

# МІКРОСТРУКТУРА ТА ВЛАСТИВОСТІ ЦЕМЕНТОВАНИХ КАРБІДІВ (Огляд)

Б.В. Стефанів, С.В. Максимова

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: stefanivbogdan61@gmail.com

Цементовані карбіди, також відомі як тверді метали, охоплюють широкий спектр застосувань у багатьох відповідних галузях промисловості, наприклад, в автомобільній та авіакосмічній (як різальні інструменти для обробки металевих компонентів), нафтовидобувній та гірничодобувній (в якості компонентів бурових доліт або прохідницьких комбайнів) або як зношувані філь'єри (або волокни), елементи інструменту для штампування. Цементовані карбіди та кермети є одними з найпоширеніших продуктів порошкової металургії в усьому світі. Причиною цього є виняткове поєднання твердості та в'язкості порівняно з іншими матеріалами, такими як алмаз або швидкорізальна сталь. Вибираючи відповідну комбінацію твердих фаз, металевої зв'язувальної фази та параметрів обробки, можна досягти широкої комбінації мікроструктур із різними механічними властивостями. В огляді основну увагу приділено аналізу мікроструктур цементованих карбідів, як тим, які вже використовуються у виробництві, так і тим, які привернули увагу науковців завдяки новим потенційним застосуванням. Бібліогр. 26, рис. 6.

*Ключові слова:* цементовані карбіди, карбід вольфраму, спікання, адитивне виробництво, зв'язувальна фаза, зносостійкість, мікроструктура, наплавлення

**Вступ.** Цементований карбід (твердий сплав на основі WC) є матеріалом, який був винайдений у 1923 р. [1, 2]. Майже відразу після його створення цей матеріал почали використовувати як інструментальний у геоінженерії для буріння гірських порід, видобутку корисних копалин, буріння свердловин газу та нафти тощо завдяки унікальному поєднанню високої твердості, міцності та тріщиностійкості (в'язкості руйнування). Відносно висока зносостійкість і низька вартість виділяють його серед інших аналогічних матеріалів, що сприяє його застосуванню при виготовленні зносостійких деталей у багатьох галузях промисловості, наприклад, в автомобільній та авіакосмічній, нафтовидобувній та гірничодобувній (в якості компонентів бурових доліт або прохідницьких комбайнів), при виготовленні різального інструменту для обробки металевих компонентів.

Технологія виготовлення, структура та властивості цементованих карбідів значною мірою залежать від природи основного компонента, тобто твердих карбідів і м'яких металевих зв'язувальних фаз.

**Мета** роботи – провести аналіз природи тугоплавких карбідів і зв'язувальних фаз, структурних особливостей, механічних властивостей, методів отримання та застосування цементованих карбідів.

Основні компоненти цементованих карбідів складаються з дрібних частинок карбіду вольфраму, які є твердими та крихкими, а також зв'язувального металу – кобальту, який є відносно м'яким і пластичним. Зв'язувальну фазу певною мірою модифікують

перехідними металами групи заліза для досягнення певних бажаних кінцевих властивостей.

## Цементовані карбіди та їхнє використання.

Мікроструктура цементованих карбідів є неоднорідною. Вона складається з твердих, крихких карбідів, зв'язаних пластичною металевою зв'язувальною фазою. Тверда фаза представлена тугоплавкими карбідами перехідних металів (WC, TiC, TaC, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> або Mo<sub>2</sub>C), тоді як зв'язувальна фаза складається з металів групи заліза, переважно кобальту (Co) або нікелю (Ni), а також їхніх сплавів [3, 4]. Тугоплавкі карбіди перехідних металів груп IV, V і VI демонструють структуру, яка поєднує металеві, ковалентні та іонні зв'язки, що забезпечує їм високу температуру плавлення. Вони також демонструють високу твердість і міцність із високою термічною та хімічною стабільністю. Металева зв'язувальна фаза є пластичною та більш м'якою, що сприяє підвищенню ударної в'язкості цементованих карбідів. На рис. 1 наведено різні галузі застосування, в яких використовуються цементовані карбіди, відповідно до вмісту в них Co та розміру зерна WC, а також твердості.

Сировиною для твердих сплавів є чисті або попередньо леговані порошки WC, TiC, TaC, NbC, (W, Ti) C, TiN, Ti(C, N), Mo<sub>2</sub>C, Co, Ni та технічний вуглець (вуглець або сажа). Порошки змішують у відповідних кількостях, подрібнюють у кульовому млині в спирті з футеровкою із нержавкої сталі з використанням подрібнювальних тіл WC-Co до типового розміру зерна 1...3 мкм. Після подрібнення пульпу сушать розпиленням і пресують до потрібної форми. Після цього пресовані заготовки розташовують

© Б.В. Стефанів, С.В. Максимова

Ця стаття у відкритому доступі за ліцензією CC BY-NC-ND <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

