

УДК 620.621.793

## ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ Й ВЛАСТИВОСТЕЙ НАПЛАВЛЕНИХ ШАРІВ NiCrBSi- СПЛАВУ, МОДИФІКОВАНОГО КОМПОЗИЦІЙНИМ МАТЕРІАЛОМ

П. А. Ситников

[pavel.welder@ukr.net](mailto: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 шарів, наплавлених самофлюсівним сплавом системи NiCrBSi марки ПГ-10Н-01, модифікованим композиційним матеріалом, отриманим самопоширюваним високотемпературним синтезом. Як вихідні компоненти модифікуючого композиційного матеріалу використано порошки титану, технічного вуглецю, вознетривкої глини, алюмінію, оксиду заліза й терморегуючого порошку ПТ-НА-01. Порошки були механічно активовані в кульовому млині, спресовані в циліндричний зразок, після чого піддані процесу самопоширюваного високотемпературного синтезу. Наплавлення зразків здійснювали неплавким графітовим електродом діаметром 9,5 мм, при струмі 110 А із застосуванням інверторного джерела живлення СВ-290НК. Встановлено, що структура шару, наплавленого сплавом ПГ-10Н-01, складається з твердого розчину на основі нікелю ( $\gamma$ -Ni) й евтектики, утвореної на його основі з боридом Ni<sub>3</sub>B. Також в наплавленому шарі виявлені поодинокі включення карбідів хрому Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> і бору B<sub>4</sub>C. При додаванні до сплаву ПГ-10Н-01 модифікуючого композиційного матеріалу структура наплавленого шару складається з  $\gamma$ -твердого розчину й евтектики, зміцнених карбідами титану TiC і кремнію SiC, які підвищують мікротвердість і зносостійкість шару. Мікротвердість шару, наплавленого композиційним матеріалом, який містив 10% модифікуючої складової, становить 660 HV, що перевищує мікротвердість шару, наплавленого сплавом ПГ-10Н-01, яка дорівнює 510 HV. За результатами досліджень проведені експлуатаційні випробування в умовах Фермерського господарства «Кам'януватка» (Новоукраїнський район, Кіровоградська область) комплекту стріластких лоп напівпримірного культиватора КПП-8, агрегованого з трактором New Holland T 6090. На основі проведених випробувань доведено, що відносна зносостійкість стріластких лоп, виготовлених зі сталі 65Г, зміцнених зі зворотного боку за схемою «носок-робочі леза» шляхом наплавлення шару композиційного матеріалу, в 1,7 рази більша порівняно з зносостійкістю лоп, виготовлених за стандартною технологією.

**Ключові слова:** самопоширюваний високотемпературний синтез, шихта, композиційний матеріал, наплавлення, наплавлений шар, карбід, структура, твердість, абразив, зносостійкість, деталі машин.

### Постановка проблеми

Одним із методів, який дозволяє підвищити ресурс деталей ґрунтообробних машин, є наплавлення на їх робочі поверхні самофлюсівних сплавів системи NiCrBSi, які дозволяють створити на поверхні деталі захисний шар заданої товщини, відмінний від основного металу деталі за своїми фізико-механічними властивостями. Практика застосування самофлюсівних сплавів системи NiCrBSi свідчить про необхідність, а головне, технологічну можливість їх зміцнення за рахунок внесення додаткових з'єднань карбідів, боридів і нітридів металів, які поліпшують властивості наплавленого матеріалу.

### Аналіз відомих напрацювань

Основними фазами шарів самофлюсівних сплавів системи NiCrBSi марок ПГ-10Н-01, ПГ-12Н-01 є твердий розчин на основі нікелю ( $\gamma$ -Ni) й евтектика, яка складається з  $\gamma$ -Ni та боридної фази Ni<sub>3</sub>B [1–3]. Додавання до NiCrBSi модифікуючих домішок дозволяє керувати фазовим складом матеріалу й отримати в нікелевій матриці нові з'єднання (фази). Такі шари, як правило, мають композиційну будову.

Так, модифікування NiCrBSi-сплаву частинками карбідів кремнію SiC розглянуто в роботі [4]. Поєднання технології плазмового напилення NiCrBSi-сплаву з додаванням нітридів титану TiN та їх подальшим індукційним переплавом здійснено авторами роботи [5]. Розробці композиційного матеріалу типу NiCrBSi-TiB<sub>2</sub> для покриттів з високим рівнем зносостійкості присвячено роботу [6], а в

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

роботі [7] вивчено модифікування NiCrBSi-сплавів шляхом введення рідкісноземельного металу – оксиду ітрію  $Y_2O_3$ .

