

С. О. ЛУЗАН

доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри «Зварювання»
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»
ORCID: 0000-0002-4808-0017

П. А. СИТНИКОВ

аспірант кафедри «Зварювання»
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»
ORCID: 0000-0001-6656-0180

СТРУКТУРА ТА ВЛАСТИВОСТІ ПЛАЗМОВИХ ПОКРИТТІВ, НАПИЛЕНИХ КОМПОЗИЦІЙНИМ МАТЕРІАЛОМ, ОДЕРЖАНИМ З ВИКОРИСТАННЯМ СВС-ПРОЦЕСУ

Досліджено структуру та властивості плазмових напилених покриттів на основі самофлюсівного сплаву системи Ni-Cr-B-Si марки ПГ-10Н-01, модифікованого матеріалом, одержаним з використанням самопоширюваного високотемпературного синтезу (СВС-процес). В якості вихідних компонентів модифікуючого композиційного матеріалу використано порошки титану Ti, технічного вуглецю C, алюмінієвої пудри Al, оксидів кремнію SiO₂ та алюмінію Al₂O₃, оксиду залізу Fe₂O₃ та термореагуючого порошку ПТ-НА-01. Механічну активацію шихти проведено у кульовому млині КМ-1 протягом 15 хв, при 130 об/хв та співвідношенні як 1 до 40 маси шихти до маси тіл подрібнення. Ініціювання СВС-процесу здійснено теплотою розжареної ніхромової спіралі діаметром 0,8 мм, в середовищі аргону Ar. Процес плазмового напилення 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. В якості плазмоутворюючого та захисного газу використовувався аргон Ar, з витратами 70 л/год та 280 л/год. При виконанні роботи за допомогою методів металографічного аналізу та електронної мікроскопії досліджено мікроструктуру напилених покриттів, проведено їх рентгенофазовий аналіз, а також визначено мікротвердість та зносостійкість. Встановлено, що в результаті плазмового напилення композиційного матеріалу формується покриття які мають цільну та багатофазну структуру. Склад покриття ПГ-10Н-01 включає твердий розчин нікелю γ-Ni з боридом нікелю Ni₃B. При додаванні модифікуючого композиційного матеріалу, поряд з γ-Ni з боридом нікелю Ni₃B в покритті виявлені дибориди TiB₂ та карбіди TiC титану, а також карбіди кремнію SiC, які призводить до збільшення мікротвердості покриття та його більш високої зносостійкості у процесі абразивного зносу. Розроблений композиційний матеріал рекомендовано для зміцнення поверхонь деталей машин, які експлуатуються в умовах абразивного середовища.

Ключові слова: ресурс, деталі машин, СВС-процес, шихта, композиційний матеріал, плазмове напилення, покриття, структура, фазовий склад, мікротвердість, зносостійкість, карбід.

S. O. LUZAN

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Head at the Department of Welding
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
ORCID: 0000-0002-4808-0017

P. A. SYTNYKOV

Postgraduate Student at the Department of Welding
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
ORCID: 0000-0001-6656-0180

STRUCTURE AND PROPERTIES OF PLASMA COATINGS WHEN SPUTTERED WITH A COMPOSITE MATERIAL OBTAINED USING THE SHS PROCESS

The structure and properties of plasma-sputtered coatings based on a self-fluxing alloy of the Ni-Cr-B-Si system of PG-10N-01 grade modified with a material obtained by the self-propagating high-temperature synthesis (SHS process) were investigated. Powders of titanium (Ti), carbon black (C), aluminium powder (Al), silicon dioxide (SiO₂) and

aluminium oxide (Al_2O_3), iron oxide (Fe_2O_3) and PT-NA-01 thermosetting powder were used as the primary components of the modifying composite material. The mechanical activation of the charge was performed in the KM-1 ball mill for 15 minutes, at 130 rpm and a ratio 1:40 of the charge weight to the grinding media weight. The SHS process was initiated by the heat of a red-hot nichrome helix of diameter 0.8 mm in an argon (Ar) medium. The plasma sputtering process was carried out on the MPN-004 microplasma-based sputtering system, at a current of 45 A, voltage 30 V, with a distance of 100 mm on a 65G steel sample of thickness 3 mm. Argon (Ar) was used as a plasma-forming and shielding gas, with a flow rate of 70 l/h and 280 l/h, respectively. In the course of the work, the microstructure of the sputter-deposited coatings was studied using metallographic analysis and electron microscopy, their X-ray phase analysis was carried out, and their microhardness and wear resistance were determined. It was found that plasma sputtering of the composite material resulted in the formation of coatings with a dense and multiphase structure. The composition of the PG-10N-01 coating includes a solid solution of γ -Ni with nickel boride (Ni_3B). With the addition of a modifying composite material, along with γ -Ni with nickel boride (Ni_3B), titanium carbide (TiC) and diboride (TiB_2), as well as silicon carbide (SiC), were found in the coating, which led to an increase in the microhardness of the coating and its higher wear resistance in the process of abrasive wear. The developed composite material is recommended for strengthening the surfaces of machine parts that are used in abrasive environments.

Key words: resource, machine parts, SHS process, charge, composite material, plasma spraying, coating, structure, phase composition, microhardness, wear resistance, carbide.

