аналіз, хоча недоліком має обмежену глибину проникнення рентгенівських променів (до 10–50 мкм).

2. Нейтронна дифракція має принцип аналогічний XRD, але нейтрони проникають на глибину до кількох сантиметрів. Застосування цього методу є ідеальним для аналізу об'ємних напружень у градієнтних структурах без руйнування зразка в глибинних шарах. Однак потрібен доступ до реактора або джерела нейтронів.

3. Електронна мікроскопія з *EBSD* (*Electron Backscatter Diffraction*) визначає локальні деформації через аналіз орієнтації кристалітів. Метод застосовується для картування напружень на мікрорівні в WC і Co окремо і є особливо ефективним для аналізу градієнтних зон зі змінним вмістом Co. Його перевагою є висока просторова роздільна здатність (до нанометрів).

4. Метод свердлування (*Hole-Drilling*) заснований на вимірюванні релаксації напружень після створення мікросвердловини. Він використовується для визначення напружень у приповерхневих шарах. Через високу твердість сплавів WC–Co необхідно використовувати спеціальне обладнання. Руйнування зразка та обмежена точність вимірювання для градієнтних структур є також недоліками цього підходу.

5. Синхротронне рентгенівське випромінювання, принцип якого полягає в тому, що високоінтенсивні рентгенівські промені дозволяють аналізувати напруження на різних глибинах. Метод дозволяє провести детальний аналіз градієнтних напружень з розділенням по фазах.

6. Термомеханічне моделювання полягає в розрахунку залишкових термічних напружень під час охолодження після спікання в поєднанні з експериментальними даними для калібрування, тобто використання еталонних зразків з відомим градієнтом для верифікації розрахункових алгоритмів.

Отже, специфікою дослідження залишкових термічних напружень багатшарових градієнтних сплавів WC–Co є поєднання механічного чи хімічного видалення шарів з методами *XRD* або *EBSD*, необхідність враховувати розподіл Co, розмір зерен WC та товщини градієнтних зон. Вважається оптимальним поєднання рентгенівської або нейтронної дифракції для об'ємного аналізу з *EBSD* для мікромасштабних напружень. Синхротронні методи дозволяють отримати найдетальніші дані, але вимагають спеціалізованих установок. Експериментальна валідація – процес перевірки теоретичних моделей, розрахунків або прогнозів за допомогою експериментальних даних, що дозволяє оцінити, наскільки точно розроблена скінчено-елементна або аналітична модель відображає реальну поведінку матеріалу або системи. У контексті дослідження залишкових термічних напружень у WC–Co з градієнтною структурою експериментальна валідація є критично важливою для підтвердження достовірності результатів моделювання.

Розрахунок залишкових термічних напружень у твердих сплавах WC–Co з градієнтною структурою базується на аналізі термомеханічних ефектів, що виникають під час охолодження після спікання, через різницю коефіцієнтів теплового розширення (КТР) карбідної фази (WC) і кобальтової матриці (Co). Для градієнтних структур враховують зміну складу (наприклад, вмісту Co) по глибині, що призводить до неоднорідного розподілу напружень. Основні етапи розрахунку полягають в наступному: 1) визначення термомеханічних параметрів (коефіцієнтів теплового розширення, компонентів, пружних властивостей, функціональної залежності зміни структурних параметрів від глибини); 2) моделювання напружень у градієнтному шарі (розділення структури на тонкі шари зі сталими ефективними модулями, визначення термічної деформації і механічних напружень); 3) використання скінчено-елементного аналізу (створення 3-D моделі, температурного поля, що імітує процес охолодження, враховуючи анізотропні властивості WC), отримання результатів (розподіл напружень у фазах, максимальні напруження в зонах різкого градієнту); 4) застосування мікромеханічних моделей (модель Ешелбі для розрахунку напружень в окремих зернах, оточених матрицею, самоузгоджена схема для врахування взаємодії фаз); 5) валідація експериментальними методами (порівняння з даними рентгенівської або нейтронної дифракції, корекція моделі на основі картування локальних деформацій).