Перспективним напрямом досліджень NiCrBSi-сплавів є додавання до них матеріалів, отриманих самопоширюваним високотемпературним синтезом (СВС-процес). Використання СВС-процесу дозволяє отримувати більш дешеві матеріали, які у порівнянні з WC і VC не поступаються за показниками своїх фізико-механічних властивостей, зокрема, твердістю й зносостійкістю [8]. Так, синтезований карбід кремнію SiC із рисового лушпиння, отриманого з використанням СВС-процесу, описаний в роботі [9]. Високотемпературний синтез системи Cu–Ti– $B_4C$  розглянуто в дослідженні [10]. Отриманню синтезованого карбиду титану TiC із застосуванням спеціального реактора, який виготовлено з деревини, присвячено роботу [11].

Важливе значення при вивченні NiCrBSi-сплавів із додаванням різних модифікуючих домішок мають дослідження структур і властивостей покриттів залежно від методу їх нанесення. Відповідно до виду енергії, яка використовується при нанесенні покриття, методи нанесення покриттів умовно поділяють на шість основних груп: механічні, термомеханічні, термічні, хіміко-термічні, електрохімічні й фізичні [12]. Різними методами можна отримати певний поверхневий шар потрібних параметрів. У роботі [13] досліджено структуру й властивості напилених плазмових покриттів (термомеханічна група) самофлюсівним сплавом NiCrBSi марки ПГ-10Н-01 з додаванням карбідів титану TiC і кремнію SiC, отриманими СВС-процесом. Поряд з методом плазмового напилення, одним із перспективних виступає метод дугового наплавлення (термічна група).

### Мета роботи

Дослідження структури й властивостей шарів, наплавлених самофлюсівним сплавом системи NiCrBSi марки ПГ-10Н-01, модифікованим композиційним матеріалом, отриманим самопоширюваним високотемпературним синтезом.

### Матеріали, обладнання та методика проведення досліджень

Для наплавлення використовували самофлюсівний сплав системи NiCrBSi марки ПГ-10Н-01, а також композиційний матеріал, отриманий на його основі з використанням СВС-процесу. Отримання композиційного матеріалу здійснювали у два етапи. На першому виконували змішування порошків титану Ti марки ПТМ-1, технічного вуглецю С марки П-803, оксидів кремнію  $SiO_2$  та алюмінію  $Al_2O_3$ , які додані у вигляді вогнетривкої глини марки ПГОСА-0, алюмінієвої пудри Al марки ПАП-1, оксиду заліза  $Fe_2O_3$  та терморегуючого порошку марки ПТ-НА-01. Співвідношення компонентів у шихті було еквімолярним, щоб під час подальшого проходження СВС-процесу відбувся синтез карбідів титану TiC і кремнію SiC стехіометричного складу. Гранулометричний показник усіх вихідних компонентів не перевищував розміру 100 мкм. Змішування й механічну активацію шихти проводили в кульовому млині моделі КМ-1 протягом 15 хв, при 130 об/хв і співвідношенні 1:40 маси шихти до маси тіл подрібнення

(сталевих куль діаметром 6 мм). Після проведення механоактивації максимальний розмір частинок шихти не перевищував 40 мкм [14]. До отриманої шихти додавали 10% клею «Metylan», перемішували до пастоподібного стану і з використанням спеціальної прес-форми і ручного гвинтового пресу отримували циліндричний зразок діаметром 16 мм і висотою 20 мм, який



**Рис. 1. Самопоширюваний високотемпературний синтез модифікуючого композиційного матеріалу:**  
а – ініціювання СВС-процесу; б – СВС-процес

просушували протягом 72 годин. Ініціювання СВС-процесу (рис. 1) отриманого зразка здійснювали в середовищі аргону Ar чистотою 98% за допомогою спеціального пристрою від нагрітої ніхромової спіралі діаметром 0,8 мм. Вихідна температура зразка на початку реакції становила 25 °С. Після початку СВС-процесу ніхромову спіраль відводили вбік [15].

На другому етапі одержаний спік, модифікуючий композиційний матеріал (МКМ), дробили до порошкового стану, після чого в кількості від 10 до 30% МКМ додавали до самофлюсівного сплаву ПГ-10Н-01 і змішували в кульовому млині протягом 15 хв.

Одержані суміші у вигляді порошку наносили на поверхню зразка зі сталі 65Г шаром товщиною 3 мм, після чого здійснювали дугове наплавлення графітовим електродом діаметром 9,5 мм, при струмі 100–110 А, на прямій полярності. Як джерело живлення використовували зварювальний інвертор постійного струму моделі СВ-290 НК.