Постановка проблеми

Одним з перспективних методів підвищення ресурсу деталей сільськогосподарських машин, які працюють в умовах абразивного середовища, є метод плазмового напилення покриттів композиційними матеріалами [1, 2]. Починаючи з 50-х років минулого сторіччя, традиційним методом отримання композиційних матеріалів залишалася порошкова металургія, проте в останні роки поряд з нею набув розвитку принципово новий метод – самопоширюваний високотемпературний синтез (СВС-процес) [3–7]. Фізична суть СВС-процесу полягає у локальному ініціюванні екзотермічних реакцій між вихідними реагентами, що дозволяє генерувати значну кількість тепла для поширення фронту фізико-хімічних перетворень, здатного утворювати матеріали прогнозованого хімічного та фазового складу [3, 8].

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Плазмово-дуговий метод напилення застосовують для нанесення захисних, зміцнюючих та інших видів покриттів з порошків металів, оксидів, карбідів, нітридів, інших тугоплавких з'єднань, а також композиційних матеріалів та сумішей порошків різного виду [9]. Пріоритетним напрямом є дослідження властивостей плазмових покриттів, напилених керамічними порошками з додаванням нанопорошків. Так, в роботах [10, 11] наведено результати експериментальних досліджень зносостійкості та корозійної стійкості плазмово-напилених покриттів на основі самофлюсівного сплаву ПГ-СР2 шляхом модифікування нанодисперсними сполуками оксиду алюмінію Al_2O_3 та оксиду титану TiO_2 . В якості вихідних матеріалів використані два дослідні склади: самофлюсівний порошок ПГ-СР2 (матричний матеріал), в який додано у концентраціях від 0,5 до 5,0 % нанодисперсний оксид алюмінію Al_2O_3 фракцією 50–60 нм та керамічний порошок оксиду алюмінію Al_2O_3 гамма-фази фракцією 40–63 мкм в який додано у концентраціях від 0,5 до 1,5 % нанодисперсний оксид титану TiO_2 фракцією 50–60 нм. Для змішування та механо-хімічної активації шихт використано кульовий млин моделі ХОМ-2. Напилення покриттів здійснено спеціальним плазмотроном [12] при струмі 80–90 А, напрузі 35–50 В, продуктивністю до 4 кг/год з загальною витратою плазмоутворюючого та транспортуючого газу (аргону Ar) 5 л/хв. Результати досліджень показали, що оптимальний вміст нанодисперсного оксиду алюмінію Al_2O_3 в складі самофлюсівного сплаву ПГ-СР2 складає 0,2 %. Через це мікротвердість покриття збільшується на 25–40 %, а його зносостійкість підвищується в 2,5–3,0 рази. Оптимальний вміст нанодисперсного оксиду титану TiO_2 в суміші з оксидом алюмінію Al_2O_3 гамма-фази складає 1,5 %, при цьому корозійна стійкість покриття підвищується у 2,8 рази, а його мікротвердість збільшується на 25–30 %.

Оригінальними науковими дослідженнями плазмового покриття з композиційного матеріалу ZrB_2 -SiC-AlN встановлено вплив складу і швидкості плазмового струменя на структуру та фазовий склад покриттів, а також здійснено дослідження їх стійкості до термоциклічного нагрівання [13]. Так, при нагріванні полум'ям киснево-пропан-бутанової суміші покриття товщиною 400 мкм зберігає свої захисні властивості при 15 термоциклах. Поверхневий шар покриття після цього складається з матриці на основі Al_2SiO_5 з субмікронними включеннями ZrO_2 . Використання таких покриттів рекомендовано для виробів та вузлів авіакосмічної техніки.

В роботі [14] досліджено структуру та аморфізуючі властивості композиційних детонаційних покриттів на основі Fe-Mo-Ni-Cr-B-сплаву. В якості дослідних порошків використанні сплави Fe-Mo-Ni-Cr-B+ ZrB_2 , Fe-Mo-Ni-Cr-B+(Ti, Cr)C, Fe-Mo-Ni-Cr-B+FeTiO₃. Дослідні композиції сумішей отримували методом механічного легування. За результатами проведених досліджень встановлено, що нанесені детонаційним напиленням покриття мали щільну ламелярну багатофазну структуру. Мікротвердість покриттів складає: Fe-Mo-Ni-Cr-B – 4855±1023 МПа, Fe-Mo-Ni-Cr-B+ ZrB_2 – 3830±570 МПа, Fe-Mo-Ni-Cr-B+(Ti, Cr)C – 4450±700 МПа,

Fe-Mo-Ni-Cr-B+FeTiO₃ – 3750±620 МПа. Електрохімічні випробування покриттів показали, що їх корозійна стійкість залежить від рН-розчину. Отримані покриття товщиною 500 мкм були дослідженні в розчинах 3 %-му NaCl та 5 %-му NaOH. Зносостійкість детонаційних покриттів Fe-Mo-Ni-Cr-B+ZrB₂, Fe-Mo-Ni-Cr-B+(Ti, Cr)C, Fe-Mo-Ni-Cr-B+FeTiO₃ в умовах зношування по незакріплених абразивних частинках SiO₂ та В₄С по відношенню до сталону «сталь 30ХГСА» складала 2,6–3,3 рази в середовищі SiO₂ та 1,9–2,9 рази – в середовищі В₄С. Найбільш високу зносостійкість у 2,7–3,0 рази було досягнуто на покритті типу Fe-Mo-Ni-Cr-B+(Ti, Cr)C, яке має мікротвердість 4450±700 МПа.