Отже, розрахунок залишкових напружень у WC-Co з градієнтом вимагає поєднання аналітичних моделей для швидкої оцінки, скінчено-елементного моделювання для врахування складних градієнтів, експериментальної валідації для точного прогнозування напружень у критичних зонах (наприклад, на межі шарів з високим і низьким вмістом Co).

Визначення залишкових термічних напружень в сплаві WC-30%Co-TiC-WC-30%Co методом математичного моделювання

Зважаючи на викладене вище, було проведено математичне моделювання з метою визначення рівня залишкових термічних напружень другого роду в тришаровому композиті WC-30%Co-TiC-WC-30%Co. Для розрахунків застосовували різні схеми модельних задач термопружності.

Для початку розглянемо кулю з TiC, що розташована в сплаві WC-30%Co. При цьому зв'язок між TiC та твердим сплавом передбачається жорстким. Напружено-деформований стан

в задачі описується рівнянням $\frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} (r^2 u) \right] = 0$, а його розв'язок $u = Ar + B \frac{1}{r^2}$.

Враховуючи виконання контактних умов, а також гідростатичний напружений стан, отримуємо вираз для тиску, що відчуває TiC з боку сплаву WC-30%Co при охолодженні після спікання

$\sigma_{TiC} = \frac{12 K_{TiC} \mu_{WC-Co} t (\alpha_{WC-Co} - \alpha_{TiC})}{3 K_{TiC} + 4 \mu_{WC-Co}}$ [5]. Тут модуль об'ємного стиску карбіда титана

$K_{TiC} = 234$ ГПа, модуль зсуву твердого сплаву WC-30%Co $\mu_{WC-Co} = 198$ ГПа, коефіцієнти теплового розширення $\alpha_{WC-Co} = 7,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ і $\alpha_{TiC} = 7,95 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, різниця між кімнатною температурою і температурою, за якої припиняється релаксація залишкових термічних напружень під час охолодження після спікання $t = -700$. Отже, в результаті розрахунків отримали значення залишкових термічних напружень в карбіді титану $\sigma_{TiC} = 110$ МПа. Як видно, ці напруження є розтягуючими. Для порівняння в сплаві WC-30%Co середні по фазах залишкові термічні мікронапруження складають $\sigma_{WC} = -561$ МПа і $\sigma_{Co} = 1309$ МПа.

Для розрахунку залишкових термонапружень, що виникають на границі двох різних матеріалів, скористаємося також формулою класичної теорії термопружності $\sigma = E \times (\alpha_1 - \alpha_2) \times (T_1 - T_2) / (1 - \nu)$. Тут σ – термічні напруження другого роду, E – усереднений модуль пружності (модуль Юнга) двох матеріалів, α_1, α_2 – коефіцієнти теплового розширення матеріалів, T_1, T_2 – початкова і кінцева температури, ν – усереднений коефіцієнт Пуассона. Ця формула заснована на моделі плоско-паралельного з'єднання двох матеріалів з різними коефіцієнтами теплового розширення (біматеріальної пластини або інтерфейсу) і припускає ідеальне з'єднання двох тіл з різними фізико-механічними властивостями [6]. Отже, при охолодженні від 1000 К до 300 К на границі між карбідом титану TiC і твердим сплавом WC-30об.%Co виникнуть розтягуючі термічні напруження, значення яких становить 189,5 МПа.

Застосуємо модель багатошарової плити з урахуванням різних товщин шарів для розрахунку термічних залишкових напружень в тришаровому сплаві WC-30%Co(2 мм)→TiC(1 мм)→WC-30%Co (2 мм). Оскільки структура симетрична відносно середньої площини, вона не має зазнавати вигину. Для такої системи термічні напруження на границях між шарами можна розрахувати за модифікованою формулою $\sigma_i = E_i \times (\alpha_i - \alpha) \times (T_1 - T_2) / (1 - \nu_i)$, де σ_i – напруження в i-му шарі, α – ефективний коефіцієнт теплового розширення всієї структури [7]. В результаті середні стискаючі напруження в шарах WC-30%Co складають -41,3 МПа, а розтягуючі в TiC – 163,7 МПа. На границях між шарами композита виникає різниця напружень 205 МПа. Для аналізу деформацій та можливої формозміни тришарової структури WC-30%Co

