

ЛУЗАН СЕРГІЙ

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

ORCID ID: [0000-0002-4808-0017](https://orcid.org/0000-0002-4808-0017)e-mail: [khadi.luzan@gmail.com](mailto:khadi.luzan@gmail.com)

СИТНИКОВ ПАВЛО

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

ORCID ID: [0000-0001-6656-0180](https://orcid.org/0000-0001-6656-0180)e-mail: [pavel.welder@ukr.net](mailto:pavel.welder@ukr.net)

## СТРУКТУРА ТА ВЛАСТИВОСТІ НАПЛАВЛЕНИХ ШАРІВ КОМПОЗИЦІЙНИМ МАТЕРІАЛОМ, ЯКИЙ ОДЕРЖАНО З ВИКОРИСТАННЯМ СВС-ПРОЦЕСУ

В роботі наведено результати теоретичних та експериментальних досліджень щодо розробки композиційного матеріалу, одержаного з використанням самопоширюваного високотемпературного синтезу (СВС-процес). В якості вихідних матеріалів модифікуючої складової композиційного матеріалу використано порошок титану Ti, технічний вуглець C, оксиди кремнію SiO<sub>2</sub> та алюмінію Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, алюмінієву пудру Al, оксид заліза Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> та терморезаючий порошок ПТ-НА-01. Механічну активацію вихідної шихти з варіюванням параметрів обробки здійснено у розробленому авторами роботи кульовому млині моделі КМ-1 з об'ємом сталевого барабану 1,5·10<sup>-4</sup> м<sup>3</sup>. Тривалість механічної активації шихти складала 15 хв, при 130 об/хв та співвідношенні 1 : 40 маси шихти до маси тіл подрібнення (сталевих куль діаметром 6 мм). Ініціювання СВС-процесу виконувалося за допомогою спеціального пристрою шляхом підведення розжареної ніхромової спіралі діаметром 0,8 мм. Як матричний матеріал застосовано самофлюсуючий сплав системи Ni-Cr-B-Si марки ПГ-10Н-01. Наплавлення дослідних зразків здійснено на пластину зі сталі 65Г товщиною 3 мм неплавким графітовим електродом діаметром 9,5 мм, при струмі 110 А на прямій полярності. При виконанні роботи за допомогою методів металографічного аналізу та електронної мікроскопії досліджено мікроструктуру наплавлених шарів, проведено їх рентгенофазовий аналіз, а також визначено мікротвердість та зносостійкість. Встановлено, що введення в склад композиційного матеріалу на основі сплаву ПГ-10Н-01 модифікуючого матеріалу, одержаного з використанням СВС-процесу, дозволяє отримати в структурі наплавленого шару карбіди титану TiC та кремнію SiC, що призводить до збільшення мікротвердості шару та його більш високої зносостійкості у процесі абразивного зношування. Розроблений композиційний матеріал можна рекомендувати для підвищення ресурсу деталей, які працюють в умовах абразивного середовища.

Ключові слова: ресурс, СВС-процес, шихта, механічна активація, композиційний матеріал, карбід, наплавлення, твердість, деталі машин.

LUZAN SERGII

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»

SYTNYKOV PAVLO

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»

## STRUCTURE AND PROPERTIES OF DEPOSITED COATINGS OF COMPOSITE MATERIAL OBTAINED USING THE SHS PROCESS

The study presents the results of theoretical and experimental investigations on the development of composite material obtained using the method of self-propagating high-temperature synthesis (SHS process). Titanium powder Ti, carbon black C, silicon oxides SiO<sub>2</sub> and aluminum oxides Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, as well as aluminum powder Al, iron oxide Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, and thermosetting powder PT-NA-01 were used as starting materials for the modifying component. Mechanical activation of the initial charge with variation of processing parameters was carried out in a ball mill of the KM-1 model, developed by the authors of the study, of the intermittent principle of operation with a working steel drum volume of 1.5·10<sup>-4</sup> m<sup>3</sup>. The duration of mechanical activation of the charge was 15 minutes at 130 rpm and a ratio of 1:40 of the charge mass to the mass of grinding media (steel balls with a diameter of 6 mm). Initiation of the SHS process was performed using a special device by supplying a red-hot nichrome spiral with a diameter of 0.8 mm. A self-fluxing alloy of the Ni-Cr-B-Si system, grade PG-10N-01, was used as a matrix material. The prototypes were surfaced on a 3 mm thick plate of 65G steel with a non-consumable graphite electrode with a diameter of 9.5 mm, at a current of 110 A in direct polarity. The macro- and microstructure of the coatings was studied, their X-ray diffraction analysis and scanning electron microscopy were performed, and the mechanical properties of the coatings, including their microhardness and wear resistance, were determined. Based on the studies, it was found that the introduction of a modifying component into the matrix material obtained using the SHS process allows to obtain titanium TiC and silicon SiC carbides in the coating structure, which increase the microhardness of the deposited layer and, accordingly, its wear resistance. The developed composite material can be recommended for increasing the service life of parts that work in abrasive environments.

Keywords: resource, SHS-process, charge, mechanical activation, composite material, carbide, surfacing, hardness, machine parts.

### Постановка проблеми

Однією з актуальних проблем сучасного матеріалознавства є розробка композиційних матеріалів та технологій їх нанесення на поверхні деталей машин, які працюють в умовах абразивного середовища, високих швидкостей та силових навантажень [1–3]. Композиційні матеріали (КМ) – це гетерофазні матеріали, окремі фази яких виконують задані спеціальні функції. КМ вдається поєднувати в собі переваги кожного вихідного компоненту, оскільки їх властивості формуються за рахунок додавання компонентів (адитивність), або за рахунок їх спільного посилення (синергізм) [4].