Перспективним напрямом досліджень є розробка композиційних матеріалів, одержаних з використанням СВС-процесу.

Формулювання мети дослідження

Дослідження структури та властивостей плазмових покриттів композиційним матеріалом, одержаними з використанням СВС-процесу.

Методика проведення досліджень

В якості вихідного матеріалу для наплення використовували композиційний матеріал, одержаний з використанням самопоширюваного високотемпературного синтезу (СВС-процесу). Розробку композиційного матеріалу здійснювали у два етапи. На першому етапі для одержання модифікуючого композиційного матеріалу (МКМ) були використанні порошки титану Ti марки ПТМ-1, технічного вуглецю С марки П-803, оксидів кремнію SiO₂ та алюмінію Al₂O₃, які було додано у вигляді вогнетривкої глини марки ПГОСА-0. З метою підсилення термічного ефекту реакції до вихідної шихти було додані алюміній Al у вигляді пудри марки ПАП-1, оксид заліза Fe₂O₃ та термореагуючий порошок марки ПТ-НА-01. Гранулометричний розмір вихідних порошоків не перевищував 100 мкм. Співвідношення вихідних компонентів шихти було еквімолярним, щоб під час подальшого проходження СВС-процесу відбувся синтез карбідів титану TiC та кремнію SiC стехіометричного складу.

Змішування та механічну активація шихти здійснювали у кульовому млині моделі КМ-1 (рис. 1), протягом 15 хв, при 130 об/хв та співвідношенні 1 : 40 маси шихти до маси тіл подрібнення (сталевих куль діаметром 6 мм). Після механічної активації максимальний розмір частинок шихти не перевищував 40 мкм [15].

До обробленої шихти було додано 10 % клею «Metulan», після чого спресовано зразок циліндричної форми діаметром 16 мм та висотою 20 мм. Одержаний зразок просушували протягом 72 годин при температурі + 25 °С.

Ініціювання СВС-процесу зразка здійснювали нагрітою ніхромовою спіраллю діаметром 0,8 мм (рис. 2, а) з використанням спеціально розробленого пристрою [16]. СВС-процес проводили у середовищі аргону Ar з чистотою 98 %.

На другому етапі одержаний у вигляді спіку МКМ дробили до порошокоподібного стану, після чого в кількості від 10 до 30 % МКМ додавали до матеріалу матриці – самофлюсівного сплаву системи Ni-Cr-B-Si марки ПГ-10Н-01 та проводили механічну активацію протягом 15 хв.

Нанесення плазмових покриттів здійснювали з використанням установки мікроплазмового наплення МПН-004 в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України. Параметри процесу наплення: сила струму $I = 45$ А, напруга $U = 30$ В, витрата плазмоутворюючого газу $Q_{\text{пл}} = 70$ л/год, витрата захисного газу $Q_{\text{зр}} = 280$ л/год, дистанція наплення $L = 100$ мм. Наплення проводили на зразки зі сталі 65Г товщиною 3 мм. Попередньо зразки

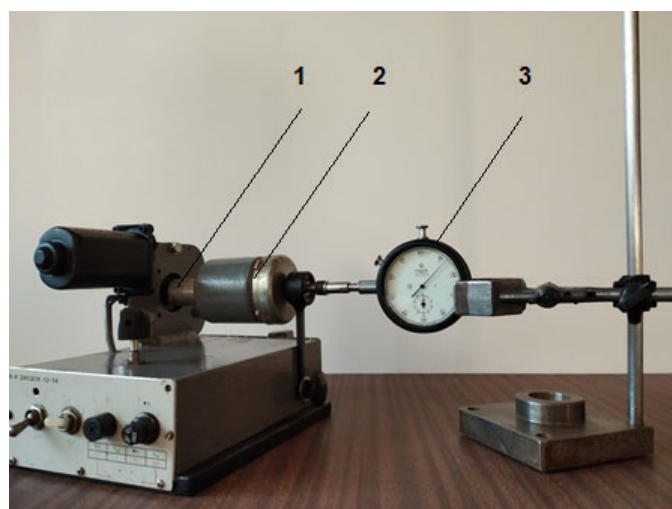


Рис. 1. Кульовий млин моделі КМ-1 для механічної активації шихти: 1 – привід барабану; 2 – сталевий барабан; 3 – тахометр

