

УДК 620.621.793

ПЛАЗМОВІ ПОКРИТТЯ НА ОСНОВІ САМОФЛЮСІВНОГО СПЛАВУ NiCrBSi З ПОКРАЩЕНИМИ ЗНОСОСТІЙКИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ

П. А. Ситников

pavel.welder@ukr.net

ORCID: 0000-0001-6656-0180

Національний технічний
університет «Харківський
політехнічний інститут»
61002, Україна, м. Харків,
вул. Кирпичова, 2

Досліджено структуру й властивості плазмових покриттів, напилених композиційним матеріалом на основі самофлюсівного сплаву NiCrBSi (сплаву марки ПГ-10Н-01), модифікованого композиційним матеріалом, одержаним самопоширюваним високотемпературним синтезом. Як вихідні компоненти модифікуючого композиційного матеріалу використані порошки титану, технічного вуглецю, алюмінію, оксиду заліза, терморезаючого порошку марки ПТ-НА-01 і вогнетривкої глини марки ПГОСА-0. Змішування й механічну активацію вихідних порошків проведено у кульовому млині КМ-1 протягом 15 хв при 130 об/хв у співвідношенні 1 до 40 маси шихти до маси падаючих тіл (сталевих куль діаметром 6 мм). Ініціювання самопоширюваного високотемпературного синтезу здійснено з використанням спеціального пристрою шляхом підведення розжареної ніхромової спіралі. Процес напилення покриттів виконано на установці мікроплазмового напилення МПН-004 при струмі 45 А, напрузі 30 В з дистанцією 100 мм на зразки зі сталі 65Г товщиною 3 мм. Як плазмоутворюючий та захисний газ використано аргон. Для обґрунтування доцільності проведення самопоширюваного високотемпературного синтезу частину зразків напилено самофлюсівним сплавом ПГ-10Н-01 з додаванням механічної суміші вихідних порошків. Встановлено, що в результаті плазмового напилення сплаву ПГ-10Н-01 та композиційного матеріалу складу модифікуючий композиційний матеріал + ПГ-10Н-01 формуються покриття зі щільною й багатофазною структурою. Мікроструктура покриття сплаву ПГ-10Н-01 складається з твердого розчину на основі нікелю (γ -Ni) з включеннями боридів нікелю Ni_3B та карбідів хрому Cr_3C_2 . При додаванні модифікуючого композиційного матеріалу у твердому розчині на основі нікелю, крім вказаних вище фаз, виявлені бориди титану TiB_2 , карбіди титану TiC і кремнію SiC , наявність яких призводить до підвищення мікротвердості таких покриттів та їх більшої зносостійкості в умовах абразивного зношування у порівнянні з напиленим покриттям сплаву ПГ-10Н-01.

Ключові слова: самопоширюваний високотемпературний синтез (СВС-процес), композиційний матеріал, напилення, плазмове покриття, структура, фазовий склад, мікротвердість, зносостійкість.

Актуальність теми дослідження

Плазмовий метод напилення покриттів полягає у формуванні на поверхні деталі покриття з нагрітих і прискорених високотемпературним плазмовим струменем частинок матеріалу, при зіткненні яких з поверхнею основи або напиленим матеріалом відбувається їх з'єднання. Цей метод рекомендовано для напилення зміцнюючих, захисних або інших видів покриттів із порошків металів, карбідів, оксидів, нітридів, тугоплавких з'єднань, а також композиційних матеріалів, окремі фази яких виконують задані спеціальні функції [1]. Композиційні матеріали поєднують у собі властивості кожного вихідного компоненту, оскільки їх властивості формуються за рахунок або додавання компонентів (адитивність), або їх спільного посилення (синергізм) [2].

Одним із способів отримання композиційних матеріалів є самопоширюваний високотемпературний синтез (СВС-процес), сутність якого полягає в локальному ініціюванні екзотермічних реакцій між вихідними реагентами. Це дозволяє генерувати значну кількість тепла для поширення фронту фізико-хімічних перетворень, здатного утворювати матеріали прогнозованого фазового складу [3–6].

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Фізико-механічні властивості композиту системи Ti-Fe-C, отриманого з використанням СВС-процесу, розглянуто в роботі [7]. Як вихідні матеріали використовувалися порошок титану Ti марки ПТС-1, вуглець С і порошок заліза Fe (сталь ШХ15). Останній був доданий із шліфувального шламу

Статтю ліцензовано на умовах Ліцензії Creative Commons «Attribution» («Атрибуція») 4.0 Міжнародна.
© П. А. Ситников, 2023

за технологією Луцького національного технічного університету [8]. З отриманих порошків пресувалися зразки циліндричної форми діаметром 30 мм і висотою 60 мм. СВС-процес здійснювався у лабораторному реакторі, виготовленому в університеті.

У результаті хімічних реакцій отримано синтезований зразок (спік). Твердість синтезованого спіку за Роквеллом становила: 63 HRC в центрі спіку, 38 HRC при радіусі 0,5 мм і 18 HRC при радіусі 0,9 мм. Крім того, авторами було визначено межу міцності й граничну деформацію при статичному навантаженні. Встановлено, що максимальне напруження в момент руйнування спіку $\sigma_{\max}=106$ МПа, а відносна деформація $e_{\max}=0,038$. Спираючись на результати досліджень, автори рекомендують використовувати отриманий композит як конструкційний матеріал.

Спосіб одержання вуглецевих наноматеріалів із використанням СВС-процесу розглянуто в роботі [9]. При його реалізації ініціювання СВС-процесу здійснюється імпульсним нагріванням локальної зони порошкової суміші при електричному розряді, поданому на дріт із тугоплавкого металу, який поверхнево контактує з сумішшю. Застосування такого способу дозволяє збільшити кількість порошків вуглецевих наноматеріалів й зменшити ймовірність небажаного режиму «вибухового горіння» суміші, зберігаючи при цьому простоту і стабільність ініціювання.