(2 мм) → TiC (1 мм) → WC–30%Co (2 мм) проведемо детальніший аналіз. Для симетричної тришарової структури сумарна деформація для шару WC–30%Co складає $5,17 \times 10^{-3}$, а для TiC – $5,93 \times 10^{-3}$. Зразок зменшиться в розмірах на ~0,531% у всіх напрямках через термічне стискання. На кутах та краях зразка можуть виникати локальні концентрації напружень. Ці концентрації можуть бути в 2-3 рази вищими за розраховані середні значення. Різкий перепад напружень на границях (205 МПа) може призвести до: появи мікротріщин на інтерфейсах, відшарування TiC від WC–30%Co при перевищенні міцності адгезійного зв'язку, пластичної деформації в зоні з високими напруженнями, особливо в TiC. Якщо охолодження відбувається нерівномірно, можливий тимчасовий вигин зразка. Критичними факторами, що можуть призвести до формозміни, є наступні: асиметрія товщин шарів (якщо вона є), градієнти температури під час охолодження, різні швидкості охолодження різних частин зразка, дефекти на границях (пори, включення, неоднорідності).

Для оцінки стійкості структури потрібно порівняти отримані напруження з критичними: Для шару TiC (міцність на розтяг карбіду титану становить 300-400МПа) отримані напруження (163,7 МПа) складають ~40-55% від критичних, отже, запас міцності є достатнім, але не надмірним. Для шару WC–30%Co (міцність на стиск твердого сплаву – 3000-4000МПа) ці напруження (-41,3 МПа) є незначними порівняно з критичними, тобто запас міцності є високим. Для границі розділу (міцність адгезійного зв'язку залежить від технології виготовлення і має значення 100-300МПа) напруження на границі (205 МПа) можуть бути критичними, якщо міцність зв'язку недостатня. Таким чином, формозміна симетричного зразка малоімовірна, але існує ризик порушення цілісності на границях розділу матеріалів через високі термічні напруження, особливо за наявності дефектів або при циклічних теплових навантаженнях.

Розглянемо, як зменшення товщини середнього шару TiC з 1 мм до 0,5 мм при збереженні товщини зовнішніх шарів (2 мм) змінить розподіл напружень у системі. Як свідчать розрахунки, стискаючі напруження в WC–30%Co зменшаться в 2,3 рази (з -41,3 до -18,3 МПа), розтягуючі напруження в TiC збільшаться на 12,2% (з 163,7 до 183,6 МПа), а напруження на границі незначно зменшаться на 1,5% (з 205,0 до 201,9 МПа). Тонший шар TiC буде зазнавати більшого напруження, що підвищує ризик утворення мікротріщин у TiC. Співвідношення напружень до міцності матеріалу для TiC збільшилось з ~45% до ~50-60%. Напруження на границях є високими (~202 МПа), тому ризик відшарування залишається на попередньому рівні. Товщина середнього шару також впливає на концентрацію напружень біля країв. Кути та краї зразка залишаються найбільш критичними зонами, в яких можливе локальне відшарування через концентрацію напружень. Однак, зі зменшенням товщини TiC тришарова система стає менш чутливою до градієнтів температури, оскільки тонший середній шар дозволяє швидше вирівнювати температуру по його товщині.

Загалом зменшення товщини середнього шару TiC з 1 мм до 0,5 мм призводить до: суттєвого зниження стискаючих напружень у зовнішніх шарах WC–30%Co, помітного збільшення розтягуючих напружень у середньому шарі TiC, практично незмінного рівня напружень на границях між шарами. Хоча загальна формозміна зразка залишається мінімальною через збереження симетрії, зміна товщини середнього шару змінює баланс напружень у системі, що може впливати на довговічність та надійність виробу при циклічних термічних навантаженнях. Тонший шар TiC потенційно більш вразливий до руйнування через підвищені розтягуючі напруження.