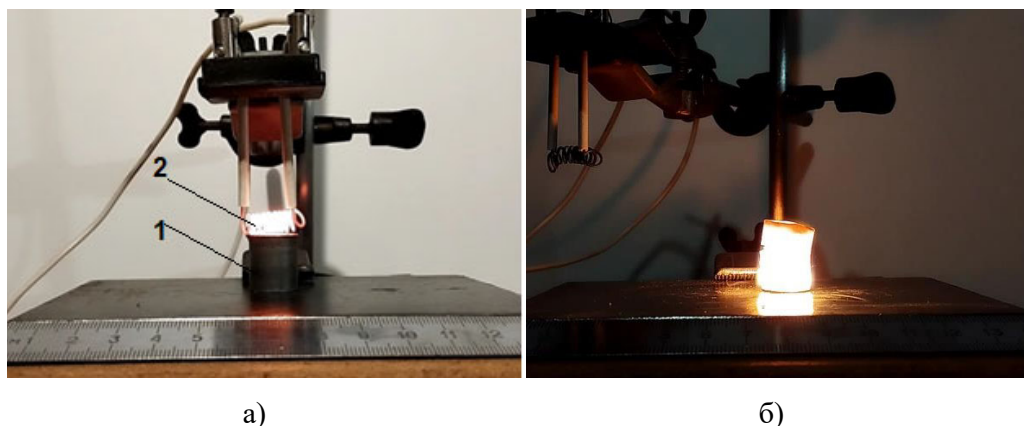


Рис. 2. Отримання спіку із застосуванням СВС-процесу: 1 – зразок з шихти; 2 – ніхромова спіраль; а – попередній підігрів зразка; б – одержаний спік

піддавали струміно-абразивній обробці та здійснювали ультразвукове очищення поверхні ізопропіловим спиртом протягом 15 хв. На поверхні зразків були напилені покриття товщиною від 250 до 300 мкм.

Для дослідження мікроструктури та фазового складу покриттів були використані методи металографічного аналізу (мікроскоп Neophot-32, оснащений приставкою для цифрової зйомки), електронної мікроскопії (скануючий електронний мікроскоп Tescan Mira 3LMU з встановленим енергодисперсійним спектрометром Oxford X-max) та рентгеноструктурного аналізу (рентгенівський дифрактометр Rigaku Ultima-IV). Травлення зразків здійснювалося у 4 %-му розчині азотної кислоти HNO_3 в етиловому спирті. Для вимірювання мікротвердості напилених покриттів використовували мікротвердомір ПМТ-3 з навантаженням 0,1 кг на алмазну піраміду. При дослідженні зносостійкості покриттів використовувалася машина тертя Х4-Б та зразки циліндричної форми діаметром 4 мм і висотою 15 мм, які зношувалися своїм торцем по поверхні абразивної шкурки, закріпленої на торці диску, який обертався. Діаметр диску складав 200 мм, шлях тертя зразку становив 20 м. Зразок, який досліджувався, притискався до абразивної шкурки при навантаженні 1 кг. Знос зразку відбувався по новій поверхні шкурки, для чого він отримував радіальне переміщення. При дослідженнях для кожного зразку використовувалася нова шліфувальна шкурка з абразивним зерном на основі електрокорунду розміром 150 мкм. Оцінка відносної зносостійкості напилених покриттів композиційного матеріалу проводилася у порівнянні 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 (рис. 3, а), так і композиційного матеріалу (КМ) формується щільні, однорідні по товщині покриття. Мікроструктурою КМ є матричний матеріал із самофлюсівного сплаву ПГ-10Н-01 в якому рівномірно розташовані тверді включення різного розміру, причому зі збільшенням в КМ вмісту МКМ їх кількість відповідно збільшується (рис. 3, б та в).

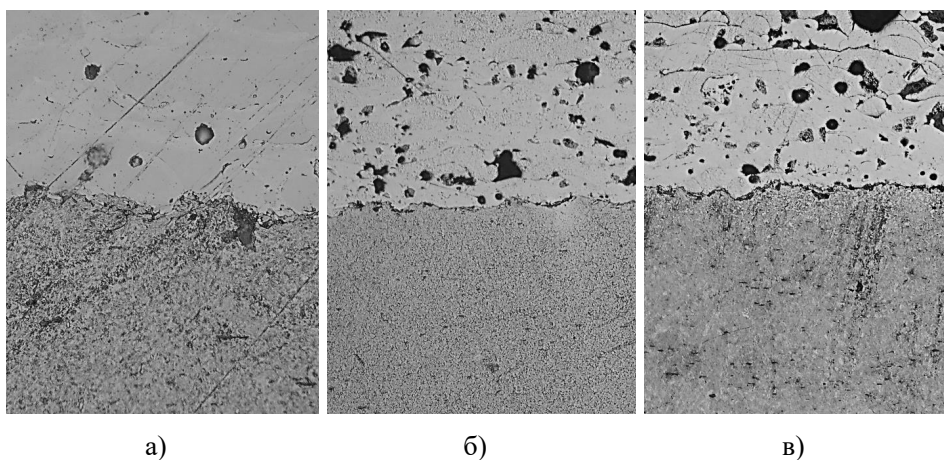


Рис. 3. Мікроструктура напилених покриттів: а – ПГ-10Н-01; б – КМ (10 % МКМ – 90 % ПГ-10Н-01); в – КМ (20 % МКМ – 70 % ПГ-10Н-01) (x 400)