За допомогою СВС-процесу також отримані тугоплавкі порошки дибориду цирконію ZrB_2 [10]. Як вихідні компоненти використані збагачена боратна руда (вміст оксиду бору до 40%), силікат цирконію $ZrSiO_4$, оксид цирконію ZrO_2 , порошковий алюміній Al і магній Mg (для підсилення температури горіння), а також соляна кислота HCl (концентрація 37,5%). Змішування й механічну активацію вихідних компонентів шихти здійснювалися в планетарному млині «Pulverisette 5» (Fritsch, Німеччина). Приготування шихти проводили з урахуванням стехіометричних співвідношень вихідних компонентів. Для проведення СВС-процесу використовували скло-вуглецевий тигель, в який засипалася шихта. Ініціювання СВС-процесу здійснювали в реакторі високого тиску в середовищі аргону Ar під тиском 10 атм шляхом підведення розжареної вольфрамової спіралі. Отримані тугоплавкі субмікронні нанопорошки дибориду цирконію ZrB_2 (94,7%) і бориду цирконію ZrB (3,3%) можуть бути використанні як абразивні порошки, керамічні й композиційні матеріали в технологіях нанесення різних покриттів.

У роботі [11] представлені результати дослідження з отримання боридів хрому із використанням СВС-процесу. Як вихідні компоненти шихти авторами використані борний порошок H_3BO_3 з чистотою 99,9%, оксид хрому Cr_2O_3 та алюміній Al. Змішування й механічну активацію шихти проведено у планетарному млині «Pulverisette 5», після чого з отриманої суміші пресували циліндричні зразки діаметром 20 мм і висотою 20 мм. На відміну від попередніх досліджень, авторами цієї роботи СВС-процес проводився без захисного середовища.

За допомогою методу рентгенофазного аналізу встановлено, що в продуктах горіння шихти містяться другорядні продукти реакцій, а саме бориди хрому типу CrB , CrB_2 , Cr_2B , Cr_3B_3 , CrB_6 та Cr_3B_4 . У середині зразка знайдено кристалічні продукти, які є сумішшю бориду хрому CrB_2 й оксиду алюмінію Al_2O_3 . Ці матеріали з точки зору промислового використання й розробки композитів із металевою матрицею визнано перспективними.

Комплексні наукові дослідження щодо розробки композиційних порошків на основі аморфізуючого сплаву FeMoNiCrB з додаванням тугоплавких сполук для технологій газотермічного нанесення покриттів наведено в роботі [12]. Як тугоплавкі використані хімічні з'єднання ZrB_2 , (Ti,Cr)C та $FeTiO_3$. Сполуки ZrB_2 та $FeTiO_3$ були отримані методом механічного легування, а сполука (Ti,Cr)C – методом СВС.

Продовженням цих досліджень стала робота [13], в якій проаналізовано структуру й аморфізуючі властивості композиційних детонаційних покриттів на основі сплавів FeMoNiCrB+ ZrB_2 , FeMoNiCrB+(Ti,Cr)C, FeMoNiCrB+ $FeTiO_3$. Нанесені детонаційним напиленням покриття мали щільну ламелярну багатофазну структуру. Мікротвердість покриттів складала: FeMoNiCrB – 4855 ± 1023 МПа, FeMoNiCrB+ ZrB_2 – 3830 ± 570 МПа, FeMoNiCrB+(Ti,Cr)C – 4450 ± 700 МПа, FeMoNiCrB+ $FeTiO_3$ – 3750 ± 620 МПа. Електрохімічні випробування покриттів показали, що їх корозійна стійкість залежить від pH-розчину. Отримані покриття товщиною 500 мкм були досліджені в кислотних розчинах (3%-му NaCl та 5%-му NaOH). Зносостійкість детонаційних покриттів FeMoNiCrB+ ZrB_2 , FeMoNiCrB+(Ti,Cr)C, FeMoNiCrB+ $FeTiO_3$ в умовах зношування по незакріплених абразивних частинках SiO_2 у V_4C більша у

2,6–3,3 рази ніж у сталі 30ХГСА в середовищі SiO_2 і в 1,9–2,9 рази в середовищі V_4C . Найбільш високої зносостійкості досягнуто на покритті типу $\text{FeMoNiCrB}+(\text{Ti,Cr})\text{C}$ з мікротвердістю 4450 ± 700 МПа.

Для різних технологій нанесення покриттів використовуються композиційні матеріали, отримані на основі самофлюсівних сплавів системи NiCrBSi (порошків ПГ-10Н-01, ПГ-10Н-04, ПГ-12Н-02 та ін.) [14–16]. Основними фазами покриттів таких сплавів є твердий розчин на основі нікелю ($\gamma\text{-Ni}$) та евтектика, яка, як правило, складається з $\gamma\text{-Ni}$ й бориду нікелю Ni_3B . Додавання до сплаву NiCrBSi модифікуючих і зміцнюючих добавок, одержаних СВС, дозволяє керувати фазовим складом композиційного матеріалу й отримати в нікелевій матриці нові з'єднання (фази), які забезпечують більш високий рівень фізико-механічних властивостей покриттів на їх основі.

Одним із подальших напрямів отримання матеріалів із застосуванням СВС-процесу, які можна використовувати як модифікуючі, є розширення номенклатури вихідних реагентів, а саме додавання різних типів мінеральної сировини (глини, піщаних матеріалів), твердих промислових і радіоактивних відходів (плавильні шлаки, металева стружка) [6]. Одним із вихідних матеріалів обрано вогнетривку глину, основу якої, як відомо, складають оксиди кремнію SiO_2 й алюмінію Al_2O_3 [17].