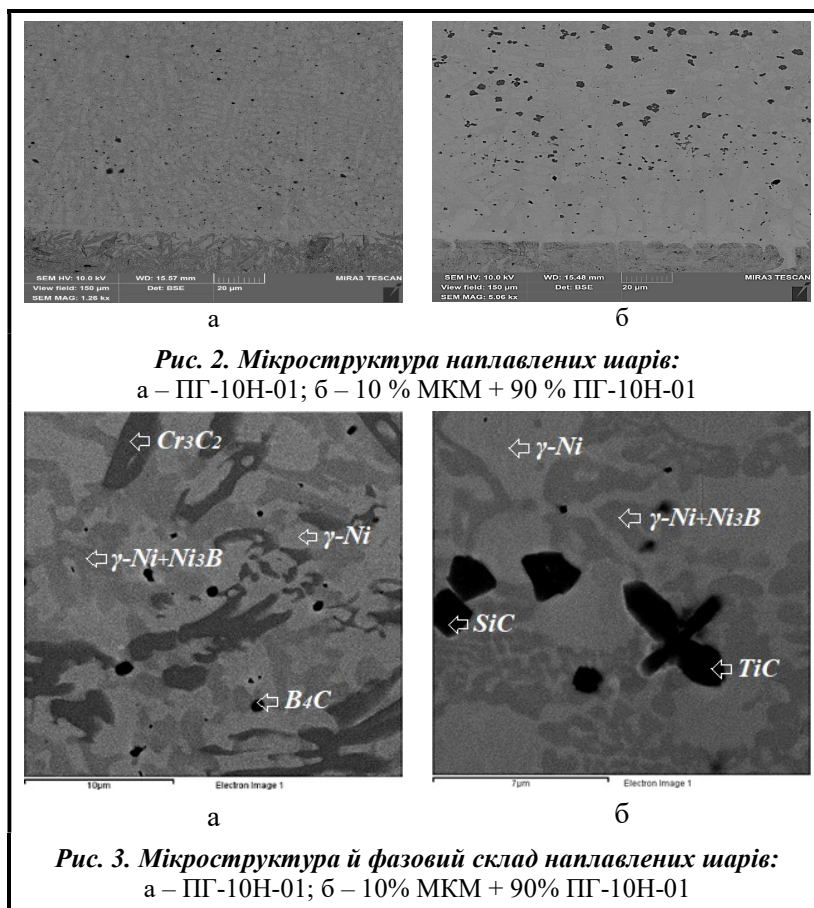
Мікроструктуру і фазовий склад наплавлених шарів досліджували методами металографічного аналізу (мікроскоп Neophot-32, оснащений приставкою для цифрової зйомки), електронної мікроскопії (скануючий електронний мікроскоп Tescan Mira 3LMU із встановленим енергодисперсійним спектрометром Oxford X-max) і рентгеноструктурного аналізу (рентгенівський дифрактометр Rigaku Ultima-IV). Вимірювання мікротвердості наплавлених шарів здійснювали за допомогою мікротвердоміру ПМТ-3 за методом Віккерса при навантаженні 0,1 кг [16].

Дослідження абразивного зношування незакріпленим абразивом проводили відповідно до відомостей роботи [17]. Просушений кварцовий пісок, розмір частинок якого не перевищував 200 мкм, безперервно подавали в зону контакту гумового диску й зразка. Швидкість обертання диску складала 60 об/хв, сила притискання зразка становила 25 Н. Вимірювання маси зразків здійснювали з використанням ваг ВЛР-200.

### Результати досліджень

Мікроструктура шару, наплавленого сплавом ПГ-10Н-01, має дендритну будову (рис. 2, а). Мікроструктура шару, наплавленого композиційним матеріалом складу 10% МКМ + 90% ПГ-10Н-01, має будову матричного матеріалу самофлюсівного сплаву ПГ-10Н-01 з розподіленими включеннями різного розміру й морфології (рис. 2, б).

За результатами скануючої електронної мікроскопії встановлено, що шар, наплавлений самофлюсівним сплавом ПГ-10Н-01, складається з твердого розчину на основі нікелю ( $\gamma$ -Ni) й евтектики, утвореної на його основі з боридною фазою  $Ni_3B$ . Формування евтектики відбувається внаслідок взаємодії між вихідним Ni та B при нагріванні й охолодженні у процесі наплавлення. Крім того, як і у виявлених дендритах твердого розчину, так і в евтектиці зустрічаються поодинокі включення карбідів хрому  $Cr_3C_2$  і карбідів бору  $B_4C$  (рис. 3, а).



У шарі, наплавленому композиційним матеріалом складу 10% МКМ + 90% ПГ-10Н-01, у дендритах твердого розчину  $\gamma$ -Ni й евтектиці виявлені включення карбідів титану  $TiC$  і кремнію  $SiC$  (рис. 3, б). Додавання МКМ до сплаву ПГ-10Н-01 дозволяє отримати наплавлений шар, який має композиційну будову.

Проведений рентгеноструктурний фазовий аналіз наплавлених шарів довів їх фазову нерівномірність на макро- та мікрорівнях із виявленими фазами  $\gamma$ -Ni, Ni<sub>3</sub>B, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, B<sub>4</sub>C, TiC, SiC (рис. 4).