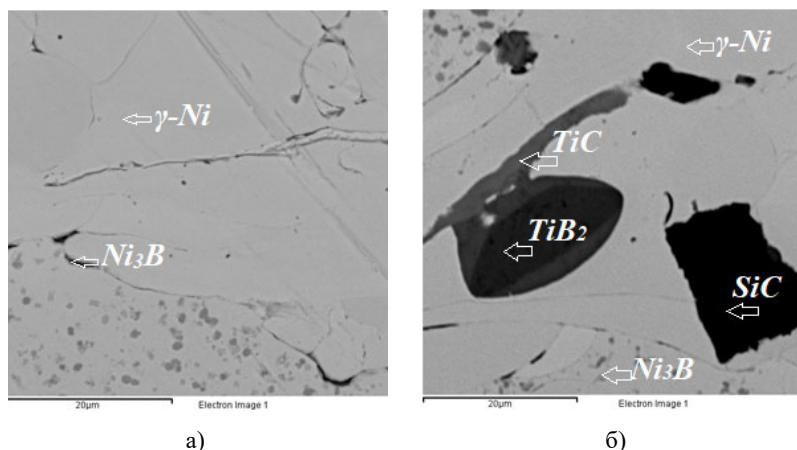


Рис. 4. Мікроструктура та фазовий склад напилених покриттів: а – ПГ-10Н-01; б – КМ (10 % МКМ – 90 % ПГ-10Н-01)

Для визначення хімічного складу включень були проведені дослідження з використанням скануючої електронної мікроскопії та енергодисперсійного аналізу. Дослідженнями встановлено, що основу напиленого покриття ПГ-10Н-01 складає γ -твердий розчин нікелю (γ -Ni) та боридна фаза Ni_3B (рис. 4, а). В шарі КМ складу 10 % МКМ + 90 % ПГ-10Н-01, крім основних фаз γ -Ni та Ni_3B виявлені включення карбідів титану TiC та кремнію SiC, а також диборид титану TiB_2 (рис. 4, б). Наявність фаз γ -Ni, Ni_3B , TiC, SiC, TiB_2 підтвердив рентгенофазовий аналіз.

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

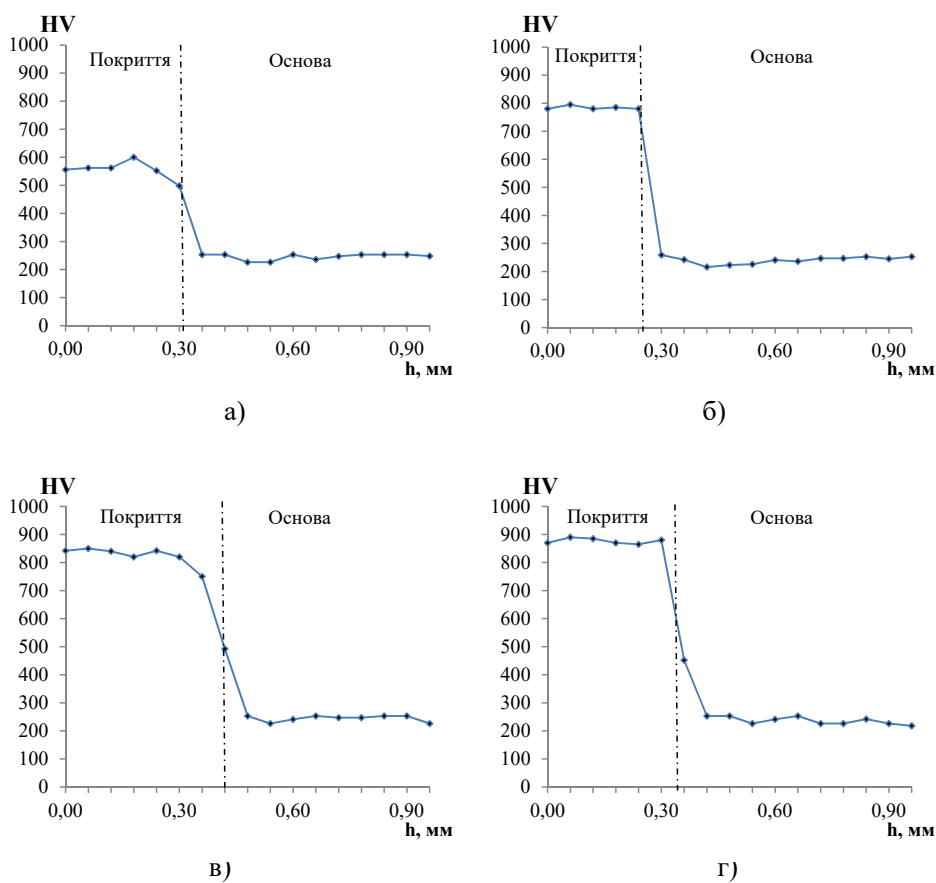


Рис. 5. Зміна мікротвердості (HV) напилених покриттів у напрямку від поверхні покриття до поверхні основи: а – ПГ-10Н-01; б – КМ (10 % МКМ – 90 % ПГ-10Н-01); в – КМ (20 % МКМ – 80 % ПГ-10Н-01); г – КМ (30 % МКМ – 70 % ПГ-10Н-01)

На основі результатів вимірювань мікротвердості (рис. 5) виявлено, що середня мікротвердість напиленого покриття КМ (10 % МКМ + 90 % ПГ-10Н-01) становить 780 HV, покриття КМ (20 % МКМ + 80 % ПГ-10Н-01) – 835 HV та покриття КМ (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 КМ свідчить про рівномірне розповсюдження карбідів та диборидів.

Результати досліджень зносостійкості напилених покриттів представлено на рис. 6.