Мета роботи – дослідження структури і властивостей плазмових покриттів на основі самофлюсівного сплаву системи NiCrBSi , модифікованого композиційним матеріалом, одержаним із використанням СВС-процесу.

Матеріали та методика проведення досліджень

Для напilenня як вихідний матеріал використовували композиційний матеріал, отриманий на основі самофлюсівного сплаву системи NiCrBSi (сплаву марки ПГ-10Н-01), модифікованого композиційним матеріалом (МКМ), одержаним самопоширюваним високотемпературним синтезом. Отримання композиційного матеріалу здійснювали у два етапи. На першому етапі для одержання МКМ використанні порошки титану Ti марки ПТМ-1, технічного вуглецю C марки П-803 і вогнетривкої глини марки ПГОСА-0. Із метою підсилення термічного ефекту реакції до вихідної шихти були додані алюміній Al у вигляді пудри марки ПАП-1, оксид заліза Fe_2O_3 і термореагуючий порошок марки ПТ-НА-01. Гранулометричний розмір вихідних порошків не перевищував 100 мкм. Співвідношення порошків було еквімолярним, щоб під час подальшого проходження СВС-процесу відбувся синтез карбідів титану TiC і кремнію SiC стехіометричного складу.

Змішування й механічну активацію шихти виконували в кульовому млині КМ-1 протягом 15 хв при 130 об/хв і співвідношенні 1:40 маси шихти до маси падаючих тіл (сталевих куль діаметром 6 мм). Після механічної активації максимальний розмір частинок шихти не перевищував 40 мкм [17]. До обробленої шихти було додано 10% клею «Metylan», після чого спресовано зразок циліндричної форми діаметром 16 мм і висотою 20 мм, який просушували протягом 72 год. Ініціювання СВС-процесу зразка здійснювали нагрітою ніхромовою спіраллю діаметром 0,8 мм (рис. 1) з використанням спеціально розробленого пристрою [18]. СВС-процес проводили у середовищі аргону Ar чистотою 98%.



Рис. 1. Отримання спіку із застосуванням СВС-процесу:
а – попередній підігрів зразка; б – СВС-процес; в – одержаний спік

На другому етапі одержаний у вигляді спіку МКМ дробили до порошкоподібного стану, після чого в кількості від 10% до 30% МКМ додавали до матеріалу матриці – самофлюсівного сплаву ПГ-10Н-01 і проводили механічну активацію протягом 15 хв. Частину зразків напилено сплавом ПГ-10Н-01 з додаванням механічної суміші (МС) вихідних компонентів шихти Ti-C-Al-SiO₂-Al₂O₃-Fe₂O₃-ПТ-НА-01. Кількість МС, як і кількість МКМ, складала від 10% до 30% відповідно. Вибір таких концентрацій зроблено виходячи з рекомендацій виробництва зносостійких композиційних матеріалів [12] і результатів раніше виконаних досліджень.

Нанесення плазмових покриттів виконували з використанням установки мікроплазмового напилення МПН-004 в Інституті електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України. Конструкція мікроплазмотрону МП-04 має зовнішній анод, який забезпечує можливість введення напилюваного матеріалу у високотемпературну область мікроплазмового струменя, який є дуговим проміжком перед анодною плямою [19–21]. Параметри процесу напилення: сила струму $I=45$ А, напруга $U=30$ В, витрата плазмоутворюючого газу $Q_{пл}=70$ л/год, витрата захисного газу $Q_{зг}=280$ л/год, дистанція напилення $L=100$ мм. Напилення проводили на зразки зі сталі 65Г товщиною 3 мм. Попередньо зразки піддавали струміно-абразивній обробці й здійснювали ультразвукове очищення поверхні ізопропіловим спиртом протягом 15 хв.

Мікроструктуру і фазовий склад покриттів досліджували на оптичному мікроскопі Neophot-32 і скануючому електронному мікроскопі Tescan Mira 3LMU з енергодисперсійним спектрометром Oxford X-max. Для вимірювання мікротвердості напилених покриттів використовували мікротвердомір ПМТ-3 із навантаженням 0,1 кг.

При дослідженні зносостійкості покриттів використовувалася машина тертя Х4-Б. Відносна зносостійкість напилених покриттів, що містили МКМ і МС, порівнювалася з величиною зносу покриття, напиленого матричним матеріалом ПГ-10Н-01. Величина зносу напиленого покриття визначалася ваговим методом із застосуванням аналітичних ваг ВЛР-200.

Викладення основного матеріалу дослідження

При напиленні як сплаву ПГ-10Н-01, так і композиційного матеріалу складу 10% МКМ + 90% ПГ-10Н-01 формуються щільні, однорідні за товщиною покриття (рис. 2). Мікроструктура покриття 10% МКМ + 90% ПГ-10Н-01 складається з матричного матеріалу самофлюсівного сплаву ПГ-10Н-01, в якому розташовані включення різного розміру (рис. 2, б), причому зі збільшенням у композиційному матеріалі вмісту МКМ їх кількість зростає [22]. Покриття складу 10% МС + 90% ПГ-10Н-01 – це матричний матеріал сплаву ПГ-10Н-01, в якому присутні включення різного розміру та пори (рис. 2, в).