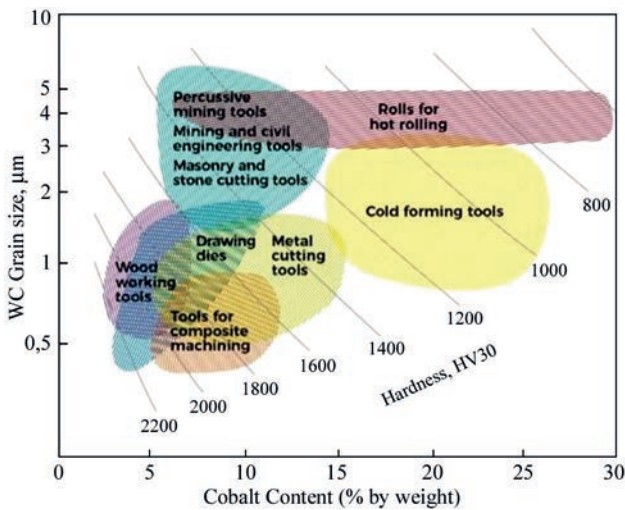


Рис. 1. Діапазон застосувань, у яких використовуються цементовані карбіди, що визначається розміром зерна WC, вмістом кобальту та твердістю [3]

у печі та спікають за температури 1300...1500 °C (об'єм матеріалу під час спікання зменшиться приблизно на 20 %). Типовий цикл спікання за часом і температурою наведено на рис. 2.

Мікроструктура цементованих карбідів (WC-Co і WC-MC-Co) і керметів Ti(C, N)-Ni/Co із добавками Mo<sub>2</sub>C, WC або TaC багато в чому схожа [5]. Усі матеріали мають карбідний або карбонітридний каркас. На границях зерен і фаз виявлено близько половини моношару сегрегації зв'язувального металу. Матеріали, що містять більше за одну тверду фазу, яка не розчиняється під час спікання, утворюють структуру «ядро-обідок». Обідки осідають епітаксіально на ядра під час

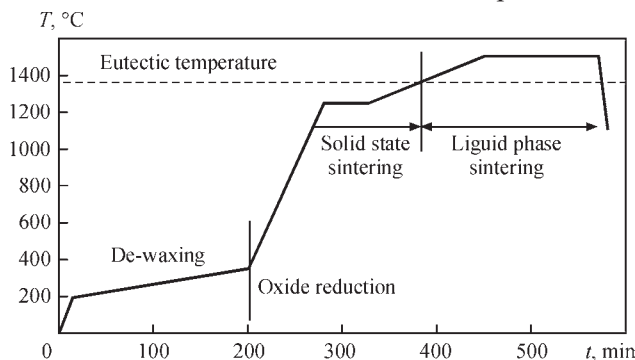


Рис. 2. Типовий часовий температурний цикл для спікання цементованих карбідів [5]

спікання, а градієнти складу відображають різні рівноваги в матеріалі під час спікання в твердому стані (відкрита пористість) і спікання в рідкій фазі (закрита пористість). Дифузії атомів металу в твердих фазах під час спікання практично не відбувається (за винятком плоских розломів та дислокацій, присутніх у ядрах зерен). Тому ці матеріали далекі від термодинамічної рівноваги [5].

Цементовані карбіди поєднують високу твердість і міцність металевих карбідів (WC, TiC, TaC) або карбонітридів (наприклад, TiCN) із в'язкістю та пластичністю металевого сплаву зв'язувальної речовини (Co, Ni, Fe), в якій тверді частинки рівномірно розподілені, утворюючи металевий композит (рис. 3). Карбід вольфраму є основною твердою фазою у цементованих карбідах системи WC-Co. Чим більше твердих карбідних частинок у матеріалі, тим він твердіший, однак одночасно знижуються ударна в'язкість і тріщиностійкість. Навпаки, збільшення частки металеві зв'язувальної фази забезпечує підвищення міцності та в'язкості, хоча й супроводжується певним зменшенням твердості.

Типові області застосування цих двох сплавів – різання металу та інструменти для холодного формування.

Звичайний WC-Co довгий час був домінуючим твердим матеріалом. Пізніше до WC-Co було додано TiC та інші кубічні карбіди (TaC, NbC, HfC), щоб підвищити зносостійкість. За останні роки зносостійкі покриття значно покращили характеристики матеріалів на основі WC-Co, які все ще є найважливішим типом цементованих карбідів. У результаті дослідження [7] цементованих карбідів і металокераміки типів WC-Co, WC-MC-Co, TiC-TiN-Mo<sub>2</sub>C-Ni/Co та (Ti, W, Ta)(C, N)-(Co, Ni) було показано, що всі матеріали мають каркас твердої фази з сегрегацією зв'язувального по границях зерен. Зв'язувальна фаза містить атоми металу з твердих фаз, але в ній відсутні C і N. Зв'язувальна фаза кобальту містить W і Mo, але мало Ti, нікелева зв'язувальна фаза – Ti і Mo. Кількість Ti не сильно змінюється в залежності від вмісту N у сплаві, тоді як вміст Mo істотно збільшується із загаль-

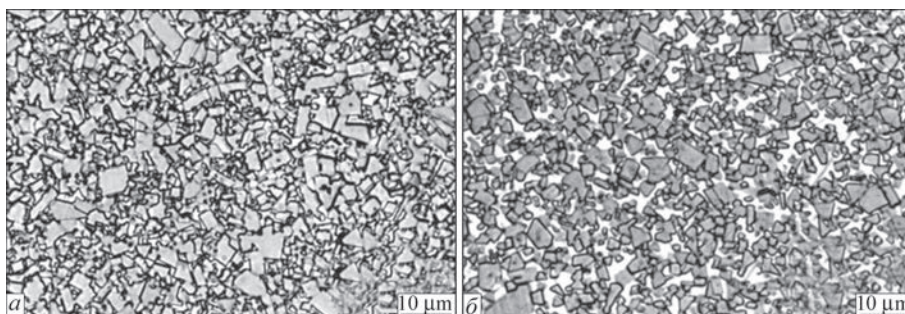


Рис. 3. Мікроструктура двох марок твердого сплаву: WC-6 % Co (a); WC-20 % Co (б) [6]

ним вмістом N. У твердих фазах під час спікання практично не відбувається дифузія атомів металу, але C і N можуть дифундувати так, що система наближається до рівноваги щодо цих елементів під час спікання.