На підставі аналізу результатів вимірювань зносостійкості покриттів встановлено, що напилені покриття КМ мають більш високу абразивну стійкість у порівнянні з самофлюсівним сплавом ПГ-10Н-01. Це пояснюється тим, що в структурі напиленого покриття, поряд з твердим розчином нікелю γ -Ni та боридом нікелю Ni_3B присутні карбіди титану TiC , карбіди кремнію SiC , а також дибориди титану TiB_2 . При збільшенні в КМ вмісту МКМ кількість цих карбідів та боридів збільшується, відповідно чому відбувається підвищення зносостійкості покриття в процесі абразивного зношування (рис. 7).

Морфологія поверхонь тертя (рис. 8) збігається з результатами випробувань на зносостійкість. Так, поверхня тертя напиленого покриття ПГ-10Н-01 має риски глибиною до 14 мкм (рис. 8, а), поверхня тертя КМ (10 % МКМ + 90 % ПГ-10Н-01) має риски глибиною до 7 мкм (рис. 8, б), причому зі збільшенням в КМ кількості МКМ їх глибина зменшується (рис. 8, в, г).

Аналіз отриманих результатів свідчить про те, що покриття КМ мають структуру на основі нікелевої матриці (γ -Ni) в якій, поряд з боридом нікелю Ni_3B , рівномірно розподілені карбіди титану TiC , кремнію SiC та дибориди титану TiB_2 . Наявність карбідів та диборидів в структурі збільшує мікротвердість покриття, через що зростає його зносостійкість.

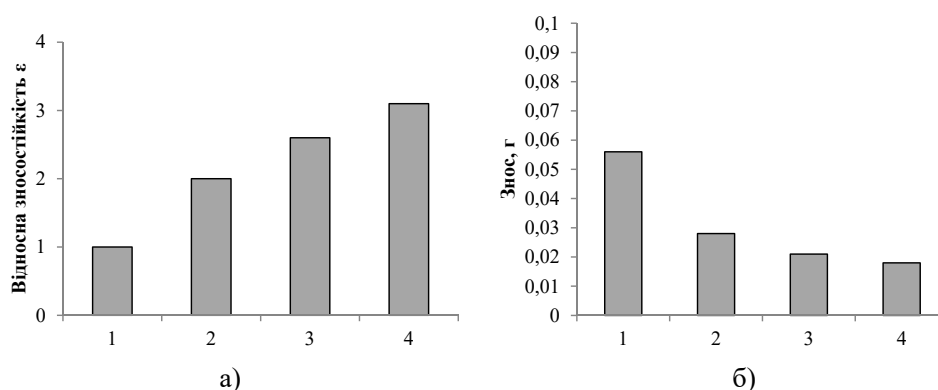


Рис. 6. Зносостійкість напилених покриттів в процесі абразивного зношування:
 а) відносна зносостійкість; б) знос напилених покриттів; 1 – ПГ-10Н-01; 2 – КМ (10 % МКМ – 90 % ПГ-10Н-01); 3 – КМ (20 % МКМ – 80 % ПГ-10Н-01); 4 – КМ (30 % МКМ – 70 % ПГ-10Н-01)