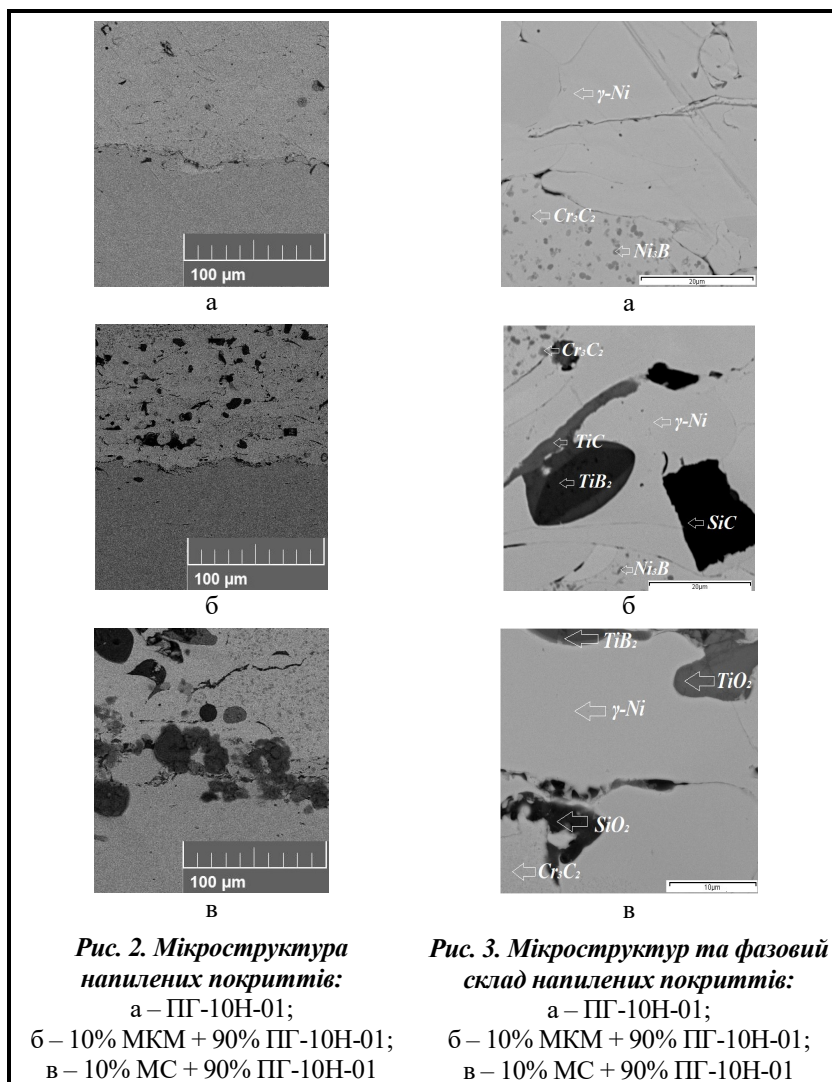


Рис. 2. Мікроструктура напилених покриттів:

а – ПГ-10Н-01;

б – 10% МКМ + 90% ПГ-10Н-01;

в – 10% МС + 90% ПГ-10Н-01

Рис. 3. Мікроструктур та фазовий склад напилених покриттів:

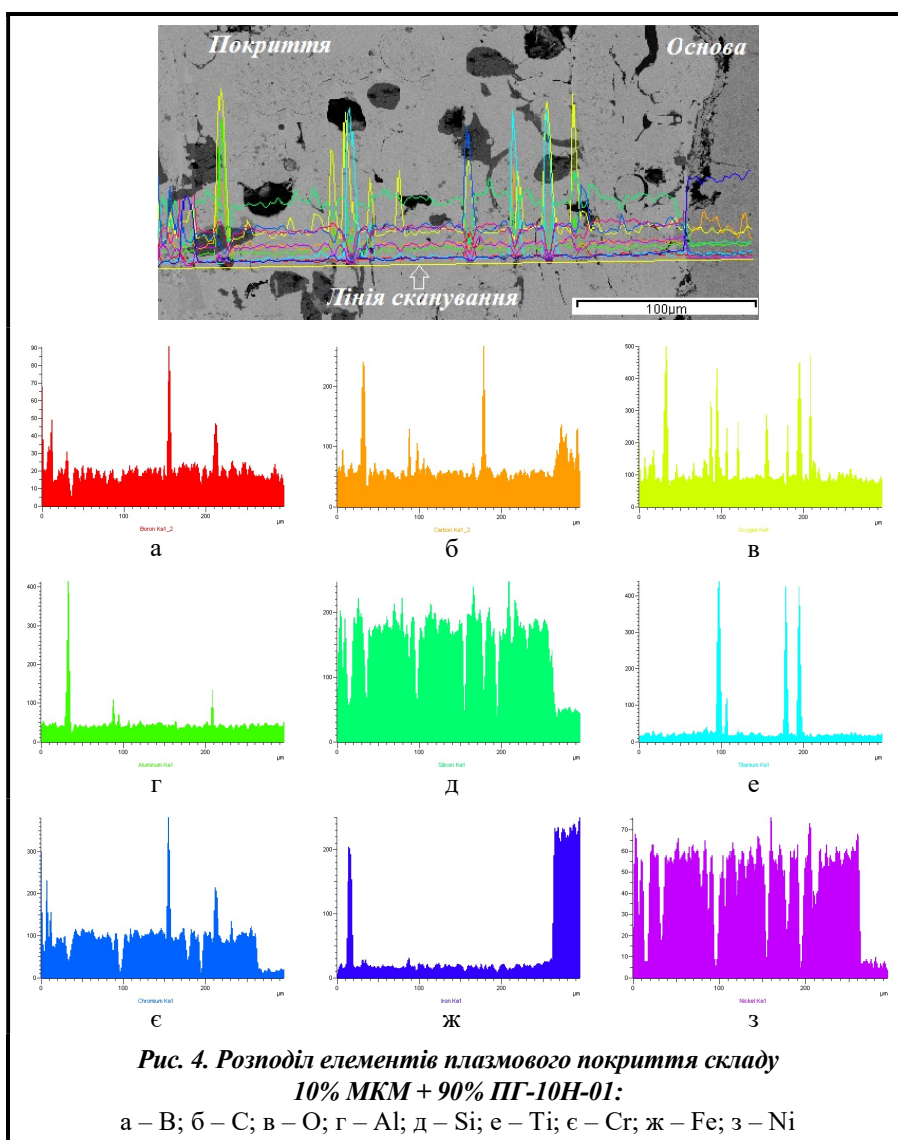
а – ПГ-10Н-01;