Методом скануючої електронної мікроскопії з енергодисперсійним аналізом уздовж лінії сканування визначено розподіл елементів шару, наплавленого сплавом ПГ-10Н-01 (рис. 5), і шару, наплавленого композиційним матеріалом складу 10% МКМ + 90% ПГ-10Н-01 (рис. 6).

При вимірюванні мікротвердості виявлено, що середня мікротвердість шару, наплавленого сплавом ПГ-10Н-01, складає 510 НV (рис. 7, а). Мікротвердість шару, наплавленого композиційним матеріалом складу 10% МКМ + 90% ПГ-10Н-01, становить 660 НV (рис. 4, б). При збільшенні кількості доданого МКМ до сплаву ПГ-10Н-01 мікротвердість наплавлених шарів підвищується та становить 720 НV при 20% МКМ і 760 НV при 30% МКМ. Стабільний розподіл значень мікротвердості шару, наплавленого композиційним матеріалом (рис. 7, б), свідчить про рівномірне розповсюдження в матричному матеріалі карбідних включень TiC та SiC [16].

Результати випробувань зносостійкості в умовах

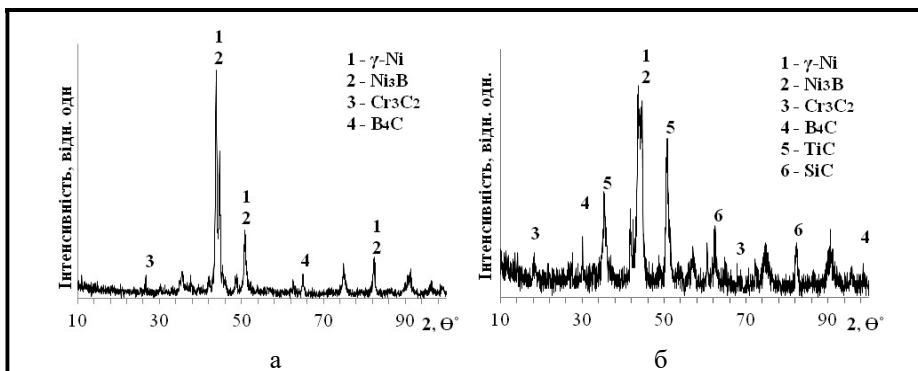
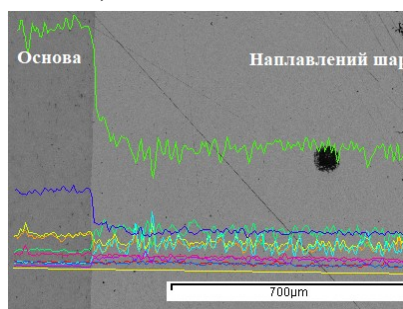


Рис. 4. Дифрактограми наплавлених шарів: а – ПГ-10Н-01; б – 10% МКМ + 90% ПГ-10Н-01