Цікавим є також аналіз зміни напруженого стану і формозміни тришарового зразка при заміні TiC на TiC–1%Co. Що стосується загального напруженого стану, то спостерігається суттєве збільшення напружень розтягу у середньому шарі, яке становить ~33% порівняно з

чистим TiC тієї ж товщини (з 183,6 МПа до 244,0 МПа). Збільшення стискаючих напружень у шарах WC–30%Co з -18,3 МПа до -32,1 МПа (на ~75%) залишаються відносно безпечними через високу міцність на стиск WC–30%Co. Значне збільшення градієнту напружень на границі між шарами від 201,9 МПа до 276,1 МПа (на 37%) підвищує ризик розшарування та руйнування на інтерфейсах. Формозміна зразка може мати місце. Теоретична зміна лінійних розмірів складатиме ~0,53% (порівняно з ~0,527% для чистого TiC). Більші градієнти напружень роблять систему вразливішою до тимчасової формозміни при нерівномірному охолодженні. Критичні аспекти для цілісності структури полягають в наступному. Напруження 244 МПа становлять ~60-80% від міцності на розтяг карбіду титану, це може призвести до руйнування середнього шару. Додавання Co зазвичай дещо підвищує в'язкість руйнування, але може знизити міцність на розтяг. Високі напруження (276,1 МПа) на границях можуть перевищувати міцність адгезійного зв'язку, це особливо критично для кутів та крайових зон, де можуть виникати додаткові концентрації напружень. Підвищений ризик відшарування викликаний тим, що градієнт напружень на 37% вищий, ніж у випадку з чистим TiC. Цілісність з'єднання шарів залежить від технології виготовлення та якості границі.

Встановлено, що заміна чистого TiC на TiC–1%Co в середньому шарі тришарової структури призводить до суттєвого збільшення термічних напружень як у самому шарі, так і на границях з WC–30%Co. Хоча симетрична форма структури запобігає загальній формозміні зразка при рівномірному охолодженні, значно підвищується ризик мікроруйнувань на границях і в середньому шарі. Критично важливим стає технологія виготовлення такої структури, особливо якість границь між шарами. При правильній технології спікання та поступовому охолодженні додавання Co може покращити загальну механічну стабільність системи, незважаючи на підвищення термічних напружень, завдяки покращенню в'язкості руйнування та міцності адгезійного зв'язку.

Методика виготовлення та результати дослідження зразків із тришаровою структурою WC–30%Co–TiC–WC–30%Co та мікроградієнт-том на границях шарів

Для формування зразка WC–30%Co–TiC–WC–30%Co з тришаровою структурою кожен з шарів спочатку пресували окремо, а потім всі шари збирали в один пакет та здійснювали остаточне пресування (рис. 1).



Рис. 1. Розміщення шарів тришарового композиту WC–30%Co–TiC–WC–30%Co в прес-формі

Пресування кожного шару проводили з урахуванням усадки під час спікання і охолодження для отримання заданих розмірів зразка. Наважку порошків WC–30%Co і TiC підбирали таким чином, щоб проміжний шар мав товщину 1 мм. Для сплаву WC–30%Co

наважка шару складала 7,5 грамів, а для шару з TiC – 1,35 грамів. На рис. 2 представлено результат пресування штапиків та таблеток з утвореними шарами. Спикання проводилося у вакуумі за температури 1370°C протягом 20 хвилин. За таких умов об'ємна частка рідкої фази у сплаві WC-30%Co становила 41,9 %, що більше ніж достатньо для просочування шару TiC завдяки капілярним силам.