### Аналіз останніх джерел

На основі аналізу робіт [5–12] було встановлено, що перспективним методом одержання КМ є метод самопоширюваного високотемпературного синтезу (СВС-процес). Фізична основа СВС-процесу полягає у локальному ініціюванні екзотермічних реакцій між вихідними компонентами, що дозволяє утворювати значну кількість тепла у хвили горіння, яка самостійно проходить через всі вихідні компоненти, утворюючи продукти синтезу з прогнозованим складом, структурою та властивостями. До головних переваг СВС-процесу відносять суттєве зниження енерговитрат завдяки використанню екзотермічного ефекту реакції, високу швидкість процесу, просте та малогабаритне обладнання. Ретроспективний аналіз розвитку СВС-процесу, проблеми та перспективи цього напрямку ґрунтовно досліджено в роботах [13, 14].

Важливим чинником під час розробки КМ є вибір вихідних компонентів, який проводять з урахуванням вартості та технології їх отримання [1]. Відомо, що наявність в структурі наплавленого шару карбідів тугоплавких металів типу TiC, SiC, VC, WC, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> та ін. підвищує твердість та зносостійкість металу, який працює в умовах абразивного середовища. Проте собівартість цих карбідів залишається достатньо високою, що обумовлює необхідність розробки технології їх одержання з використанням більш дешевої та доступної сировини [1, 4].

**Метою роботи** є дослідження структури, фазового складу та властивостей наплавленого шару композиційним матеріалом, який одержаний з використанням СВС-процесу.

### Матеріали та методика проведення досліджень

Одержання композиційного матеріалу з використанням СВС-процесу здійснювали у два етапи. На першому етапі було одержано модифікуючий композиційний матеріал (МКМ) шляхом змішування порошків титану Ti марки ПТМ-1, технічного вуглецю С марки П-803, оксидів кремнію SiO<sub>2</sub> та алюмінію Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, які додані у вигляді вогнетривкої глини марки ПГОСА-0, алюмінієвої пудри Al марки ПАП-1, оксиду заліза Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> та термореагуючого порошку марки ПТ-НА-01. Співвідношення компонентів в шихті було еквімолярним, щоб під час подальшого проходження СВС-процесу відбувся синтез карбідів титану TiC та кремнію SiC стехіометричного складу. Гранулометричний показник всіх вихідних компонентів на перевищував розміру 100 мкм. Змішування та механічна активація шихти проводилася у кульовому млині моделі КМ-1 (рис. 1) з об'ємом сталевого барабану  $1,5 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup> протягом 15 хв, при 130 об/хв та співвідношення 1 : 40 маси шихти до маси тіл подрібнення (сталевих куль діаметром 6 мм) [15]. Кількість обертів барабану вимірювалася тахометром. Після проведення механоактивації максимальний розмір частинок шихти не перевищував значення 40 мкм [16].

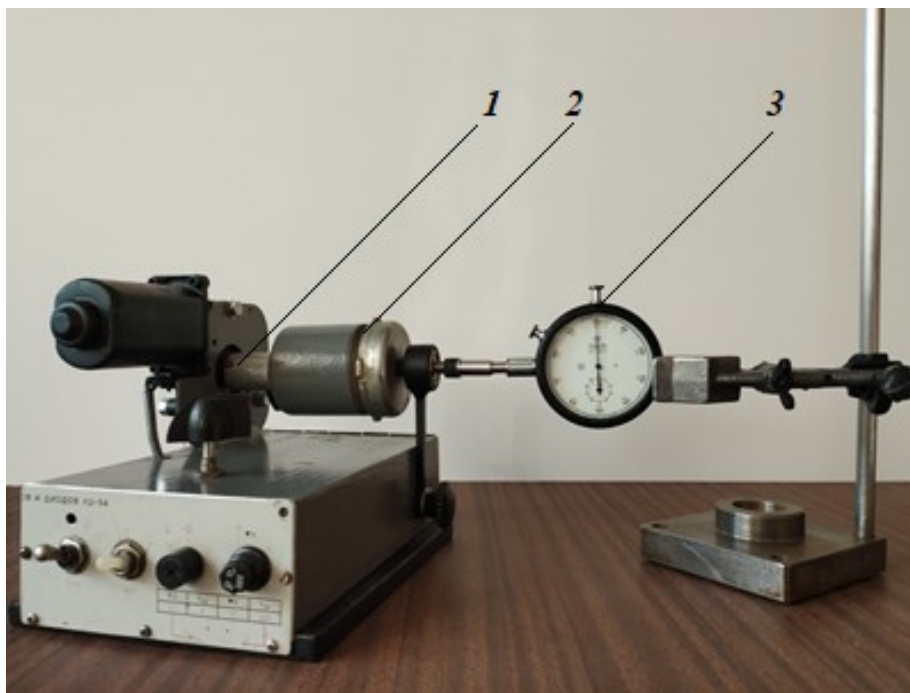


Рис. 1. Кульовий млин моделі КМ-1:  
1) привід барабана; 2) сталевий барабан; 3) тахометр

До отриманої шихти додавали 10 % клею «Metylan», перемішували до пастоподібного стану та з використанням спеціальної прес форми та ручного гвинтового пресу отримували циліндричний зразок діаметром 16 мм та висотою 20 мм.

Ініціювання СВС-процесу (рис. 2, а) отриманого зразку 1 здійснювали після його сушіння протягом 72 годин в середовищі аргону Ar чистотою 98 % за допомогою спеціального пристрою [17] від нагрітої ніхромової спіралі 2 діаметром 0,8 мм (рис. 2, б). Вихідна температура зразка на початку реакції становила

25 °С. Після початку СВС-процесу (рис. 2, в) ніхромову спіраль відводили вбік (рис. 2, г).