Результати дослідження впливу порошків (Ti, Ta, Nb, W) (C, N) на мікроструктуру показали [8], що цементовані карбіди з додаванням попередньо легованого порошку мали схожу мікроструктуру: слабка структура «ядро–обідок», що складається з фази твердого розчину, вбудованої в систему WC-Co. Розмір зерна WC зменшувався, а найбільш дрібнозернисту структуру мав цементований карбід із додаванням 15 мас. % (Ti, Ta, Nb, W) (C, N). Із додаванням порошків (Ti, Ta, Nb, W)(C, N) густина, міцність на поперечний розрив і в'язкість руйнування зразків монотонно знижується. Зі збільшенням вмісту (Ti, Ta, Nb, W)(C, N) корозійна стійкість цементованих карбідів зростає. Коли вміст (Ti, Ta, Nb, W)(C, N) досягає 20 мас. %, зразок набуває високої стійкості до корозії та зберігає чудові механічні властивості [8].

**Сучасні розробки щодо спікання цементованих карбідів.** Спікання – процес, що широко використовується у промисловості для створення твердих сплавів із порошкоподібних матеріалів. Він передбачає нагрівання та ущільнення порошкоподібних частинок для утворення когезійної структури. Існує кілька доступних процесів спікання, але виділяють три основні методи: у твердому тілі, у рідкій фазі та під тиском. Спікання в твердому тілі, також відоме як звичайне або дифузійне спікання, є найбільш простим і широко використовуваним методом. Він передбачає підведення тепла до порошкоподібного матеріалу без присутності будь-якої рідкої фази. Процес спікання відбувається завдяки дифузії атомів через частинки порошку. Рідкофазне спікання передбачає додавання невеликої кількості рідкої фази до порошкоподібного матеріалу під час процесу спікання. Рідка фаза діє як зв'язувальна речовина і сприяє зчепленню частинок. Спікання під тиском, також відоме як гаряче пресування або гаряче ізостатичне пресування (ГІП), поєднує застосування тепла та тиску під час процесу спікання. Цей метод спрямований на досягнення більшої щільності та покращення властивостей матеріалу.

Протягом останніх трьох десятиліть, окрім вакуумного (ВС) [9, 10] та мікрохвильового спікання (МС) [11, 12], деякі методи спікання під тиском, такі як гаряче пресування (ГП) [13], спікання під низьким тиском (тобто ВС + термічна обробка за низького тиску) [14, 15], гаряче ізостатичне пре-

сування (ГІП) [16] та іскрове плазмове спікання (ІПС) [17, 18] були досліджені при виготовленні цементованих карбідів, армованих WC-Co. Як добре відомо, методи ГП, ГІП та ІПС можуть значно знизити температуру спікання та час витримки порівняно з вакуумним спіканням, що призводить до отримання щільних твердих сплавів WC-Co з меншими зернами та покращеною твердістю, міцністю на розрив та в'язкістю. Характеристика мікроструктури та твердості показала, що як хімічний склад, так і техніка спікання відіграють важливу роль при зростанні зерен WC і впливають на кінцеві механічні властивості.

Рідкофазне спікання (РФС) – процес ущільнення порошкоподібних матеріалів, при якому невелика кількість рідини додається до порошку, щоб діяти як зв'язувальна речовина та сприяти зчепленню частинок. Це дозволяє формувати міцні вироби за нижчих температур порівняно з іншими методами спікання, оскільки рідка фаза покращує рухливість частинок і сприяє їхньому зчепленню. За методом рідкофазного спікання [19] досліджено цементовані карбіди на основі кобальту з карбідом вольфраму, карбідом титану та карбідом танталу в якості твердої фази, дисперговані в кобальтовій матриці за допомогою процесу механічного легування у високоенергетичному кульовому млині. Ці сплави складаються на 90 % з твердої фази та кобальту в якості рідкофазного активатора. Завдяки рідкофазному спіканню за температури  $\sim 1400$  °C досягнуто відносної щільності 99 %, що забезпечує найкращу зносостійкість і механічні властивості в порівнянні з іншими методами. Показано, що час кульового помелу, необхідний для досягнення найвищої щільності спеченого матеріалу, сильно залежить від умов помелу. Вища твердість є результатом дрібнішого розміру зерна, тоді як вища в'язкість руйнування є результатом наявності великих видовжених зерен кобальту в мікроструктурі.

Однак усі вищезгадані методи спікання під тиском виконуються лише під постійним зовнішнім тиском. Ніколи не повідомлялося про спікання під динамічним тиском із контрольованою частотою та амплітудою для отримання твердих сплавів WC-Co. Новий метод коливального спікання під тиском (КСТ) [20] показав вплив температури спікання на мікроструктуру та механічні властивості твердого сплаву WC-10 мас. % Co. Результати також порівнювалися зі зразком, отриманим за допомогою звичайного ГП за аналогічних умов консолідації. За оптимальної температури ( $\sim 1310$  °C) КСТ вдалося отримати щільніший зразок з однорідною мікроструктурою, зразок проде-

монстрував найвищу міцність на згин 2431 МПа, твердість за Віккерсом 21,1 ГПа та в'язкість руйнування 11,42 МПа·м<sup>1/2</sup> [20]. Порівняно зі зразком, виготовленим методом звичайного ГП, для зразка, виготовленого методом КСТ за тієї ж температури спікання, було отримано вищу відносну щільність, менший розмір зерна та одноріднішу мікроструктуру, що призвело до того, що зразок, виготовлений за методом КСТ, продемонстрував набагато кращі механічні властивості.