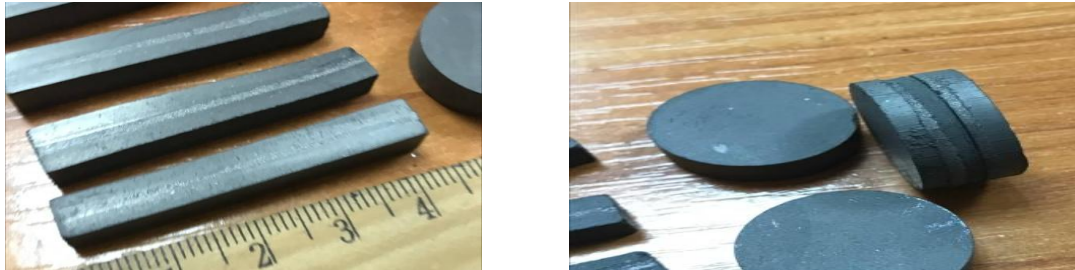


Рис. 2. Твердославні пресовки з тришаровою структурою композиту WC-30%Co-TiC-WC-30%Co

В результаті спикання відбувся процес формозміни двох видів зразків (рис. 3). Як видно на рис. 3, всі зразки зазнали суттєвої деформації: вони роздвоїлися та вигнулися в різні боки, а проміжний шар розірвався навпіл. Крім того, на зразках у формі таблетки утворилася характерне заглиблення по центру, це свідчить про те, що процес просочення карбіду титану кобальтом дійсно відбувався (рис. 4).

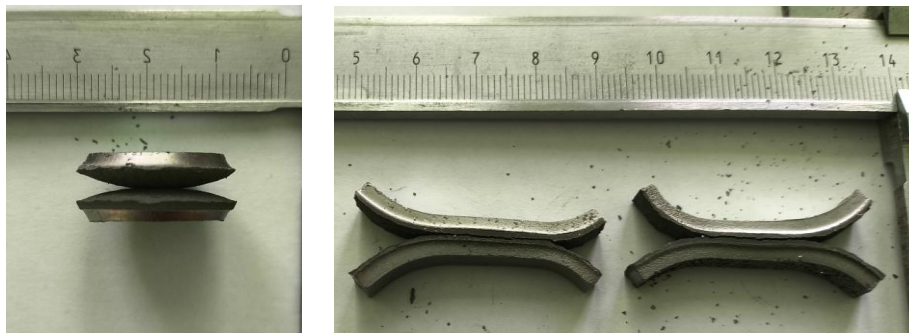


Рис. 3. Формозміннені багатошарові WC-30%Co-TiC-WC-30%Co зразки після спикання за температури 1370°C протягом 20 хв

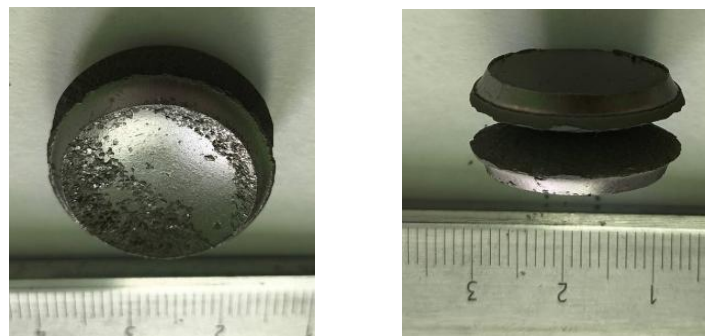


Рис. 4. Спечені сплави WC-30%Co-TiC-WC-30%Co у формі таблеток з характерним заглибленням по центру

На рис. 5 зображено багат шаровий сплав, в якому ще додано один шар TiC і один шар WC–30%Co. Таким чином, спечена таблетка має п'ять шарів.



Рис. 5. Спечені сплави WC–30%Co–TiC–WC–30%Co у формі таблеток з п'ятьма шарами.

Як видно, усадка відбувалася значно швидше, ніж процес просочення. Отже, через значний об'єм рідкої фази усадка може початися практично миттєво, у той час як кількість рідкої фази, яка проникає в шар TiC, та швидкість її проникнення є недостатніми. В результаті утворюється зв'язок у тонкому проміжному об'ємі, який чинить опір подальшій усадці зовнішніх шарів. Це призводить до появи залишкових термічних напружень і, як наслідок, до деформації та розриву зразка по центру.

Щоб зменшити викривлення та знизити термічні напруження, було проведено експеримент зі спікання під навантаженням 2 кг. Результати, наведені на рис. 6, свідчать про те, що деформація була обмежена завдяки зовнішньому стискаючому навантаженню і зразок не розшарувався. Однак у центральній частині проміжного шару з'явилася невелика тріщина (рис. 6 в).