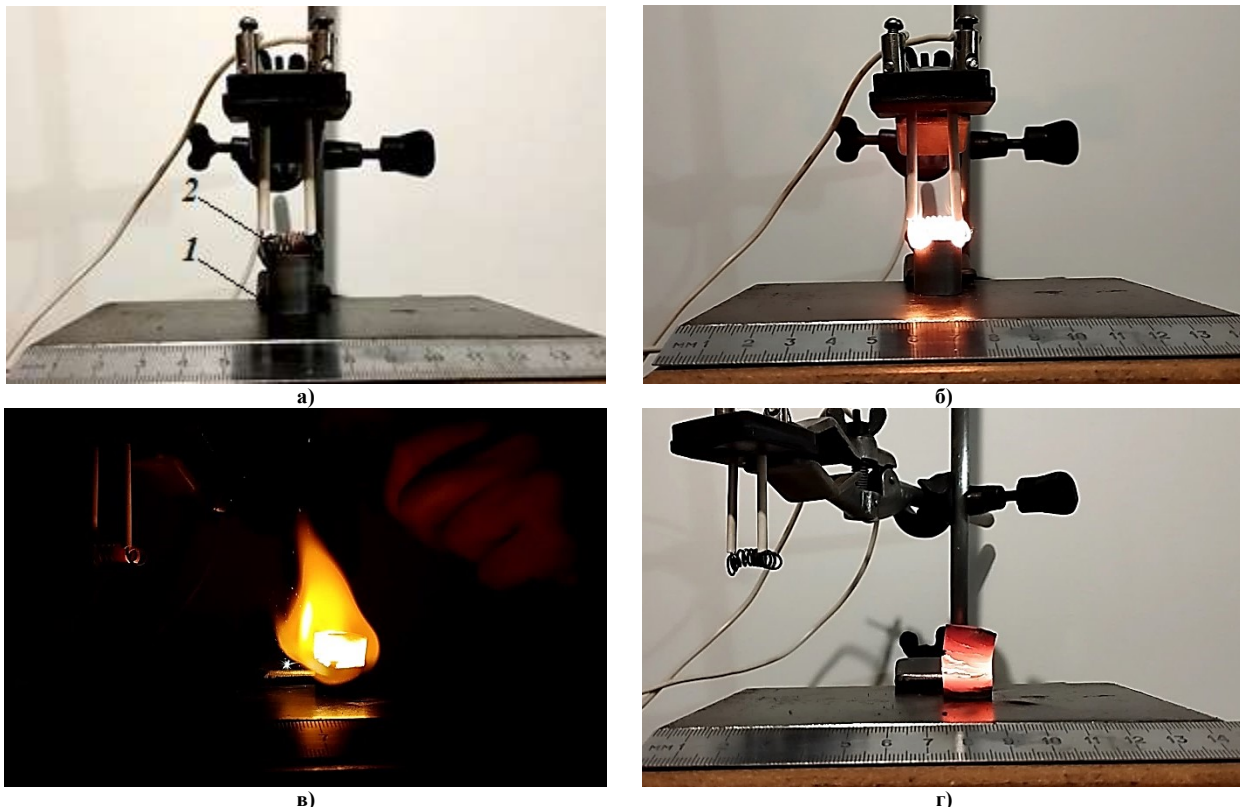


Рис. 2. Етапи ініціювання СВС-процесу: а) зразок з шихти (1) з підведеною спіраллю (2); б) початок підігріву зразку; в) СВС-процес; г) охолодження спіку

На другому етапі одержаний спік дробили до порошкового стану, потім в кількості від 10 до 30 % МКМ додавали в матричний матеріал – самофлюсуєючий сплав системи Ni-Cr-B-Cr марки ПГ-10Н-01 та змішували в кульовому млині протягом 15 хвилин. Одержаний композиційний матеріал (КМ) 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 – 120 А, на прямій полярності. В якості джерела живлення використовували зварювальний інвертор постійного струму моделі СВ-290 НК.

Для дослідження мікроструктури та фазового складу наплавлених шарів були використані методи металографічного аналізу (мікроскоп Неофон-32, оснащений приставкою для цифрової зйомки), електронної мікроскопії (скануючий електронний мікроскоп Tescan Mira 3LMU з встановленим енергодисперсійним спектрометром Oxford X-max) та рентгеноструктурного аналізу (рентгеновський дифрактометр Rigaku Ultima-IV). Травлення дослідних зразків проводили у 4 %-му розчині азотної кислоти  $\text{HNO}_3$  в етиловому спирті. Вимірювання мікротвердості наплавлених шарів здійснювали з використанням мікротвердоміру ПМТ-3 при навантаженні 0,1 кг на алмазну піраміду.

Для дослідження зносостійкості наплавлених шарів застосовувалася машина тертя ХБ-4 з використанням зразків циліндричної форми діаметром 4 мм та висотою 15 мм, які зношувалися своїм торцем по поверхні абразивної шкурки, закріпленої на торці диску, який обертався. Діаметр диску дорівнював 200 мм, шлях тертя зразку становив 20 м. Наплавлений зразок притискався до абразивної шкурки з навантаженням 1 кг. Зношування зразка здійснювалося по новій поверхні шкурки, для цього 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 наплавлених шарів КМ проводилася в порівнянні з величиною зносу шару наплавленого матричним матеріалом ПГ-10Н-01. Величина зносу наплавленого шару визначалася ваговим методом із застосуванням аналітичних ваг ВЛР-200.