**Сучасні розробки щодо адитивного виробництва цементованих карбідів.** Тверді сплави, відомі як «зуби промисловості», широко використовуються в аерокосмічній галузі, гірничодобувній промисловості, виробництві обладнання, залізничному транспорті, електронній та інформаційній промисловості тощо. Технологія адитивного виробництва (АВ) пропонує новий шлях для виготовлення геометрично складних деталей із твердих сплавів.

Виробництво спеціальних інструментів із внутрішньою контурною обробкою, виготовлених із твердого сплаву, є трудомістким і багатоступінчастим процесом спікання. Альтернативою гнучкому та автоматизованому виробництву є лазерний адитивний процес селективного лазерного плавлення (СЛП). Збільшення терміну служби інструменту досягається завдяки використанню зносостійкого та міцного твёрдосплавного матеріалу. Основна увага приділяється поведінці агломерованого та попередньо спеченого порошкового матеріалу карбід-вольфрам-кобальт (WC-Co) у процесі СЛП [21]. Залежно від параметрів впливу можуть бути створені різні типи мікроструктур, а вихідний профіль матеріалу може бути суттєво змінений під час взаємодії лазера з матеріалом.

Кермети – композитні матеріали, що складаються з керамічного армування та металевої матриці. Керметні матеріали отримують лазерним порошковим наплавленням (ЛПН), що належить до технології АВ [22]. Дослідження доцільності даної технології і параметрична оптимізація процесу ЛПН дозволили виготовляти тверді деталі з WC-17Co. Структурний аналіз виявив наявність значної пористості (1,41 %) та дрібних тріщин у зразках у вихідному стані. Подальша обробка методом гарячого ізостатичного тиску значно покращила структуру виготовлених деталей. Пористість стала дуже низькою (0,01 %), а рентгеновський фазовий аналіз виявив відсутність крихкої фази W<sub>2</sub>C. Випробування на абразивний знос і твердість показали, що характеристики деталей, виготовлених адитивним методом, можна порівняти з еталонними деталями, виготовленими методом порошко-

вого спікання. Дослідження успішно продемонструвало можливість виготовлення зносостійких керметних деталей за допомогою ЛПН.

Процес технології адитивного виробництва твердих сплавів WC-Co представлений двома технологічними шляхами АВ твердих сплавів WC-Co: порошковим наплавленням (ПН), заснованим на технології гарячого формування (наприклад, селективне лазерне спікання, селективне лазерне плавлення та селективне електронно-променеве плавлення) та шляхом формування–видалення–спікання (ФВС), заснованим на холодному формуванні зеленого тіла разом із процесами видалення та спікання (наприклад, струменеве адитивне виробництво–видалення–спікання, моделювання наплавленням–видалення–спікання та 3D-гель-друк–видалення–спікання) [23].

Крім того, аналіз результатів досліджень дозволив визначити основні фактори впливу щодо ущільнення, металургійних дефектів, еволюції мікроструктури та механічних властивостей твердих сплавів WC-Co, отриманих за допомогою адитивного методу. Висновок роботи показує, що критичною проблемою отримання твердих сплавів WC-Co за допомогою порошкового наплавлення є запобігання розтріскуванню та зменшення пористості для покращення відносної густини, а також уникнення η-фази. Однак, хоча ФВС має недоліки, включаючи складну підготовку сировини (зв'язувального) та тривалий технологічний процес, ця технологія є перспективною для отримання високопродуктивних твердих сплавів WC-Co, оскільки вона достатньою мірою поєднує переваги адитивного методу та порошкової металургії.

**Сучасні розробки щодо цементованих карбідів в якості зносостійких покриттів.** Велику увагу авторами присвячено дослідженню та застосуванню цементованих карбідів в якості зносостійких покриттів [24–26]. Цементовані карбіди та кермети є одними з найпоширеніших продуктів порошкової металургії в усьому світі. Причиною цього є виняткове поєднання твердості та в'язкості порівняно з іншими різальними матеріалами, такими як алмаз або швидкорізальна сталь. Вибираючи відповідну комбінацію твердих фаз, фази металевого зв'язувального та параметрів обробки, можна досягти широкого поєднання мікроструктур із різними механічними властивостями. Основну увагу приділено структурам, які вже використовуються у виробництві цементованих карбідів. Цементовані карбіди (рис. 4) поділяються на чотири групи на основі мікроструктури та хімічного складу: морфологія та хімічний склад WC;

кубічний карбід, що містить цементований карбід і кермети; функціонально сортовані цементовані карбіди та будова зв'язувального [24].

Цементовані карбіди з певними композиціями Fe-Ni-Co [24, 25] можуть становити інтерес для промисловості в тих випадках, коли потрібні покращені втомна міцність і в'язкість. Додавання Fe зменшує допустиме «вуглецеве вікно» (ділянка WC-зв'язувального, вільна від η-фази та графіту), що ускладнює регулювання вуглецевого балансу сплаву, щоб уникнути дефектів кінцевої мікроструктури. Зміни температур при переході твердий–рідкий стан також впливають на спікання цементованих карбідів на основі Fe-Ni-Co, що відображається в меншому розмірі зерен WC у спечених цементованих карбідах на основі Fe (системи Fe-WC мають нижчу евтектичну температуру порівняно з Co та Ni). У цементованих карбідах на основі Ni виявлено тенденцію до грубішої мікро-

структури через більшу розчинність W порівняно з карбідами на основі Co (рис. 5, a).