б – 10% МКМ + 90% ПГ-10Н-01;

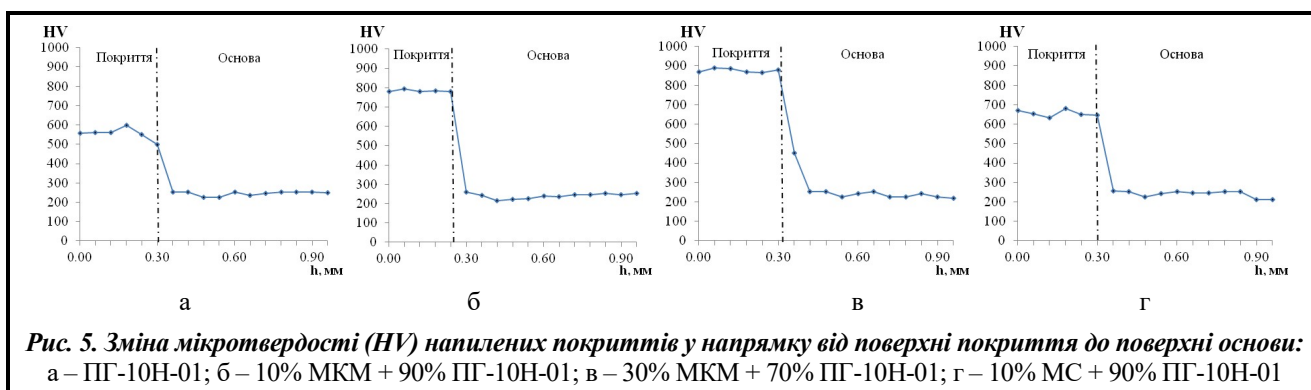
в – 10% МС + 90% ПГ-10Н-01

За допомогою скануючої електронної мікроскопії з енергодисперсійним аналізом встановлено, що основу напиленого покриття ПГ-10Н-01 складає твердий розчин нікелю (γ -Ni) із включеннями боридів нікелю Ni_3B і карбідів хрому Cr_3C_2 (рис. 3, а). Покриття, напилені композиційним матеріалом 10% МКМ + 90% ПГ-10Н-01, крім твердого розчину на основі нікелю γ -Ni й вказаних вище включень, містить фази карбідів титану TiC і кремнію SiC , а також диборидів титану TiB_2 (рис. 3, б). Мікροструктура покриття 10% МС + 90% ПГ-10Н-01 складається з твердого розчину на основі нікелю γ -Ni і включень $Ni_3B-Cr_3C_2$, однак на відміну від попереднього зразка містить фази оксидів кремнію SiO_2 , оксидів титану TiO_2 і диборидів TiB_2 (рис. 3, в).

Методом скануючої електронної мікроскопії з енергодисперсійним аналізом уздовж лінії сканування визначено розподіл елементів у напиленому покритті (рис. 4).



Мікротвердість покриттів, заміряна в напрямі від поверхні напиленого покриття до поверхні основи, представлена на рис. 5.



При вимірюванні мікротвердості виявлено, що середня мікротвердість напиленого покриття композиційного матеріалу складу 10% МКМ + 90% ПГ-10Н-01 становить 780 HV, покриття 20% МКМ + 80% ПГ-10Н-01 – 835 HV і покриття 30% МКМ + 70% ПГ-10Н-01 – 880 HV, що перевищує середню мікротвердість напиленого покриття сплаву ПГ-10Н-01, яка дорівнює 555 HV. Стабільний характер розподілу мікротвердості в напилених покриттях композиційного матеріалу свідчить про рівномірне розповсюдження в матричному матеріалі карбідів TiC та SiC, а також диборидів TiB₂ (рис. 5, б та в). Середня мікротвердість напиленого покриття складу 10% МС + 90% ПГ-10Н-01 дорівнює 650 HV (рис. 5, г), покриття 20% МС + 80% ПГ-10Н-01 – 680 HV, а покриття 30% МС + 70% ПГ-10Н-01 – 720 HV. Такі покриття мають менш рівномірний характер розподілу мікротвердості за товщиною напилення і володіють нижчою мікротвердістю порівняно з покриттями, які містять МКМ (рис. 6).

Результати досліджень зносостійкості напилених покриттів представлено на рис. 7.