#### Виклад основного матеріалу

Раніше виконаними дослідженнями мікроструктури наплавлених шарів сплаву ПГ-10Н-01 було встановлено, що структура шару має дендритний характер (рис. 3, а) [8]. Мікроструктурою КМ є матричний матеріал із самофлюсуєючого сплаву ПГ-10Н-01, в якому рівномірно розподілені тверді включення (рис. 3, б), причому зі збільшенням вмісту МКМ їх кількість збільшується (рис. 3, в).

Дослідженнями з використанням скануючої електронної мікроскопії та енергодисперсійного аналізу встановлено, що мікроструктура наплавлених шарів має типову морфологію, яка формується під час кристалізації зі спрямованим відведенням тепла. Методом рентгеноструктурного аналізу з використанням дифрактометра Rigaku Ultima-IV доведено фазову нерівномірність наплавленого шару на макрорівні. Встановлено, що основу наплавленого шару ПГ-10Н-01 складає  $\gamma$ -твердий розчин нікелю ( $\gamma$ -Ni) та боридна

фаза  $Ni_3B$  (рис. 4, а). Також, в шарі КМ зустрічаються включення карбідів хрому  $Cr_3C_2$  та бору  $B_4C$ . В шарі КМ складу 10 % МКМ + 90 % ПГ-10Н-01, крім основних фаз  $\gamma-Ni$  та бориду нікелю  $Ni_3B$  виявлені фази карбідів титану  $TiC$  та кремнію  $SiC$  (рис. 4, б).

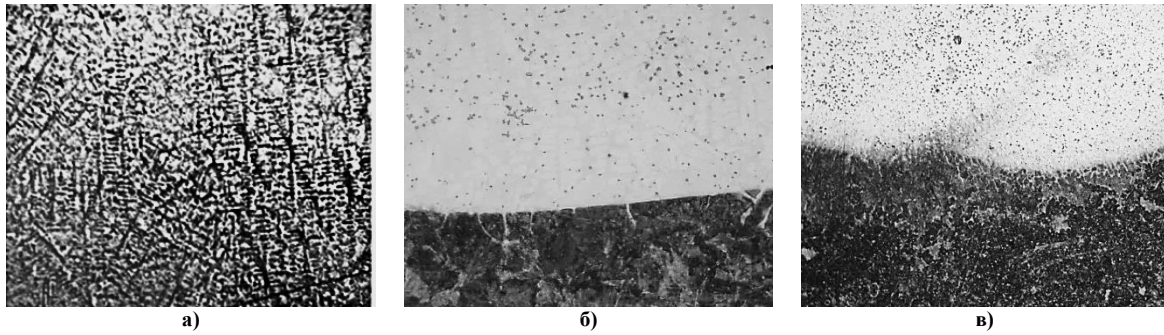


Рис. 3. Мікроструктура наплавлених шарів: а) ПГ-10Н-01; б) КМ (10 % МКМ – 90 % ПГ-10Н-01); в) КМ (30 % МКМ – 70 % ПГ-10Н-01) (x 400)

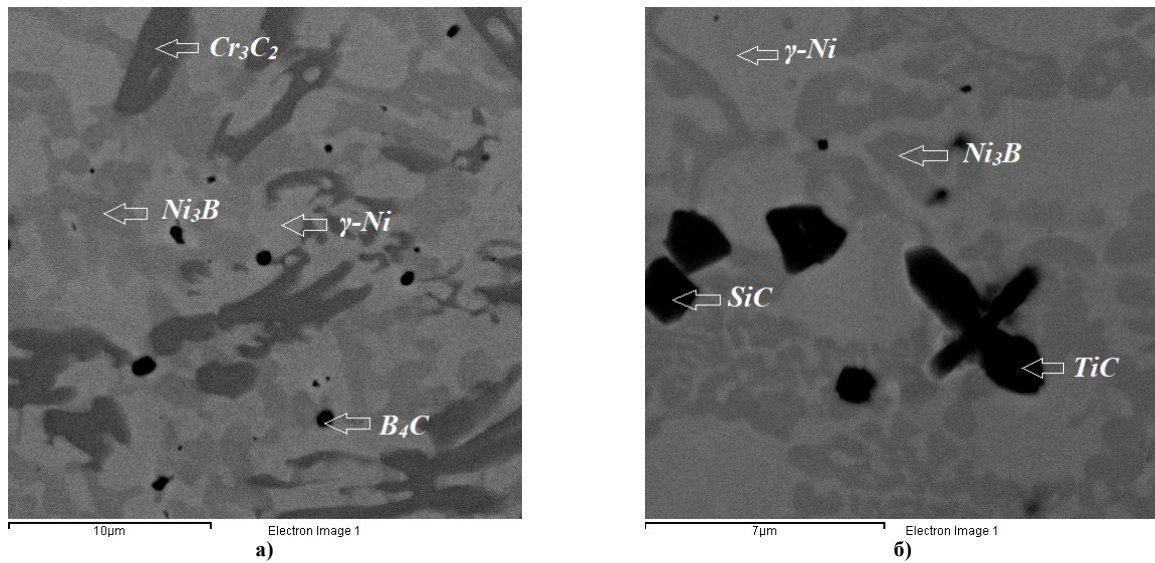


Рис. 4. Мікроструктура та фазовий склад наплавлених шарів: а) ПГ-10Н-01; б) КМ (10 % МКМ – 90 % ПГ-10Н-01)

Наявність виявлених фаз  $\gamma-Ni$ ,  $Ni_3B$ ,  $Cr_3C_2$ ,  $B_4C$ ,  $TiC$ ,  $SiC$  підтверджено і результатами рентгенофазового аналізу наплавлених шарів (рис. 5).