Цементовані карбіди WC-Ni демонструють кращі характеристики в умовах окиснення та корозії, ніж цементовані карбіди WC-Co, і знайшли застосування в деталях, що зношуються, де потрібна стійкість до корозії. Проте механічні властивості (твердість і міцність) цементованих карбідів WC-Ni відносно гірші, ніж у WC-Co. Основним недоліком цементованих карбідів на основі Ni є їхня менша механічна міцність у порівнянні з карбідами на основі Co. На основі мікροструктурних спостережень обговорюється поведінка зростання карбідних зерен сплавів WC-M (M = Co, Ni, Fe) із різним вмістом вуглецю [26]. У той час як у сплавах WC-Fe зростання зерен більш-менш уповільнюється, збільшення вмісту вуглецю сприяє зростанню зерен у сплавах WC-Co і WC-Ni з невеликим аномальним зростанням зерен у випадку Ni-зв'язувально-

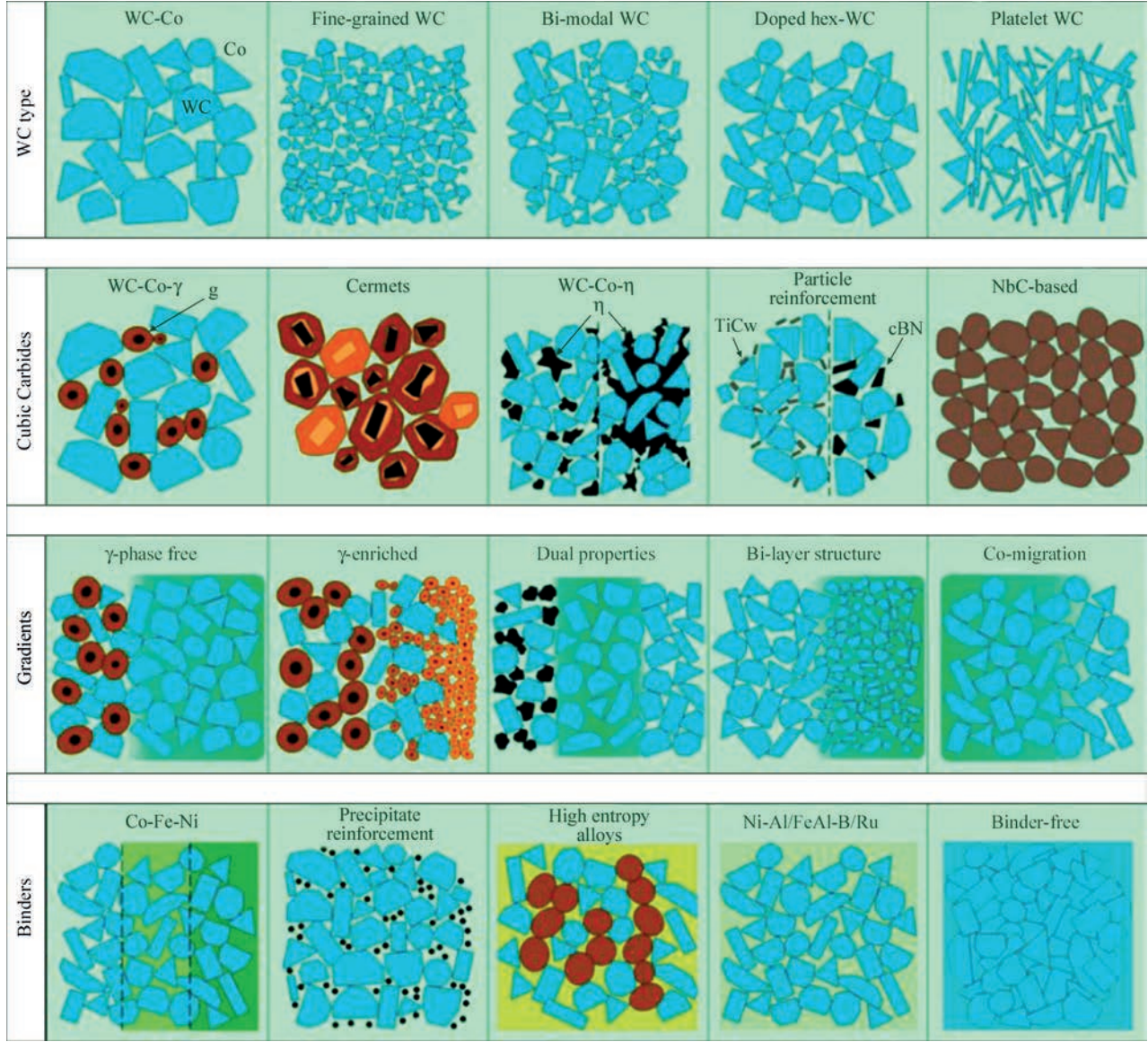


Рис. 4. Класифікація мікροструктур твердосплавних сплавів [24]