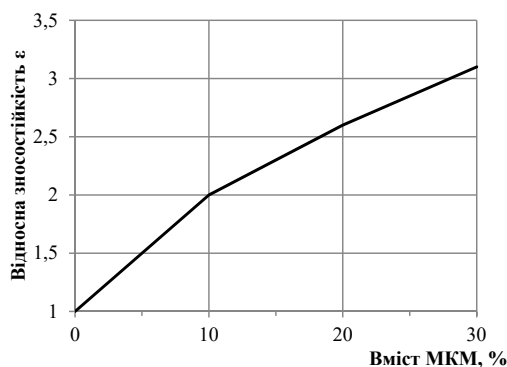


Рис. 7. Відносна зносостійкість покриттів КМ в залежності від вмісту МКМ

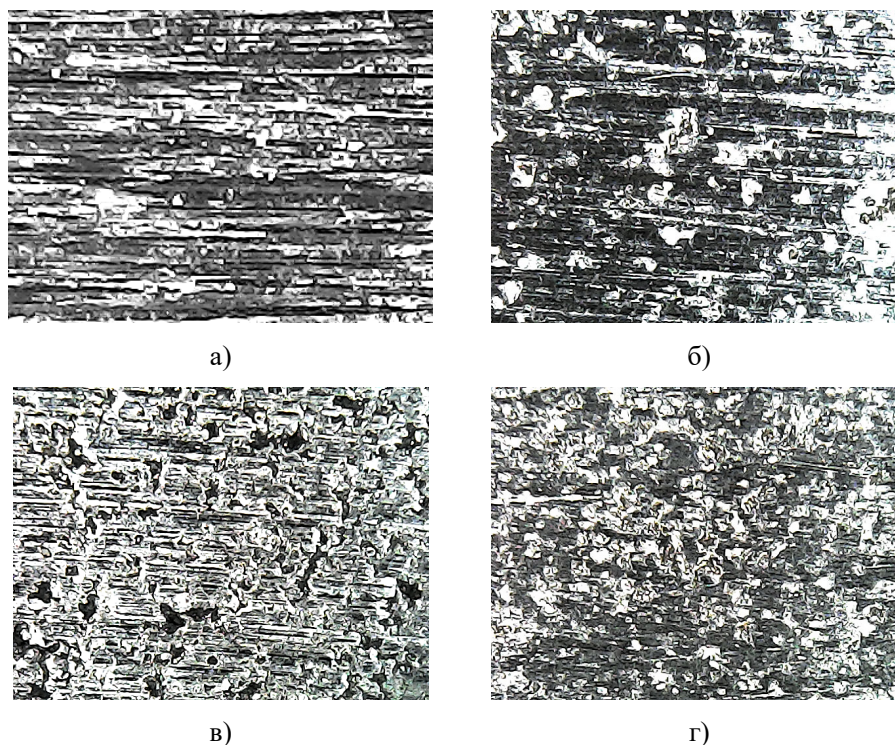


Рис. 8. Морфологія поверхонь тертя: а – ПГ-10Н-01, б – КМ (10 % МКМ – 90 % ПГ-10Н-01), в – КМ (20 % МКМ – 80 % ПГ-10Н-01), г – КМ (30 % МКМ – 70 % ПГ-10Н-01) (x 400)

Висновки

Покриття, нанесені плазмовим напиленням композиційного матеріалу складу 10–30 % МКМ + 90–70 % ПГ-10Н-01, містять в структурі тверді включення у вигляді карбідів титану TiC та кремнію SiC , а також диборидів титану TiB_2 . Мікротвердість покриття КМ (10 % МКМ + 90 % ПГ-10Н-01) становить 780 HV, КМ (20 % МКМ + 80 % ПГ-10Н-01) – 835 HV, КМ (30 % МКМ + 70 % ПГ-10Н-01) – 880 HV, що перевищує мікротвердість покриття матричного сплаву ПГ-10Н-01.

Дослідженнями встановлено, що в процесі абразивного зношування зносостійкість покриття КМ (10 % МКМ + 90 % ПГ-10Н-01) у 2 рази, КМ (20 % МКМ + 80 % ПГ-10Н-01) у 2,6 разів, а КМ (30 % МКМ + 90 % ПГ-10Н-01) у 3,1 рази є вищою у порівнянні із зносостійкістю покриття зі сплаву ПГ-10Н-01.

Розроблений композиційний матеріал, одержаний з використанням СВС-процесу, можна рекомендувати для підвищення ресурсу деталей сільськогосподарських машин, які працюють в умовах абразивного середовища.

Список використаної літератури

1. Наука про матеріали: Досягнення та перспективи / редкол. Л.М. Лобанов (голова) та ін. Київ : НАН України, Академперіодика, 2018. Т. 1. 652 с.
2. Коржик В.М., Рябоволик Ю.В., Шевченко В.Ю., Демянов О.І. Трибологічні характеристики електродугових покриттів для відновлювання деталей сільськогосподарських машин та обладнання. *Міжвузівський збірник «Наукові нотатки»*. Луцьк. 2011. № 32. С. 185–190.
3. Kharatyan S.L., Merzhanov A.G. Coupled SHS reactions as a useful tool for synthesis of materials: an overview. *International Journal of SHS*. 2012. № 21. P. 59–73. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1061386212010074>
4. Merzhanov A.G., Borovinskaya I.P. Historical retrospective of SHS: an autoreview. *International Journal of SHS*. 2008. № 4. P. 242–265. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1061386208040079>
5. Tavazde G.F., Shteinberg A.S. Production of advanced materials by methods of self-propagating high-temperature synthesis. Tbilisi : Meridian, 2011. 206 p.
6. Тавадзе Г.Ф. Про розвиток напрямку самопоширюваного високотемпературного синтезу. Доповідь з нагоди вручення Золотої медалі ім. В.І. Вернадського НАН України. *Вісник НАН України*. 2017. № 5. С. 46–51.
7. Лузан С.О., Ситников П.А. Ретроспективний аналіз формування та розвитку самопоширюваного високотемпературного синтезу. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2022. № 4 (135). С. 88–96. DOI: <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2022.4.12>

8. 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. № 6. Т. 33 (72). С. 17–23. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.6/04>
9. Ющенко К.А., Борисов Ю.С., Кузнецов В.Д., Корж В.М. Інженерія поверхні: підручник. Київ, Наукова думка. 2007. 553 с.
10. Смирнов І.В., Чорний А.В., Фурман В.К., Долгов Н.А. Вплив домішок нанодисперсних сполук оксидів на зносо- та корозійну стійкість плазмово-напилених покриттів. *Проблеми тертя та зношування*. 2017. № 1 (74). С. 14–22.
11. Фурман В.К., Чорний А.В., Смирнов І.В. Дослідження впливу домішок нанопорошки оксиду алюмінію на зносостійкість плазмових покриттів. *Проблеми трибології*. 2016. № 1. С. 100–104.
12. Пристрій для плазмового – дугового напilenня покриттів: пат. 54496 Україна, МПК (2009) B23K 10/00. № 54496; заявл. 20.05.2010; опубл. 10.11.2010, бюл. № 21. 6 с.
13. Borisov Yu.S., Borisova A.L., Grishchenko A.P., Vigilanskaya N.V., Kolomiitsev M.V., Vasilkovskaya M.A. Structure and phase composition of ZrB₂-SiC-AlN plasma coatings on the surface of C/C-SiC composite materials. *Automatic Welding*, 2019. № 5. P. 25–35. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2019.05.03>
14. Борисов Ю.С., Борисова А.Л., Цимбаліста Т.В., Кільдій А.І., Янцевич К.В., Іпатова З.Г. Отримання і властивості детонаційних покриттів на основі аморфізованого сплаву FeMoNiCrV з введенням зміцнюючих фаз. *Автоматичне зварювання*. 2021. № 12. С. 38–45. DOI: <https://doi.org/10.37434/as.2021.12.05>
15. Лузан С.О., Ситников П.А. Дослідження впливу параметрів механічної активації шихти Ti–Al–SiO₂–Al₂O₃–Fe₂O₃–ПТ-НА-01 на тривалість синтезу композиційного матеріалу, що модифікує. *Вісник Харківського автомобільно-дорожнього університету*. 2023. № 100. С. 42–47. DOI: <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2023.100.0.42>
16. Luzan S.O., Sytnykov P.A. Device for initiating the SHS process. Materials VI International scientific and practical conference. “Science and innovation of modern world”, London, 23–25 February 2023. London. P. 237–239.