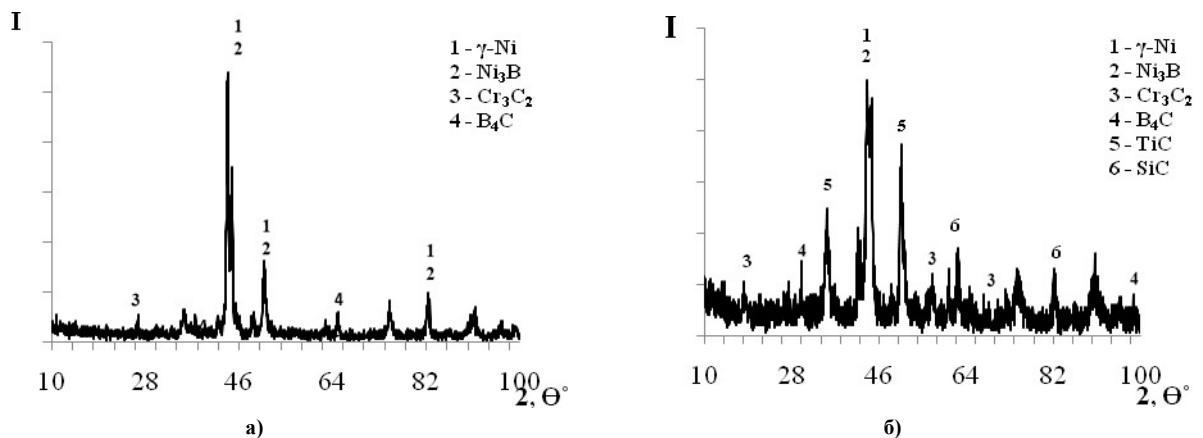


Рис. 5. Рентгенофазний аналіз наплавлених шарів: а) ПГ-10Н-01; б) КМ (10 % МКМ – 90 % ПГ-10Н-01)

Мікротвердість наплавлених шарів, заміряна у напрямі від поверхні наплавленого шару до поверхні основи, представлена на рис. 6.

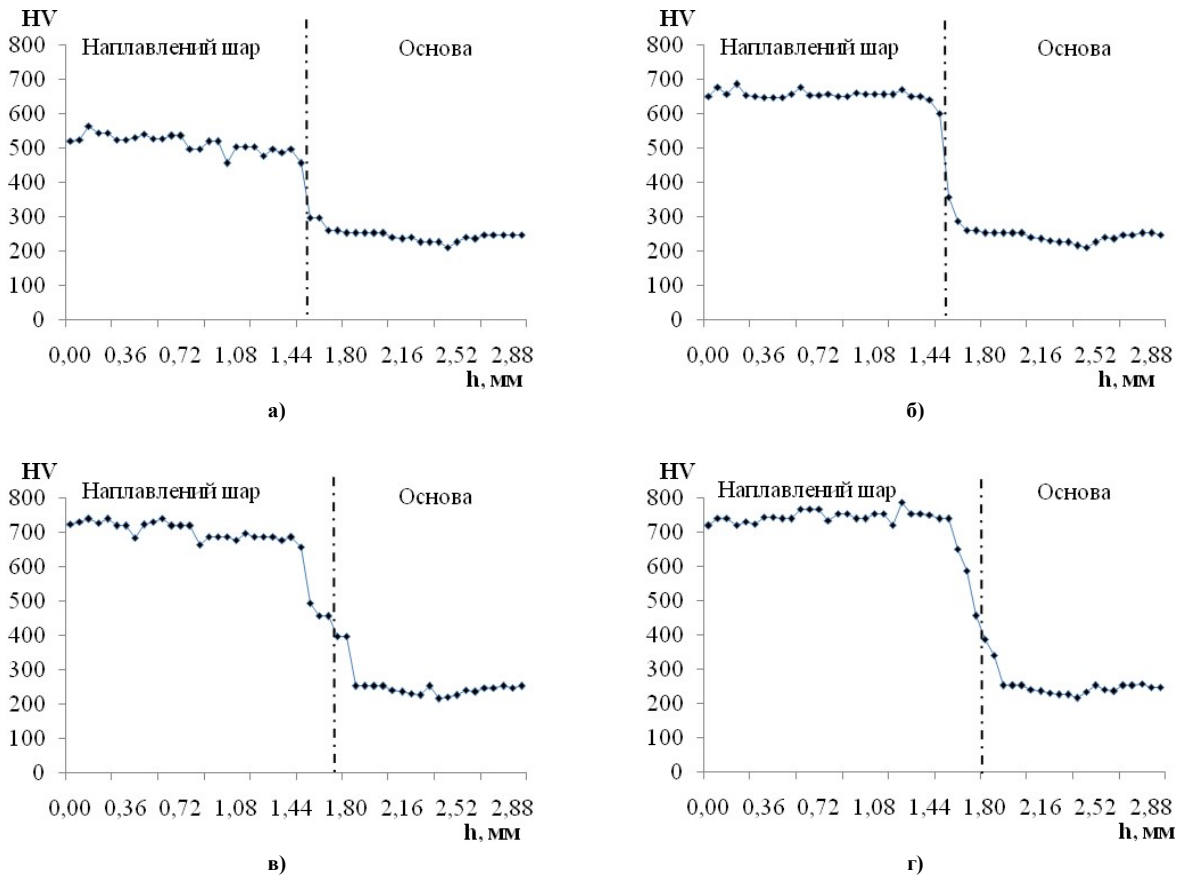


Рис. 6. Зміна мікротвердості (HV) наплавленого шару у напрямку від поверхні наплавленого шару до поверхні основи: а) ПГ-10Н-01; б) КМ (10 % МКМ – 90 % ПГ-10Н-01); в) КМ (20 % МКМ – 80 % ПГ-10Н-01); г) КМ (30 % МКМ – 70 % ПГ-10Н-01)