Шліфування та полірування неушкодженого тришарового штапика дозволило виміряти товщину середнього шару (близько 1 мм) та вивчити перехідний шар під мікроскопом. Було встановлено, що при такій товщині не відбувається повного просочення, і шар залишається пористим.

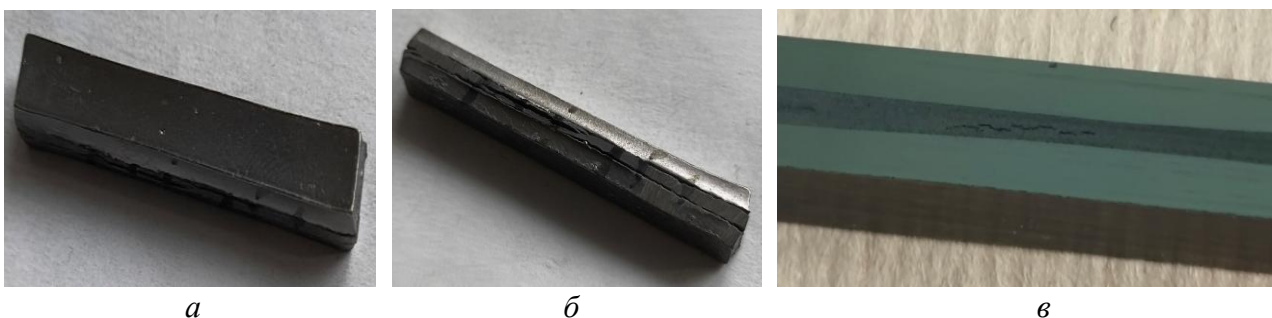


Рис. 6. Штапик після спікання з вантажем 2 кг: а – зовнішній вигляд; б – перетин; в – тріщина в центральному шарі

Висновки

Результати проведеного математичного моделювання щодо напруженого стану та формозміни в сплаві з тришаровою структурою WC–30%Co–TiC–WC–30%Co (об'ємних

відсотків) та мікроградієнтом Co на границях шарів добре узгоджуються з даними експериментів. Переваги модифікації TiC кобальтом полягають в покращеній в'язкості руйнування, оскільки створення градієнту Co на міжшарових границях знижує крихкість карбіду титану. Матеріал може краще витримувати термічні удари та локальні перенапруження. Підвищена теплопровідність сприяє швидшому вирівнюванню температури в процесі охолодження, знижує ризик локальних термічних напружень через градієнти температур. Покращена змочуваність границь Co сприяє міцнішому з'єднанню між шарами під час спікання, може підвищити міцність адгезійного зв'язку, компенсуючи підвищені напруження.

Під час спікання тришарового композита, в якому проміжний шар просочується Co під дією капілярних сил, одночасно відбувається два конкуруючих процеси: 1) швидка усадка зовнішніх шарів, що формуються зі сплаву WC–30%Co; 2) повільне просочення проміжного шару TiC кобальтом, що створює затримку в його ущільненні. Мала швидкість просочення призводить до розвитку внутрішніх напружень: стискання у зовнішніх шарах і розтягу в проміжному, що спричиняє розшарування або розрив у центрі зразка. Запобігти розшаруванню композиту можна завдяки обмеженню швидкості усадки зовнішніх шарів та зменшенню товщини проміжного шару для його повного просочування рідкою фазою. Швидкість просочування може бути збільшена шляхом використання дрібних порошків та добавок, що покращують змочування, а швидкість усадки можна обмежити, якщо проводити спікання під тиском.

O. O. Matviichuk¹, N.V. Lytoshenko¹, V. I. Sheremet²

¹Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України

²E.O. Paton Institute of Material Science and Welding

THERMAL RESIDUAL STRESSES IN MULTILAYER FUNCTIONALLY GRADIENT WC–Co HARDMETALS

The task of the scientific research is to estimate the level of residual thermal stresses using the method of mathematical modeling in an alloy with a three-layer structure WC–30%Co–TiC–WC–30%Co (volume percent) and a microgradient Co at the layer boundaries, as well as to develop technological recommendations to avoid deformation of the multilayer composite. It has been established that the magnitude of residual thermal stresses of the first and second kind significantly depends on the structural and technological parameters of multilayer gradient hard alloys.