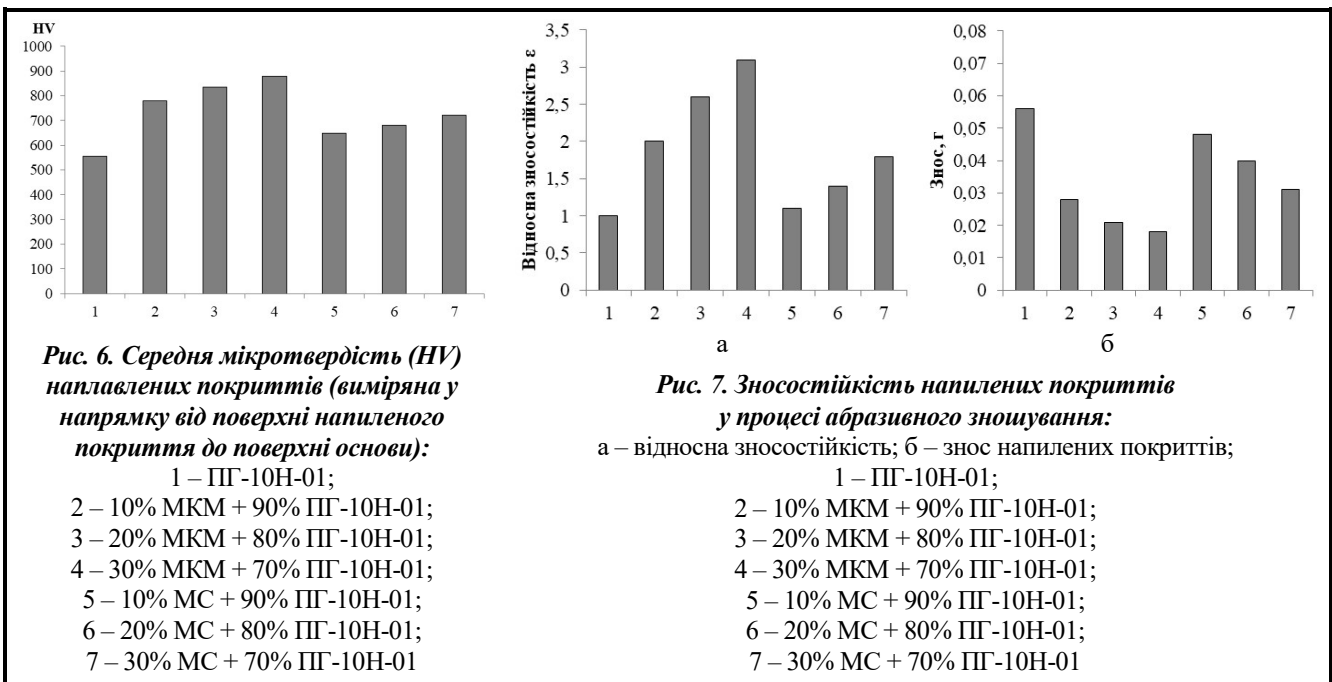


Рис. 6. Середня мікротвердість (HV) напилених покриттів (виміряна у напрямку від поверхні напиленого покриття до поверхні основи):
 1 – ПГ-10Н-01;
 2 – 10% МКМ + 90% ПГ-10Н-01;
 3 – 20% МКМ + 80% ПГ-10Н-01;
 4 – 30% МКМ + 70% ПГ-10Н-01;
 5 – 10% МС + 90% ПГ-10Н-01;
 6 – 20% МС + 80% ПГ-10Н-01;
 7 – 30% МС + 70% ПГ-10Н-01

Рис. 7. Зносостійкість напилених покриттів у процесі абразивного зношування:

а – відносна зносостійкість; б – знос напилених покриттів;
 1 – ПГ-10Н-01;
 2 – 10% МКМ + 90% ПГ-10Н-01;
 3 – 20% МКМ + 80% ПГ-10Н-01;
 4 – 30% МКМ + 70% ПГ-10Н-01;
 5 – 10% МС + 90% ПГ-10Н-01;
 6 – 20% МС + 80% ПГ-10Н-01;
 7 – 30% МС + 70% ПГ-10Н-01

При аналізі результатів вимірювань зносостійкості покриттів встановлено, що напилені покриття композиційного матеріалу мають більш високу абразивну зносостійкість порівняно з покриттями самофлюсівного сплаву ПГ-10Н-01. Це пояснюється тим, що у структурі напиленого покриття поряд із твердим розчином нікелю γ -Ni і включеннями Ni₃B–Cr₃C₂ присутні частинки карбідів титану TiC, карбідів кремнію SiC, а також диборидів титану TiB₂. При збільшенні в композиційному матеріалі вмісту МКМ кількість цих карбідів і боридів зростає, відповідно, відбувається підвищення зносостійкості покриття в процесі абразивного зношування (рис. 8, а). При додаванні до сплаву ПГ-10Н-01 механічної суміші вихідних компонентів шихти у кількості 10% зносостійкість напиленого покриття у 1,2 рази, покриття 20% МС + 80% ПГ-10Н-01 – у 1,4 рази, а покриття 30% МС + 70% ПГ-10Н-01 – у 1,8 рази більша у порівнянні із зносостійкістю покриття сплаву ПГ-10Н-01 (рис. 8, б).



Рис. 8. Відносна зносостійкість напилених покриттів залежно від вмісту внесеної добавки до сплаву ПГ-10Н-01:
 а – МКМ; б – МС

Це пояснюється тим, що у структурі матричного матеріалу присутні фази диборидів TiB_2 і оксидів титану TiO_2 , а також оксидів кремнію SiO_2 , які його зміцнюють.

Морфологія поверхонь тертя наведена на рис. 9. Поверхня тертя, напиленого сплавом ПГ-10Н-01, має риски глибиною до 14 мкм (рис. 9, а), поверхня тертя композиційного матеріалу 10% МКМ + 90% ПГ-10Н-01 має риски глибиною до 7 мкм (рис. 9 б). При збільшенні в композиційному матеріалі вмісту МКМ глибина рисок зменшується [22]. Поверхня тертя, напиленого матеріалом складу 10% МС + 90% ПГ-10Н-01, має риски глибиною до 12 мкм.

Аналіз отриманих результатів свідчить про те, що покриття на основі самофлюсівного сплаву ПГ-10Н-01, модифікованого композиційним матеріалом, одержаним самопоширюваним високотемпературним синтезом, мають структуру твердого розчину на основі нікелю (γ -Ni) і включень $Ni_3B-Cr_3C_2$, а також зміцнюючих фаз карбідів титану TiC , кремнію SiC і диборидів TiB_2 . Введені TiC , SiC , TiB_2 зміцнюють твердий розчин на основі нікелю, через що підвищується мікротвердість і зносостійкість покриття.