Середня мікротвердість наплавленого шару КМ (10 % МКМ + 90 % ПГ-10Н-01) становить 660 HV, шару КМ (20 % МКМ + 80 % ПГ-10Н-01) – 720 HV і шару КМ (30 % МКМ + 70 % ПГ-10Н-01) – 760 HV, що перевищує середню мікротвердість покриття ПГ-10Н-01, яка дорівнює 510 HV. Стабільний характер розподілу мікротвердості шарів КМ свідчить про рівномірне розповсюдження твердих включень в наплавлених шарах, при чому зі збільшенням в КМ кількості МКМ мікротвердість збільшується.

Результати досліджень зносостійкості наплавлених шарів представлено на рис. 7.

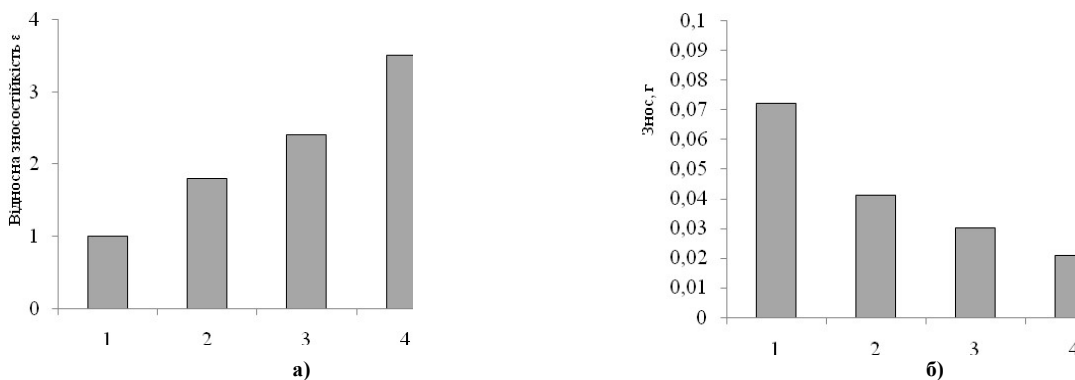


Рис. 7. Зносостійкість наплавлених шарів в процесі абразивного зношування: (а) – відносна зносостійкість; (б) – знос наплавлених шарів; 1) ПГ-10Н-01; 2) КМ (10 % МКМ – 90 % ПГ-10Н-01); 3) КМ (20 % МКМ – 80 % ПГ-10Н-01); 4) КМ (30 % МКМ – 70 % ПГ-10Н-01)

Наплавлені шари КМ мають більш високу абразивну зносостійкість в порівнянні з самофлюсуючим сплавом ПГ-10Н-01, що пояснюється наявністю в наплавленому шарі карбідів хрому  $Cr_3C_2$ , бору  $V_4C$ , титану  $TiC$ , кремнію  $SiC$  та бориду нікелю  $Ni_3B$ . Зі збільшенням вмісту в КМ кількості МКМ зносостійкість наплавлених шарів в процесі абразивного зношування збільшується (рис. 8).

Морфологія поверхонь тертя також збігається з результатами випробувань на зносостійкість. Поверхня тертя наплавленого шару ПГ-10Н-01 має риски глибиною до 20 мкм (рис. 9, а). Поверхні тертя КМ мають риски глибиною до 10 мкм, причому зі збільшенням вмісту в КМ кількості МКМ їх глибина зменшується (рис. 9, б, в, г).