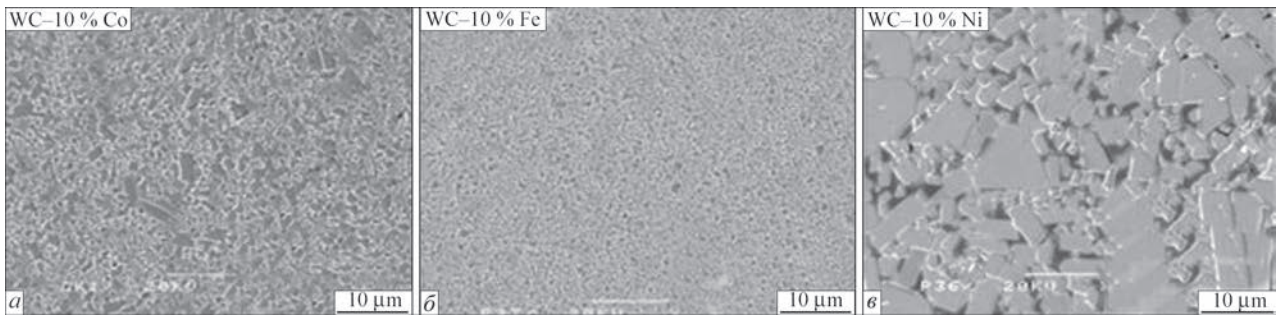


Рис. 5. Мікроструктура WC із 10 % зв'язувальної фази, що складається з Co (а), Fe (б) та Ni (в) [25]

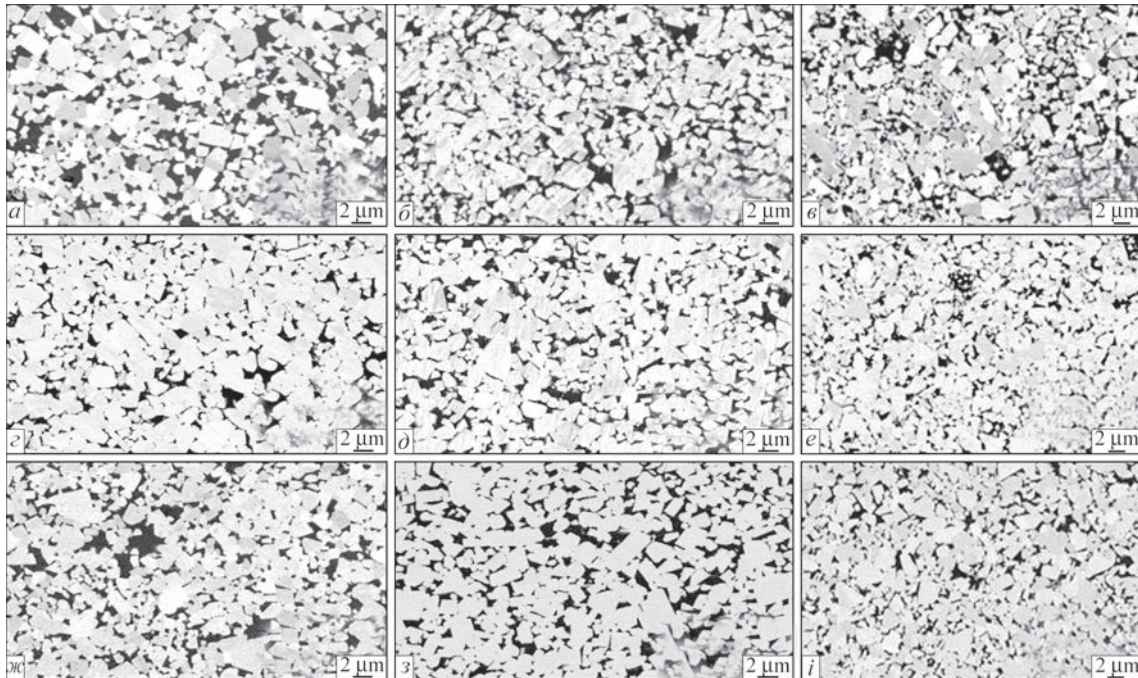


Рис. 6. Мікроструктури WC-Ni, збагаченого W (а, г, ж); WC-Co збагаченого W (б, д, з), та WC-Fe, збагаченого W (в, е, і), спечених за 1450 °C протягом 0,5 (а-в), 4 (г-е) і 8 (ж-і) год [26]

го. Що стосується розподілу фаз,  $\eta$ -фаза однорідно розподілена в матеріалі, збагаченому WC-Fe, тоді як у сплавах, збагачених WC-Co і WC-Ni, вона розподілена неоднорідно.  $\eta$ -фаза ідентифікується як світло-сірі зерна, з майже таким самим контрастом, як зерна WC. Обговорюються різні механізми зростання зерен у зв'язку з морфологією зерен WC, що спостерігається після спікання (рис. 6).

Зростання зерен у цементованих карбідах із зв'язкою, багатою на Co, Ni та Fe, проаналізовано шляхом систематичного дослідження розподілу довжини точки перетину в фазі WC. Дослідниками [26] показано, що при використанні зв'язки Fe при будь-якому вмісті вуглецю зростання зерен практично гальмується, для зв'язувальних Ni і Co з низьким вмістом вуглецю зростання зерен досить повільне, але посилюється, а аномальний характер зростання зерен посилюється зі збільшенням вмісту вуглецю, особливо у випадку Ni-зв'язувального. Морфологія інтерфейсу WC-зв'язувальне дає інформацію про механізми зростання зерен, задіяні в цементованих карбідах. Ступінчасті структури на

границі розділу WC-зв'язувальне свідчать про те, що бічне зростання обмежує кінетику в сплавах, багатих на W, тоді як гладкі границі вказують на те, що двовимірне зародкоутворення або зародження на дефектах стане обмежувальним фактором у сплавах, багатих на вуглець. У випадку сплавів WC-Ni з високим вмістом C поява більш округлих зерен передбачає рівномірніше осадження твердої речовини на закруглених краях WC.