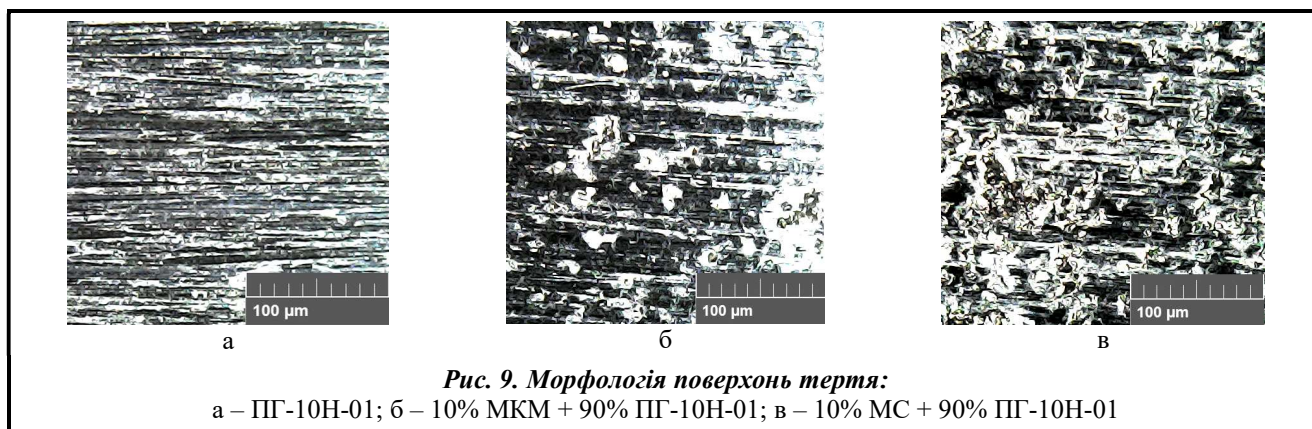


Рис. 9. Морфологія поверхонь тертя:

а – ПГ-10Н-01; б – 10% МКМ + 90% ПГ-10Н-01; в – 10% МС + 90% ПГ-10Н-01

Висновки

Розроблено композиційний матеріал на основі самофлюсівного сплаву ПГ-10Н-01, модифікований композиційним матеріалом, одержаним самопоширюваним високотемпературним синтезом. Для отримання МКМ із застосуванням СВС-процесу використовували порошки титану, технічного вуглецю, оксиду заліза, алюмінію, терморегулюючого порошку ПТ-НА-01 і вогнетривкої глини ПГОСА-0.

Методами оптичної та електронної мікроскопії встановлено, що структура напилених покриттів композиційним матеріалом складається з твердого розчину на основі нікелю (γ -Ni) з включеннями $Ni_3B-Cr_3C_2$ і містить тверді зміцнюючі фази у вигляді карбідів титану TiC і кремнію SiC , а також диборидів титану TiB_2 . При збільшенні в композиційному матеріалі вмісту МКМ кількість TiC , SiC та TiB_2 зростає, відповідно чого підвищується мікротвердість покриття та зростає його зносостійкість.

Мікротвердість напиленого покриття композиційного матеріалу складу 10% МКМ + 90% ПГ-10Н-01 становить 780 HV, 20% МКМ + 80% ПГ-10Н-01 – 835 HV, 30% МКМ + 70% ПГ-10Н-01 – 880 HV, що перевищує мікротвердість покриття самофлюсівного сплаву ПГ-10Н-01, яка дорівнює 555 HV.

В процесі зношування по закріпленим абразивним частинкам зносостійкість покриття 10% МКМ + 90% ПГ-10Н-01 у 2 рази, 20% МКМ + 80% ПГ-10Н-01 – у 2,6 рази, а 30% МКМ + 70% ПГ-10Н-01 – у 3,1 рази є більшою у порівнянні із зносостійкістю покриття зі сплаву ПГ-10Н-01.

Мікроструктура покриттів, напилених з додаванням механічної суміші вихідних компонентів шихти, складається з твердого розчину на основі нікелю (γ -Ni) з включеннями $Ni_3B-Cr_3C_2$, а також оксидів кремнію SiO_2 , оксидів титану TiO_2 і диборидів титану TiB_2 . Середня мікротвердість напиленого покриття складу 10% МС + 90% ПГ-10Н-01 дорівнює 650 HV, покриття 20% МС + 80% ПГ-10Н-01 – 680 HV та покриття 30% МС + 70% ПГ-10Н-01 – 720 HV. Зносостійкість покриття 10% МС + 90% ПГ-10Н-01 у 1,2 рази, покриття 20% МС + 80% ПГ-10Н-01 – у 1,4 рази, покриття 30% МС + 70% ПГ-10Н-01 – у 1,8 рази більша порівняно зі зносостійкістю покриття ПГ-10Н-01.