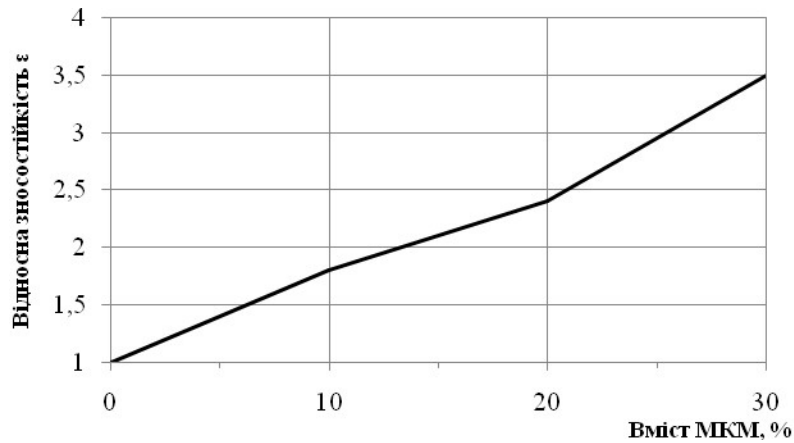


Рис. 8. Відносна зносостійкість шарів КМ в залежності від вмісту МКМ

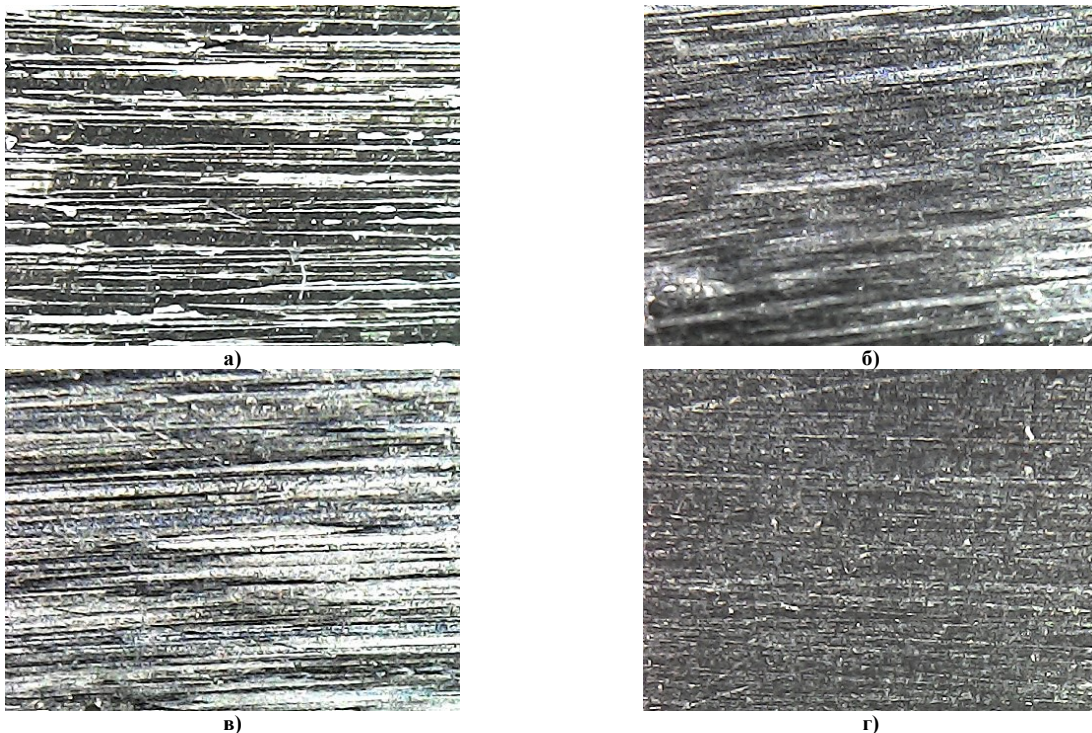


Рис. 9. Морфологія поверхонь тертя: а) ПГ-10Н-01; б) КМ (10 % МКМ – 90 % ПГ-10Н-01); в) КМ (20 % МКМ – 80 % ПГ-10Н-01); г) КМ (30 % МКМ – 70 % ПГ-10Н-01) (x 400)

Це зумовлено тим, що в КМ сформована структура на основі нікелевої матриці, в якій рівномірно розподілені карбіди титану  $TiC$ , кремнію  $SiC$ , хрому  $Cr_3C_2$ , бору  $B_4C$  та борид нікелю  $Ni_3B$ , які мають високу твердість та підвищують зносостійкість шару при роботі в абразивному середовищі.

### Висновки

Наплавленні шари композиційного матеріалу складу 10 – 30 % МКМ + 90 – 70 % ПГ-10Н-01 містять в структурі тверді включення у вигляді карбідів титану  $TiC$ , кремнію  $SiC$ , хрому  $Cr_3C_2$ , бору  $B_4C$  та бориду нікелю  $Ni_3B$ , які забезпечують середню мікротвердість шару 660 – 760 HV та підвищують його зносостійкість.

Встановлено, що в процесі абразивного зношування зносостійкість шару КМ (10 % МКМ + 90 % ПГ-10Н-01) у 1,8 рази, КМ (20 % МКМ + 80 % ПГ-10Н-01) у 2,4 разів, а КМ (30 % МКМ + 90 % ПГ-10Н-01) у 3,5 рази є вищою у порівнянні із зносостійкістю шару самофлюсуючого сплаву ПГ-10Н-01.

Розроблений композиційний матеріал можна рекомендувати для підвищення ресурсу деталей, які працюють в умовах абразивного середовища.

### Література

1. Уманський О.П. Композиційні матеріали на основі карбіду кремнію для компактних виробів та газотермічних покриттів / О.П. Уманський, А.Г. Довгаль, В.Л. Сироватка та ін. – Київ : Наукова думка НАН України, 2022. – 126 с.