ділянка аналізу

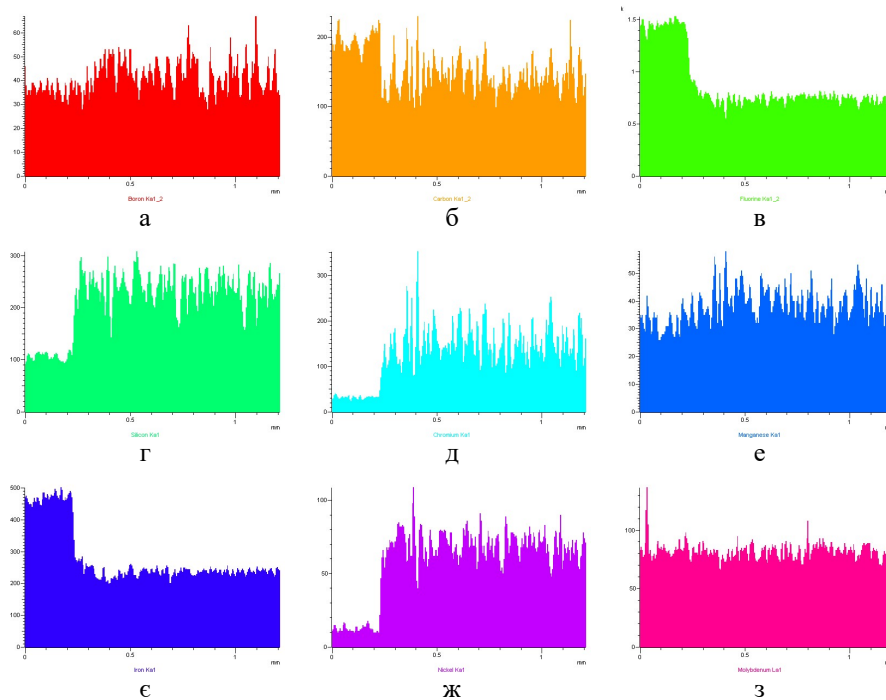
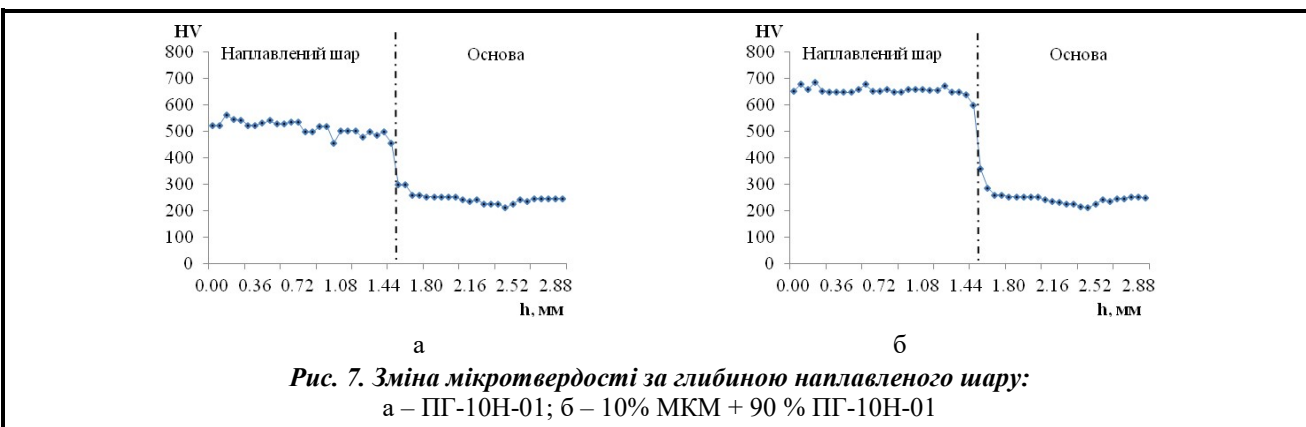
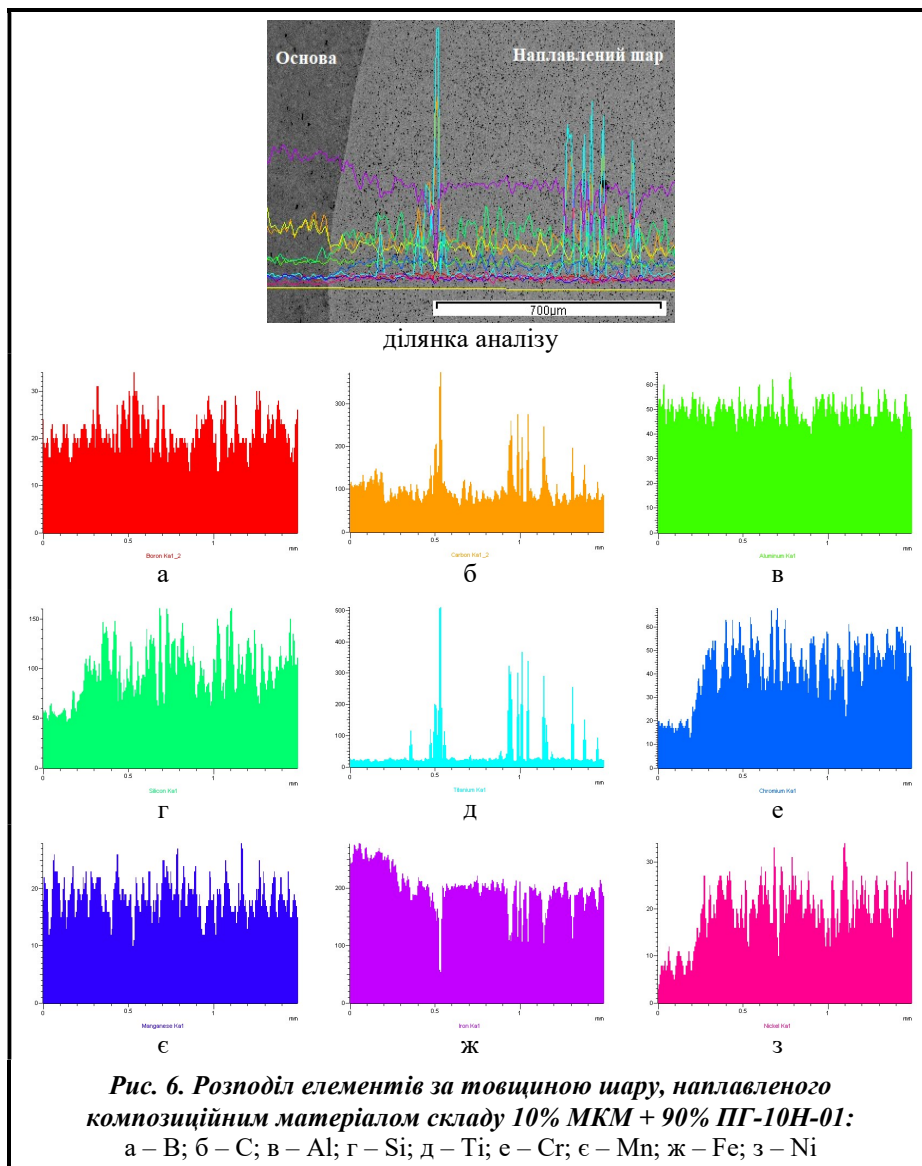