## Висновки

Аналіз літературних джерел свідчить, що мікроструктура цементованих карбідів (WC-Co і WC-MC-Co) і керметів Ti(C, N)-Ni/Co з добавками  $\text{Mo}_2\text{C}$ , WC або TaC багато в чому схожа. Усі матеріали мають карбідний або карбонітридний каркас мікроструктури. На границях зерен і фаз каркаса виявлено близько половини моношару сегрегації зв'язувального металу. Зв'язувальна фаза містить атоми металу з твердих фаз, але в ній відсутні C і N.

У порівнянні з різними методами спікання цементованих карбідів показано, що новий метод ко-

ливого спікання під тиском за тієї ж температури спікання забезпечує вищу відносну густину, менший розмір зерна та одноріднішу мікроструктуру, що призводить до того, що зразок, виготовлений методом коливого спікання під тиском, демонструє набагато кращі механічні властивості.

Перспективним методом адитивного виробництва цементованих карбідів є адитивний метод лазерного плавлення. Випробування на абразивний знос і твердість показали, що характеристики деталей, виготовлених цим методом, можна порівняти з еталонними деталями, виготовленими методом порошкового спікання. Залежно від параметрів впливу можуть бути створені різні типи мікроструктур, а вихідний профіль матеріалу може бути суттєво змінений під час взаємодії лазера з матеріалом.

На основі мікроструктурних досліджень карбідних зерен сплавів WC-M (M = Co, Ni, Fe) із різним вмістом вуглецю показано, що у сплавах WC-Fe зростання зерен уповільнюється, збільшення вмісту вуглецю сприяє зростанню зерен у сплавах WC-Co і WC-Ni з невеликим аномальним зростанням зерен у випадку Ni-зв'язувального. Що стосується розподілу фаз, то η-фаза рівномірно розподілена в WC-Fe, що збагачений W, тоді як вона неоднорідно розподілена в WC-Co і WC-Ni з високим вмістом W.

Проведений аналіз літературних джерел узагальнює сучасні підходи до класифікації цементованих карбідів за особливостями мікроструктури та хімічного складу. Отримані результати можуть бути корисними для інженерів, дослідників і науковців, які працюють у галузі порошкової металургії та матеріалознавства, у тому числі при отриманні нераз'ємних зварних і паяних з'єднань.