2. Федірко В.М. Хіміко-термічна обробка титанових сплавів. Поверхнєве твердорозчинне модифікування / В.М. Федірко, І.М. Погрелюк, О.Г. Лук'яненко та ін. – Київ : Наукова думка НАН України, 2020. – 183 с.
3. Лузан С.А. Критерии выбора способа восстановления деталей машин и определение рационального маршрута технологии / С.А. Лузан // Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. – 2017. – № 183. – С. 45–56.
4. Наука про матеріали: Досягнення та перспективи / редкол. : Л. М. Лобанов (голова) та ін. – Київ : НАН України, Академперіодика, 2018. Т. 1. – 652 с.
5. Онишук О.О. Структура та трибологічні характеристики триботехнічних матеріалів TiFe-xC, отриманих самопоширюваним високотемпературним синтезом / О.О. Онишук, В.Д. Рудь // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2013. – № 3. – С. 123–127.
6. Онишук О.О. Оптимізація складу компонентів для високотемпературного синтезу матеріалів трибологічного призначення / О.О. Онишук // Вісник Національного університету водневого господарства та природокористування. – 2017. – № 1 (77). – С. 137–147.
7. Луцак Д.Л. Застосування самопоширюваного високотемпературного синтезу в технологіях нанесення зносостійких покриттів / Д.Л. Луцак, Я.А. Криль, О.В. Пилипченко // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2015. – № 2 (55). – С. 43–50.
8. Лузан С.О. Трибологічні властивості композиційного покриття Ni-Cr-B-Si-боровмісні дисперсні фази, одержаного дуговим нагріванням, за абразивної дії та тертя ковзання. / С.О. Лузан, В.А. Бантковський, А.С. Лузан // Металофізика та новітні технології. – 2022. – Вип. 44. № 4. – С. 531–546. DOI: <https://doi.org/10.15407/mfint.44.04.0531>
9. Koldasdekova M.M., Seydualyeva A.J., Abdulkarimova R.G. Self-propagating high temperature synthesis of chromium boride. Of the National academy of sciences of the republic of Kazakhstan. Series chemistry and technology. 2015. Vol. 3 (411). P. 102–108.
10. Kharatyan S.L., Merzhanov A.G. Coupled SHS reactions as a useful tool for synthesis of materials: An overview. International journal of SHS. 2012. Vol. 21. P. 59–73.
11. Merzhanov A.G., Borovinskaya I.P. Historical retrospective of SHS: An autoreview. International journal of SHS. 2008. Vol. 4. P. 242–265.
12. Tavadze G.F., Shteinberg A.S. Production of advanced materials by methods of self-propagating high-temperature synthesis. Tbilisi: Meridian, 2011. 206 p.
13. Лузан С.О. Ретроспективний аналіз формування та розвитку самопоширюваного високотемпературного синтезу / С.О. Лузан, П.А. Ситников // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – 2022. – № 4 (135). – С. 88–96. DOI: <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2022.4.12>
14. Лузан С.О. Самопоширюваний високотемпературний синтез: стан, проблеми та перспективи розвитку / С.О. Лузан, П.А. Ситников // 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>
15. Ситников П.А. Кульовий млин для механічної активації матеріалів / П.А. Ситников, С.О. Лузан // Матеріали XVI Міжн. наук.-практ. конф. «Теоретичні та практичні дослідження молодих науковців», м. Харків, 14-16 грудня 2022 р. – С. 382.
16. Лузан С.О. 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 / С.О. Лузан, П.А. Ситников // Вісник Харківського автомобільно-дорожнього університету. – 2023. – № 100. – С. 42–47. DOI: <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2023.100.0.42>
17. Luzan S.O., Sytnikov 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. Umansky O.P., Dovgal A.G., Sirovatka V.L. Composite materials based on silicon carbide for compact machines and gas-thermal coatings. Kiev. Naukova Dumka of the NAS of Ukraine. 2022. 126 p.
2. Fedirko V.M., Pogrelyuk I.M., Luk'yanenko O.G. Chemical-thermal processing of titanium alloys. Surface hardening modification. Kiev. Naukova Dumka of the NAS of Ukraine. 2020. 183 p.
3. Luzan S.O. Criteria for choosing a method for restoring machine parts and determining the rational route of technology. Bulletin of Petra Vasilenka KhNTUSG. 2017. Vol. 183. P. 45–56.
4. Lobanov L.M. Science of materials: achievements and perspectives. NAS of Ukraine. Kyiv: Akadempriodyka. 2018. Vol. 1. 652 p.
5. Onischuk O.O., Rud V.D. Structure and tribological characteristics of tribotechnical materials TiFe-xC, taken from self-expanding high-temperature synthesis. Physico-chemical mechanics of materials. 2013. Vol. 3. P. 123–127.
6. Onischuk O.O. Optimization of the warehouse of components for high-temperature synthesis of materials of tribological significance. Bulletin of the National University of Water Governance and Nature Conservation. 2017. Vol. 1 (77). P. 137–147.

7. Luchak D.L., Kryl Ya.A., Pylypenko O.V. Application of self-propagating high-temperature synthesis in wear-resistant coating technologies. Exploration and development of oil and gas fields. 2015. Vol. 2 (55). P. 43–50.
8. Luzan S.O., Bantkovskiy V.A., Luzan A.S. Tribological Properties of Composite Coating Ni–Cr–B–Si–Boron-Containing Dispersed Phases Obtained by Arc Surfacing, at Abrasive Action and Sliding Friction. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2022. Vol. 4 (44). P. 531–546. DOI: <https://doi.org/10.15407/mfint.44.04.0531>
9. Koldasdekova M.M., Seydualyeva A.J., Abdulkarimova R.G. Self-propagating high temperature synthesis of chromium boride. Of the National academy of sciences of the republic of Kazakhstan. Series chemistry and technology. 2015. Vol. 3 (411). P. 102–108.
10. Kharatyan S.L., Merzhanov A.G. Coupled SHS reactions as a useful tool for synthesis of materials: An overview. *International journal of SHS.* 2012. Vol. 21. P. 59–73.
11. Merzhanov A.G., Borovinskaya I.P. Historical retrospective of SHS: An autoreview. *International journal of SHS.* 2008. Vol. 4. P. 242–265.
12. Tavadze G.F., Shteinberg A.S. Production of advanced materials by methods of self-propagating high-temperature synthesis. Tbilisi: Meridian, 2011. 206 p.
13. 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.* 2022. Vol. 4 (135). P. 88–96. DOI: <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2022.4.12>
14. 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.* 2022. Vol. 6. P. 17–23. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.6/04>
15. Sytnykov P.A., Luzan S.O. Ball mill for mechanical activation of materials. Theoretical and practical research of young scientists: materials of the 16th Intern. scientific and practical conference (Kharkiv, December 14–16, 2022). Kharkiv: NTU «KhPI». 2022. P. 382.
16. Luzan S.O., Sytnykov P.A. Study of the influence of the parameters of mechanical activation of the Ti-C-Al-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-PT-NA-01 charge stock on the duration of the synthesis of the modifying composites. *Bulletin of the Kharkiv Automobile and Road University.* 2023. Vol. 100. P. 42–47. DOI: <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2023.100.0.42>
17. 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.*