Key words: *thermal residual stresses, multilayer functionally gradient WC–Co hardmetals, microstructural parameters, mathematical modeling method.*

Література

1. Konyashin I. Approaching the 100th anniversary of the hardmetal invention: From first WC-Co samples towards modern advanced hardmetal grades. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 2023. Vol. 111. P. 106–113.
2. Garcia J. Effect of cubic carbide composition and sintering parameters on the formation of wear resistant surfaces on cemented carbides. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 2013. Vol. 36. P. 66–71.
3. Garcia J. Influence of Fe–Ni–Co binder composition on nitridation of cemented carbide. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 2012. Vol. 30, N 1. P. 114–120.
4. Fan P., Fang Z.Z., Guo J. Design of cobalt gradient via controlling carbon content and WC grain size in liquid-phase-sintered WC–Co composite. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 2013. Vol. 36. P. 2–9.

5. Litoshenko N. V. Assessment of residual thermal stresses in polycrystalline aggregates of carbide grains of WC-Co hard alloy. *Journal of Superhard Materials*. 2009. Vol. 31, N 6. P. 382–386.
6. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Н. *Теория упругости*. М.: Наука, 1985. 456 с.
7. Hsueh C.H. Thermal stresses in elastic multilayer systems. *Thin Solid Films*. 2002. Vol. 418, N 2. P.182–188.

Надійшла 15.05. 25

References

1. Konyashin, I. (2023). Approaching the 100th anniversary of the hardmetal invention: From first WC-Co samples towards modern advanced hardmetal grades. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater*, 111, 106–113.
2. Garcia, J. (2013). Effect of cubic carbide composition and sintering parameters on the formation of wear resistant surfaces on cemented carbides. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater*, 36, 66–71.
3. Garcia, J. (2012). Influence of Fe–Ni–Co binder composition on nitridation of cemented carbide. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater*, 30(11), 114–120.
4. Fan, P., Fang, Z.Z., Guo, J. (2013). Design of cobalt gradient via controlling carbon content and WC grain size in liquid-phase-sintered WC–Co composite. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater*, 36, 2–9.
5. Litoshenko, N.V. (2023). Assessment of residual thermal stresses in polycrystalline aggregates of carbide grains of WC-Co hard alloy. *Journal of Superhard Materials*, 31(6), 382–386.
6. Timoshenko, S.P., Gudyer, Dzh.N. (1985). *Teoriya uprugosti [Theory of elasticity]*. Nauka [in Russian]
7. Hsueh, C.H. (2002). Thermal stresses in elastic multilayer systems. *Thin Solid Films*, 418(2), 182–188.

УДК 669.018.25:001.895

DOI: 10.33839/2708-731X-28-1-339-349

V.L. Khomenko, Candidate of Technical Sciences, **T.P. Medvedovska**, PhD in Pedagogy,
O. A. Pashchenko, **V. O. Rastsvietaiev**, Candidates of Technical Sciences,
D. O. Vasylchenko, Ph.D Student

*Dnipro University of Technology, av. Dmytra Yavornytskoho 19, Dnipro, 49005, Ukraine,
e-mail: rastsvietaiev.v.o@nmu.one*

ANALYSIS OF THE IMPACT OF TECHNICAL CREATIVITY ON THE EFFICIENCY OF ENGINEERING SOLUTIONS IN THE METALLURGICAL PRODUCTION OF HARD ALLOYS

This study provides a detailed examination of the impact of technical creativity on the efficiency and effectiveness of engineering solutions in metallurgical production, with a focus on hard alloys such as cemented carbides, including tungsten carbide-cobalt (WC-Co). These materials are crucial in high-performance industrial applications due to their exceptional hardness, wear resistance, and thermal stability. The research explores how creative thinking and innovative engineering practices can enhance key production