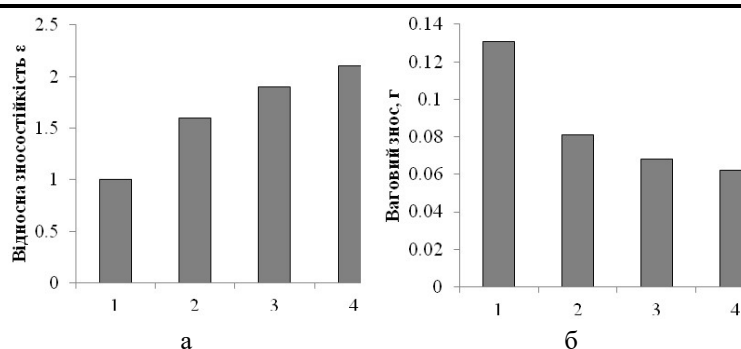
Рис. 5. Розподіл елементів шару, наплавленого сплавом ПГ-10Н-01: а – В; б – С; в – F; г – Si; д – Cr; е – Mn; е – Fe; ж – Ni; з – Mo

тертя незакріпленим абразивом представлено на рис. 8. Шари, наплавлені композиційним матеріалом, мають підвищену зносостійкість у порівнянні з шарами, наплавленими сплавом ПГ-10Н-01. Шар, наплавлений композиційним матеріалом складу 10% МКМ + 90% ПГ-10Н-01, має в 1,6 разів більшу зносостійкість порівняно зі зносостійкістю шару, наплавленого сплавом ПГ-10Н-01. Збільшення кількості доданого МКМ сприяє підвищенню зносостійкості шару. Так, при вмісті 20% МКМ зносостійкість шару більша у 1,9 рази, а при 30% МКМ – у 2,1 рази. Таке підвищення зумовлене добавками TiC та SiC, які зміцнюють твердий розчин нікелю  $\gamma$ -Ni й евтектику  $\gamma$ -Ni-Ni<sub>3</sub>B. Залежність показника відносної зносостійкості наплавлених шарів від кількості доданого МКМ до сплаву ПГ-10Н-01 наведена на рис. 9.

Морфологія поверхонь тертя в умовах абразивного зношування незакріпленим абразивом наплавлених

шарів наведена на рис. 10. Поверхня тертя шару, наплавленого сплавом ПГ-10Н-01, має риски глибиною до 12 мкм (рис. 10, а). Поверхня тертя шару, наплавленого композиційним матеріалом складу 10% МКМ + 90% ПГ-10Н-01, має риски до 7 мкм (рис. 10, б).



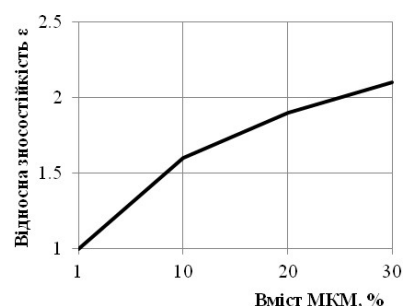


**Рис. 8. Зносостійкість наплавлених шарів у процесі абразивного зношування незакріпленим абразивом:**

а – відносна зносостійкість; б – знос наплавлених шарів;

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



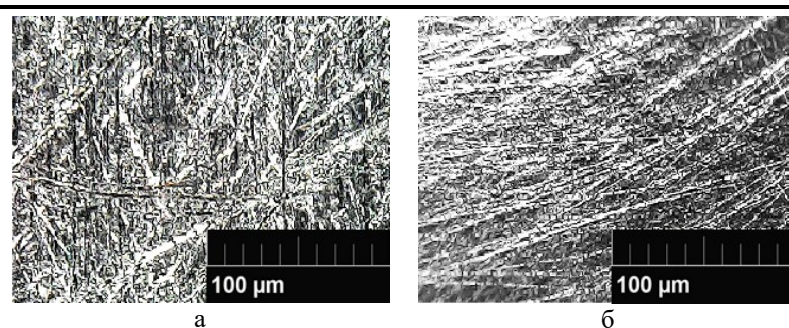
**Рис. 9. Відносна зносостійкість шарів, наплавлених композиційним матеріалом, залежно від вмісту МКМ**