Література

1. Ющенко К. А., Борисов Ю. С., Кузнецов В. Д., Корж В. М. Інженерія поверхні. Київ: Наукова думка, 2007. 553 с.
2. Лобанов Л. М. Наука про матеріали: досягнення та перспективи: у 2-х т. Т. 1. Київ: Академперіодика, 2018. 652 с.
3. Makino A. Fundamental aspects of the heterogeneous flame in the self-propagating high-temperature synthesis (SHS) process. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2001. Vol. 27. Iss. 1. P. 1–74. [https://doi.org/10.1016/S0360-1285\(00\)00004-6](https://doi.org/10.1016/S0360-1285(00)00004-6).
4. Лузан С. О., Ситников П. А. Ретроспективний аналіз формування та розвитку самопоширюваного високотемпературного синтезу. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2022. Вип. 4 (135). С. 88–96. <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2022.4.12>.
5. Луцак Д. Л., Криль Я. А., Пилипченко О. В.. Застосування самопоширюваного високотемпературного синтезу в технологіях нанесення зносостійких покриттів. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2015. Вип. 2 (55). С. 43–50.
6. Лузан С. О., Ситников П. А. Самопоширюваний високотемпературний синтез: стан, проблеми та перспективи розвитку. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2022. Т. 33 (72). № 6. С. 17–23. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.6/04>.
7. Рудь В. Д., Самчук Л. М. Вплив технології синтезу на структуру та властивості спеченого композиту системи Ti-Fe-C. *Вісник НТУУ «КПІ»*. Серія: *Машинобудування*. 2012. № 64. С. 239–243.
8. Патент України № 63558 А МПК 7 B22F9/04. Спосіб отримання металевого порошку з шламових відходів підшипникового виробництва / В. Д. Рудь, Т. Н. Гальчук, О. Ю. Повстяной; заявл.06.05.03; опубл. 15.01.04. Бюл. 1.
9. Патент України № 115582. Спосіб одержання вуглецевих наноматеріалів / Д. І. Челпанов, А. О. Смалько, Н. І. Кускова; заявл. 31.08.15; опубл. 27.11.17. Бюл. 22.
10. Batkal A. N., Temirlanov G. K., Satybaldiyev E. M., Seydualieva A., Abdulkarimova R. Self-propagating high-temperature synthesis of refractory powder materials based on zirconium diboride obtained from boron-containing mineral raw materials of the Republic of Kazakhstan. *Chemical Bulletin of Kazakh National University*. 2018. Vol. 90. No. 3. P. 4–11. <https://doi.org/https://doi.org/10.15328/cb982>.
11. Koldasbekova M. M., Seydualyeva A. J., Abdulkarimova R. G. Self-propagating high temperature synthesis of chromium boride. *News of the Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series Chemistry and Technology*. 2015. Vol. 3. No. 411. P. 102–108.
12. Борисов Ю. С., Борисова А. Л., Бурлаченко О. М., Цимбаліста Т. В., Васильківська М. А., Биба Є. Г. Композиційні порошки на основі аморфізуючого сплаву FeMoNiCrB з добавками тугоплавких сполук для газотермічного нанесення покриттів. *Автоматичне зварювання*. 2021. № 11. С. 44–53. <https://doi.org/10.37434/as2021.11.08>.
13. Борисов С. Ю., Борисова А. Л., Цимбаліста Т. В., Кільдій А. І., Янцеви́ч К. В., Іпатова З. Г. Отримання та властивості детонатоційних покриттів на основі аморфізованого сплаву FeMoNiCrB з введенням зміцнюючих фаз. *Автоматичне зварювання*. 2021. № 12. С. 38–45. <https://doi.org/10.37434/as2021.12.05>.
14. Mrdak M. R. Microstructure and mechanical properties of nickel-chrome-bor-silicon layers produced by the atmospheric plasma spray process. *Vojnotehnicki glasnik – Military Technical Courier*. 2012. Vol. LX. Iss. 1. P. 183–200. <https://doi.org/10.5937/vojtehg1201183M>.
15. Röttger A., Kuepferle J., Brust S., Mohr A., Theisen W. Abrasion in tunneling and mining. *International Conference on Stone and Concrete Machining (ICSCM)*. 2015. Vol. 3. P. 246–261. <https://doi.org/10.13154/icscm.3.2015.246-261>.
16. Bergant Z., Batic B., Felde I., Šturm R., Sedlacek M. Tribological properties of solid solution strengthened laser clad NiCrBSi/WC-12Co metal matrix composite coatings. *Materials*. 2022. Vol. 15. Iss. 1. Paper 342. <https://doi.org/10.3390/ma15010342>.
17. Лузан С. О., Ситников П. А. Дослідження впливу параметрів механічної активації шихти Ti-C-Al-SiO₂-Al₂O₃-Fe₂O₃-ПТ-НА-01 на тривалість синтезу композиційного матеріалу, що модифікує. *Вісник ХНАДУ*. 2023. Вип. 100. С. 42–47. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2023.100.0.42>.
18. Лузан С. О., Ситников П. А. Дослідження особливостей ініціювання процесу самопоширюваного високотемпературного синтезу модифікуючого композиційного матеріалу. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2023. Вип. 2 (139). С. 102–109. <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2023.2.13>.
19. Borisov Yu. S., Voinarovych S. G., Kyslytsia A. N., Kuzmych-Yanchuk E. K., Kaliuzhnyi S. N. Investigation of electrical and thermal characteristics of plasmatron for microplasma spraying of coatings from powder materials. *The Paton Welding Journal*. 2019. Iss. 11. P. 19–22. <https://doi.org/10.15407/tpwj2019.11.04>.

20. Borisov Yu. S., Kyslytsia O. M., Voinarovych S. G., Kuzmych-Ianchuk Ie. K., Kaliuzhnyi S. M. Investigation of plasmatron electric and energy characteristics in microplasma spraying with wire materials. *The Paton Welding Journal*, 2018. Iss. 9. P. 18–22. <https://doi.org/10.15407/tpwj2018.09.04>.
21. Патент України № 1848, клас В23К10/00. Плазмотрон для напилення покриттів / Ю. С. Борисов, С. Г. Войнарович, А. А. Фомакін, К. А. Ющенко; Заявл. 19.07.2002; опубл. 16.06.2003 р. Бюл. 6.
22. Лузан С. О., Ситников П. А. Структура та властивості плазмових покриттів, напилених композиційним матеріалом, одержаним з використанням СВС-процесу. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2023. № 2 (85). С. 49–57. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2023.2.6>.

Надійшла до редакції 22.08.2023