References

1. Lobanov L.M. (Eds.). Science of materials: achievements and perspectives. NAS of Ukraine. Kyiv: Akadempriodyka, 2018. Vol. 1. 652 p.
2. Korzhik V.M., Ryabovolyk Yu.V., Shevchenko V.Yu., Demyanov O.I. Tribological characteristics of electric arc coatings for restoration of parts of agricultural machines and equipment. *Interuniversity collection “Scientific Notes”*. Lutsk. 2011. № 32. P. 185–190.
3. Kharatyan S.L., Merzhanov A.G. Coupled SHS reactions as a useful tool for synthesis of materials: an overview. *International Journal of SHS*. 2012. № 21. P. 59–73. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1061386212010074>
4. Merzhanov A.G., Borovinskaya I.P. Historical retrospective of SHS: an autoreview. *International Journal of SHS*. 2008. № 4. P. 242–265. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1061386208040079>
5. Tavazde G.F., Shteinberg A.S. Production of advanced materials by methods of self-propagating high-temperature synthesis. Tbilisi : Meridian, 2011. 206 p.
6. Tavazde G.F. On the development of the direction of self-propagating high-temperature synthesis. Report on the occasion of the presentation of the Gold Medal named after V.I. Vernadskyi National Academy of Sciences of Ukraine. *Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine*. 2017. № 5. P. 46–51.
7. Luzan, S.O., Sytnykov, P.A. Retrospective analysis of the formation and development of self-propagating high-temperature synthesis. *Bulletin of Mykhailo Ostrogradsky National University of Kremenchug*. № 4 (135), 2022. P. 88–96. DOI: <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2022.4.12>
8. Luzan, S.O., Sytnykov, P.A. Self-propagating high-temperature synthesis: status, problems and development prospects. *Scientific notes of Tavrida National V.I. Vernadskyi University Series: Technical Sciences*. Vol. 33 (72). № 6. 2022. P. 17–23. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.6/04>
9. Yushenko K.A., Borisov Yu.S., Kuznecov V.D., Korzh V.M. Surface engineering: textbook. Kyiv, Naukova Dumka Publ., 2007. 553 p.
10. Smirnov I.V., Chornyi A.V., Furman V.K., Dolgov N.A. The effect of admixtures of nanodispersed compounds of oxides on the wear and corrosion resistance of plasma-sprayed coatings. *Friction and wear problems*. 2017. № 1 (74). P. 14–22.
11. Furman V.K., Chornyi A.V., Smirnov I.V. Study of the influence of aluminum oxide nanopowder admixtures on the wear resistance of plasma coatings. *Problems of tribology*. 2016. № 1. P. 100–104.
12. Device for plasma-arc spraying of coatings: pat. 54496 Ukraine, IPC (2009) B23K 10/00. No. 54496; statement 05/20/2010; published 10.11.2010, Bull. № 21. 6 p.
13. Borisov Yu.S., Borisova A.L., Grishchenko A.P., Vigilanskaya N.V., Kolomiitsev M.V., Vasilkovskaya M.A. Structure and phase composition of ZrB₂-SiC-AlN plasma coatings on the surface of C/C-SiC composite materials. *Automatic Welding*, 2019. № 5. P. 25–35. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2019.05.03>

14. Borisov Yu.S., Borisova A.L., Tsymbalista T.V., Kildiy A.I., Yantsevich K.V., Ipatova Z.G. Preparation and properties of detonation coatings on amorphized FeMoNiCrB alloys with introduction of strengthening phases. *Automatic welding*. 2021. № 12. P. 38–45. DOI: <https://doi.org/10.37434/as.2021.12.05>
15. Luzan, S.O., Sytnykov, P.A. Study of the influence of the parameters of mechanical activation of the Ti–C–Al–SiO₂–Al₂O₃–Fe₂O₃–PT-NA-01 charge stock on the duration of the synthesis of the modifying composites. *Bulletin of the Kharkiv Automobile and Road University*. 2023, № 100. P. 42–47. DOI: <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2023.100.0.42>
16. Luzan S.O., Sytnykov P.A. Device for initiating the SHS process. Materials VI International scientific and practical conference. “Science and innovation of modern world”, London, 23–25 February 2023. London. P. 237–239.