На рис. 11 наведено результати скануючої електронної мікроскопії поверхні тертя шару, наплавленого сплавом ПГ-10Н-01. Встановлено, що зношування шару відбувається за механізмом спрацювання більш м'яких фаз: твердого розчину нікелю й евтектики, утвореної на його основі (рис. 11, а). Поверхня тертя шару, наплавленого композиційним матеріалом складу 10% МКМ + 90% ПГ-10Н-01, має більш дисперсну структуру твердого розчину й евтектику з твердими включеннями, які підвищують стійкість такого шару до абразивного зношування (рис. 11, б).

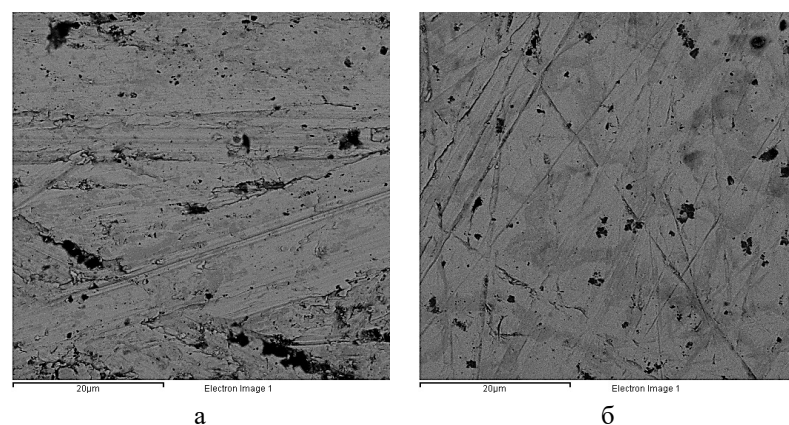
Експлуатаційні випробування композиційного матеріалу були проведені в умовах фермерського господарства «Кам'януватка» (Новоукраїнський район, Кіровоградська область) [18]. Для випробувань використаний комплект стрілчастих лоп, на носок і робочі леза яких зі зворотнього боку було наплавлено шар композиційного матеріалу складу 10% МКМ+ 90% ПГ-10Н-01. Наплавлення

здійснювали неплавким графітовим електродом діаметром 9,5 мм при струмі 110 А на прямій полярності з використанням інверторного джерела живлення СВ-290НК. Дослідний комплект деталей встановлювався до напівпрічипного культиватора КПП-8, агрегованого з трактором New Holland T6090, при обробітку чорнозему звичайного на глибину 100–110 мм з робочою швидкістю культиватору 7 км/год.

Проведені випробування показали, що після обробітку площі в 5 га лінійний знос носка незміцненої стрілчастої лапи склав 4,2 мм, що на 1,7 мм більше у порівнянні зі зносом носка лапи, зміцненої композиційним матеріалом зі зворотнього боку. Знос робочих поверхонь лез стандартних лоп



**Рис. 10. Морфологія поверхонь тертя:**  
а – ПГ-10Н-01; б – 10% МКМ + 90% ПГ-10Н-01



**Рис. 11. Мікроструктура поверхонь тертя:**  
а – ПГ-10Н-01; б – 10% МКМ + 90% ПГ-10Н-01

складав 2,1 мм і 1,2 мм у зміцнених. Відносна зносостійкість стрілчастих лап зі сталі 65Г, зміцнених зі зворотного боку шляхом наплавлення шару композиційного матеріалу, отриманого з використанням СВС-процесу, є в 1,7 рази більшою порівняно зі зносостійкістю стрілчастих лап, виготовлених за стандартною технологією.

## Висновки

Досліджено структуру, фазовий склад і властивості шарів, наплавлених самофлюсівним сплавом системи NiCrBSi з додавання модифікуючого композиційного матеріалу (МКМ), отриманого самопоширюваним високотемпературним синтезом.

Структура шару, наплавленого сплавом ПГ-10Н-01, складається з твердого розчину нікелю ( $\gamma$ -Ni) й евтектики, утвореної на його основі з боридною фазою  $Ni_3B$ . Структура шару, наплавленого композиційним матеріалом складу 10% МКМ + 90% ПГ-10Н-01, складається з твердого розчину нікелю й евтектики, які додатково зміцнені карбідами TiC та SiC. При збільшенні вмісту МКМ кількість карбідів TiC і SiC зростає, що сприяє збільшенню мікротвердості і зносостійкості.

Мікротвердість шару, наплавленого композиційним матеріалом складу 10% МКМ + 90% ПГ-10Н-01, становить 660 HV, що перевищує мікротвердість шару, наплавленого сплавом ПГ-10Н-01, яка складає 510 HV.