## Список літератури/References

1. Spriggs, G.E. (1995) A history of fine grained hardmetal. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, 13(5), 241–255. DOI: [https://doi.org/10.1016/0263-4368\(95\)92671-6](https://doi.org/10.1016/0263-4368(95)92671-6)
2. Upadhyaya, G.S. (2001) Materials science of cemented carbides – an overview. *Mater. and Design*, 22(6), 483–489. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0261-3069\(01\)00007-3](https://doi.org/10.1016/S0261-3069(01)00007-3)
3. Ravotti, D.A.S., Correias, H.M., Luis, N.C. (2024) Last decade insights on cemented carbides: A review on alternative binders, new consolidation techniques and advanced characterization. *Eclética Química*, 49, e-1529. DOI: <https://doi.org/10.26850/1678-4618.eq.v49.2024.e1529>
4. Exner, H.E. (1979) Physical and chemical nature of cemented carbides. *Int. Mat. Rev.*, 24(1), 1149–1173. DOI: <https://doi.org/10.1179/imtr.1979.24.1.149>
5. Andren, H.-O. (2001) Microstructures of cemented carbides. *Mater. and Design*, 22(6), 491–498. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0261-3069\(01\)00006-1](https://doi.org/10.1016/S0261-3069(01)00006-1)
6. Schubert, W.-D., Böhlke, W. (2010). Cemented carbides – A success story. *ITIA Newsletter*, June, 1–11. <http://hdl.handle.net/20.500.12708/168107>
7. Andren, H.-O., Rolander, U., Lindahl, P. (1993–1994) Phase composition in cemented carbides and cermets. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, 12, 107–113. DOI: [https://doi.org/10.1016/0263-4368\(93\)90059-0](https://doi.org/10.1016/0263-4368(93)90059-0)
8. Weibin Qiu, Ying Liu, Jinwen Ye et al. (2016) Effects of (Ti,Ta,Nb,W)(C,N) on the microstructure, mechanical properties and corrosion behaviors of WC-Co cemented carbides. *Ceramics Intern.*, 43(3), 2918–2926. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.09.124>
9. Wu, C.C., Chang, S.H., Tang, T.P., Peng, K.Y., Chang, W.C. (2016) Study on the properties of WC-10Co alloys adding Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> powder via various vacuum sintering temperatures. *J. Alloy. Comp.*, 686, 810–815. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.06.221>
10. Gao, Y., Luo, B.H., He, K. et al. (2017) Mechanical properties and microstructure of WC-Fe-Ni-Co cemented carbides prepared by vacuum sintering. *Vacuum*, 143, 271–282. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2017.06.028>
11. Bao, R., Yi, J. (2014) Densification and alloying of microwave sintering WC-8 wt. % Co composites. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, 43, 269–275. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jirmhm.2013.12.010>
12. Rumman, R., Chuan, L.C., Quinton, J.S., Ghomashchi, R. (2019) Understanding the potential of microwave sintering on WC-Co. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, 81, 7–14. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jirmhm.2019.02.007>
13. Lin, H., Sun, J., Li, C. et al. (2016) A facile route to synthesize WC-Co nanocomposite powders and properties of sintered bulk. *J. Alloy. Comp.*, 682, 531–536. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.03.285>
14. Yang, Q., Yang, J., Yang, H., Ni, G., Ruan, J. (2017) Synthesis of ultrafine WC-10Co composite powders with carbon boat added and densification by sinter-HIP. *Int. J. Ref. Met. Hard Mater.*, 62(B), 104–109. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jirmhm.2016.06.018>
15. Wei, C.B., Song, X.Y., Fu, J. et al. (2012) Microstructure and properties of ultrafine cemented carbides differences in spark plasma sintering and sinter-HIP. *Mater. Sci. Eng.: A.*, 552, 427–433. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.05.065>
16. Engel, U., Hübner, H. (1978) Strength improvement of cemented carbides by hot isostatic pressing (HIP). *J. Mater. Sci.*, 13, 2003–2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00552908>
17. Sivaprahasam, D., Chandrasekar, S.B., Sundaresan, R. (2007) Microstructure and mechanical properties of nanocrystalline WC-12Co consolidated by spark plasma sintering. *Int. J. Ref. Met. Hard Mater.*, 25(2), 144–152. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jirmhm.2006.03.008>
18. Rumman, M.R., Xie, Z., Hong, S.J., Ghomashchi, R. (2015) Effect of spark plasma sintering pressure on mechanical properties of WC-7.5 wt % Nano Co. *Mater. Des.*, 68, 221–227. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.12.023>
19. Espinoza, F.R.M., Galio, A.F., Schaeffer, L. (2003) Production of carbides cemented by mechanical alloying. *Mater. Sci. Forum*, 416–418, 134–137. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.416-418.134>
20. Tianbin Zhu, Jie Zhang, Di An et al. (2019) Oscillatory pressure sintering: A new method for preparing WC-Co cemented carbides. *J. of Alloys and Compounds*, 816, 152521. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.152521>
21. Uhlmann, E., Bergmann, A., Gridin, W. (2015) Investigation on additive manufacturing of tungsten carbide-cobalt by selective laser melting. *Proc. CIRP*, 35, 8–15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.08.060>
22. Papy, K., Staerk, J.-M., Sova, A., Borbely, A. (2022) Additive manufacturing feasibility of WC-17Co cermet parts by laser powder bed fusion. *Proc. CIRP*, 111, 153–157. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.08.049>
23. Cai Chen, Boyun Huang, Zuming Liu et al. (2023) Additive manufacturing of WC-Co cemented carbides: Process, microstructure, and mechanical properties. *Additive Manuf.*, 63, 103410. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2023.103410>
24. García, J., Ciprés, V.C., Blomqvist, A., Kaplan, B. (2019) Cemented carbide microstructures: A review. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, 80, 40–68. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jirmhm.2018.12.004>
25. Wittmann, B., Schubert, W.-D., Lux, B. (2002) WC grain growth and grain growth inhibition in nickel and iron binder hardmetals. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, 20(1), 51–60. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0263-4368\(01\)00070-1](https://doi.org/10.1016/S0263-4368(01)00070-1)
26. Roulon, Z., Missiaen, J.M., Lay, S. (2020) Carbide grain growth in cemented carbides sintered with alternative binders. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, 86, 105088. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jirmhm.2019.105088>

# MICROSTRUCTURE AND PROPERTIES OF CEMENTED CARBIDES (Review)

B.V. Stefaniv, S.V. Maksymova

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: stefanivbogdan61@gmail.com

Cemented carbides, also known as hard metals, cover a wide range of applications in many relevant industries, such as automotive and aerospace (as cutting tools for machining metal components), oil and mining (as components of drill bits or road cutters), or as wear dies (or dies), and elements of stamping tools. Cemented carbides and cermets are among the most widely used powder metallurgy products worldwide. The reason for this is their exceptional combination of hardness and toughness compared to other materials such as diamond or high-speed steel. By choosing the appropriate combination of solid phases, metal binder phase and processing parameters, a wide range of microstructures with different mechanical properties can be achieved. The review focuses on the analysis of microstructures of cemented carbides, both those already used in production and those that have attracted the attention of scientists due to new potential applications. 26 Ref., 6 Fig.

*Keywords: cemented carbides, tungsten carbide, sintering, additive manufacturing, binding phase, wear resistance, microstructure, surfacing*

## ORCID

Б.В. Стефанів – <https://orcid.org/0000-0002-7159-8762>, С.В. Максимова – <https://orcid.org/0000-0003-0158-5760>

## КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів

## АВТОР ДЛЯ ЛІСТУВАННЯ

Б.В. Стефанів

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11.

E-mail: stefanivbogdan61@gmail.com

## РЕКОМЕНДОВАНЕ ЦИТУВАННЯ

Б.В. Стефанів, С.В. Максимова (2026) Мікроструктура та властивості цементованих карбідів (Огляд). *Автоматичне зварювання*, **05**, 72–79. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2026.05.09>

## ГОЛОВНА СТОРІНКА ЖУРНАЛУ

<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/as>

Отримано 14.07.2026

Отримано у переглянутому вигляді 24.09.2026

Підписано до друку 30.09.2026

Оприлюднено 20.10.2026