Абразивна зносостійкість шару, наплавленого композиційним матеріалом складу 10% МКМ + 90% ПГ-10Н-01, в умовах зношування незакріпленими абразивними частинками більша в 1,6 рази у порівнянні зі зносостійкістю шару, наплавленого сплавом ПГ-10Н-01.

Проведені експлуатаційні випробування в умовах Фермерського господарства «Кам'януватка» довели, що відносна зносостійкість стрілчастих лап, зміцнених отриманим композиційним матеріалом, у 1,7 рази більша у порівнянні із зносостійкістю лап, виготовлених за стандартною технологією.

## Література

1. 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>.
2. 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>.
3. 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>.
4. Buytoz S., Ulutan M., Islak S., Kurt B., Nuri Ç. Microstructural and wear characteristics of high velocity oxygen fuel (HVOF) sprayed NiCrBSi–SiC composite coating on SAE 1030 steel. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2013. Vol. 38. Iss. 6. P. 1481–1491. <https://doi.org/10.1007/s13369-013-0536-y>.
5. Chen J., Dong Y., Wan L., Yang Y., Chu Z., Zhang J., He J., Li D. Effect of induction remelting on the microstructure and properties of in situ TiN-reinforced NiCrBSi composite coatings. *Surface and Coatings Technology*. 2018. Vol. 340. P. 159–166. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.02.024>.
6. Стороженко М. С. Механізми зношування плазмових покриттів системи NiCrBSi–TiB<sub>2</sub> в умовах тертя та ковзання без мастила. *Проблеми трибології*. 2013. Т. 70. № 4. С. 121–128.
7. Cai B., Tan Y., Tan H., Jing Q., Zhang Z. Tribological behavior and mechanism of NiCrBSi–Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite coatings. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2013. Vol. 23. Iss. 7. P. 2002–2010. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(13\)62689-8](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(13)62689-8).
8. 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>.
9. Niyomwas S. Synthesis and characterization of silicon-silicon carbide composites from rice husk ash via self-propagating high temperature synthesis. *Journal of Metals, Materials and Minerals*. 2009. Vol. 19. No. 2. P. 21–25.
10. Liang Y. H., Wang H. Y., Yang Y. F., Zhao R. Y., Jiang Q. C. Effect of Cu content on the reaction behaviors of self-propagating high-temperature synthesis in Cu–Ti–B<sub>4</sub>C system. *Journal of Alloys and Compounds*. 2008. Vol. 462. Iss. 1–2. P. 113–118. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2007.08.033>.

11. Warner T. E., Clausen A. K., Poulsen M. G. Self-propagating high-temperature synthesis of titanium carbide: An educational module using a wooden block reactor. *International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis*. 2019. Vol. 28. Iss. 1. P. 56–63. <https://doi.org/10.3103/S106138621901014X>.
12. Ющенко К. А., Борисов Ю. С., Кузнецов В. Д., Корж В. М. Інженерія поверхні. Київ: Наукова думка, 2007. 553 с.
13. Sytnykov P. A. Plasma coatings based on self-fluxing NiCrBSi alloy with improved wear resistance properties. *Journal of Mechanical Engineering – Problemy Mashynobuduvannia*. 2023. Vol. 26. No. 3. P. 54–64. <https://doi.org/10.15407/pmach2023.03.054>.
14. Лузан С. О., Ситников П. А. Дослідження впливу параметрів механічної активації шихти Ti–C–Al–SiO<sub>2</sub>–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–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>.
15. Лузан С. О., Ситников П. А. Дослідження особливостей ініціювання процесу самопоширюваного високо-температурного 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>.
16. Лузан С. О., Ситников П. А. Структура та властивості наплавлених шарів композиційним матеріалом, який одержано з використанням СВС-процесу. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*. 2023. Т. 323. № 4. С. 194–201. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-323-4-194-201>.
17. Студент М. М., Войтович А. А., Сірак Я. Я., Гвоздецький В. М. Розробка нових електродних матеріалів, методів відновлення і захисту тонкостінних деталей обладнання, які експлуатуються в умовах абразивного та газоабразивного зношування. *Автоматичне зварювання*. 2020. № 10. С. 34–37. <https://doi.org/10.37434/as2020.10.06>.
18. Ситников П. А., Лузан С. О. Досвід електродугового наплавлення зміцнюючих шарів деталей ґрунтообробних машин. Теоретичні та практичні дослідження молодих вчених: зб. тез доп. 17-ї Міжнар. наук.-практ. конф. магістрантів та аспірантів, Харків, НТУ «ХПІ», 28–30 листопада 2023 р. Харків: НТУ «ХПІ», 2023. С. 469.

Надійшла до редакції 27.11.2023