

УДК 621.793.7

МІКРОСТРУКТУРА ТА ОПІР АБРАЗИВНОМУ ЗНОШУВАННЮ НАПЛАВЛЕНОГО МАТЕРІАЛУ СИСТЕМИ Ni–Cr–B–Si ІЗ ВКЛЮЧЕННЯМИ ДИСПЕРСНИХ ФАЗ

С. О. ЛУЗАН, А. С. ЛУЗАН

*Харківський національний технічний університет сільського господарства
ім. Петра Василенка*

Досліджено мікроструктуру наплавлених покриттів композиційним матеріалом на основі самофлюсівного сплаву ПГ-10Н-01, модифікованого механоактивованим композиційним матеріалом, отриманим з допомогою СВС-процесу. Рентгенофазовим аналізом у структурі покриття виявлено включення дибориду титану (TiB_2), бориду нікелю (Ni_3B), оксидів титану (TiO) та заліза (Fe_3O_4), розподілених у нікелевій матриці. Встановлено, що модифікувальний додаток під час електродугового наплавлення сприяє подрібненню структури, підвищенню твердості і мікротвердості наплавленого шару, збільшенню абразивної зносостійкості в 1,5 рази порівняно зі сплавом ПГ-10Н-01.

Ключові слова: композиційний матеріал, наплавлені шари, СВС-процес, бориди, оксиди, зносостійкість, фазовий склад, абразив, порошок системи Ni–Cr–B–Si.

Вступ. Порошкові дроти на основі заліза системи Fe–Cr–B–C застосовують, щоб підвищити зносостійкість різноманітних деталей під час наплавлення та наплення покриттів [1–4]. Однак, використовуючи їх для деталей машин, що контактують з абразивним, навколишнім агресивним та технологічними середовищами і піддаються абразивному зношуванню, а також корозійному пошкодженню, не вдається забезпечити необхідне підвищення ресурсу за відновлювального ремонту. До таких деталей належать, наприклад, робочі органи ґрунтообробних машин: леміші плугів, стрілочасті та односторонні лапи культиватора, різні конструкції сошників, диски борін та луцильника, розпушувачі тощо [5]. Для їх відновлення наплавленням часто застосовують сплави на основі нікелю системи Ni–Cr–B–Si як матеріал матриці зносостійких композиційних покриттів через їх витривалість до різних видів зношування і корозії. Вони мають відносно низьку точку плавлення ($1040...1080^\circ C$) і виконують роль пластичного в'язучого для зміцнювальних фаз, зокрема карбідів Cr_3C_2 [6], SiC, бориду TiB_2 [7], оксидів Al_2O_3 [8], Fe_2O_3 [9] тощо.

Мета дослідження – вивчити вплив модифікувального додатка, що містить диборид титану (TiB_2) і борид нікелю (Ni_3B), оксиди титану та заліза, синтезованого з допомогою саморозповсюджувального високотемпературного синтезу (СВС-процесу), на мікроструктуру та абразивну зносостійкість наплавлених композиційним матеріалом (КМ) шарів з використанням як матеріалу матриці порошку ПГ-10Н-01 на нікелевій основі.

Методика досліджень. Як вихідні матеріали, щоб отримати модифікувальний композиційний матеріал (МКМ), застосовували порошки титану марки ВТ1-0, бору В, вуглецю марки ПМ-15, крім того, для збільшення теплового ефекту під час синтезу модифікувального додатку в механічну суміш вводили термо-

реактивний порошок алюмініду нікелю ПТ-НА-01, алюмінієву пудру (порошок) ПАП-1 (ГОСТ 5494-95) і оксид заліза Fe_2O_3 . Розмір фракційних складників всіх вихідних порошкових компонентів знаходився в межах 63...100 μm . Співвідношення компонентів у суміші було еквімолярним, щоб в результаті подальшої СВС-реакції відбувався синтез дибориду титану (TiB_2), бориду нікелю (Ni_3B) і оксидів титану та заліза стехіометричного складу.

Обрані компоненти змішували і отриману порошкову суміш механічно активували в планетарних кульових млинах АГО-2. Обсяг барабанів 160 cm^3 , діаметр куль 4...5 mm, маса куль 200 g. Час механоактивації варіювали від 2 до 6 min. Отримували композиційний матеріал в два етапи: на першому порошки Ti, B, C, Fe_2O_3 , ПТ-НА-01, Al змішували і механоактивували, додаючи в'язуче – клей марки “Метилан”, формували циліндр і сушили, ініціювали СВС-процес, під час якого синтезували частки боридів титану, нікелю та оксиди (TiO, Fe_3O_4); на другому дробили спек і змішували отриманий порошок з промисловим марки ПГ-10Н-01 (ТУУ 322-19-004-96), отриману порошкову суміш механоактивували; додавали до неї рідке скло (ГОСТ 13078-81) до набуття пастоподібного стану.

Пасту наносили на підготовану для наплавлення поверхню сталеві пластини (сталь 20) і після просушування наплавляли графітовим електродом діаметром 10 mm, струм наплавлення 80...120 А, полярність – пряма. Для дугового наплавлення використовували інверторне джерело живлення Патон ВДІ-200Р DC TIG. Мікроструктуру досліджували за допомогою металографічного мікроскопа. Мікротвердість покриттів вимірювали приладом ПМТ-3 згідно з ГОСТ 9450-76.

Порівняльні випробування на зношування наплавлених зразків виконували на машині тертя типу МІ за схемою “диск–колодка” в індустріальному мастилі марки I-20 за таких режимів: середня колова швидкість ковзання 0,42 m/s, питомий тиск на колодку за нормального зношування 8,0 МПа, площа поверхні тертя 1,8 cm^2 . Інтенсивність зношування визначали за формулою

$$U = \frac{G_1 - G_2}{\gamma \cdot F \cdot t} \text{ (mm}^3\text{/(cm}^2\cdot\text{s))}, \quad (1)$$

де G_1 , G_2 – маса зразка до і після випробування, mg; γ – густина матеріалу, mg/mm^3 ; F – площа зразка, cm^2 ; t – час випробування, s.

На абразивне зношування матеріали випробовували в умовах тертя згідно з ГОСТ 17367-71. Як абразивні частинки використовували карбід кремнію зелений марки 64С зернистістю 8Н (ГОСТ 10094-75). Відносну зносостійкість матеріалів оцінювали за формулою

$$\varepsilon = \frac{\Delta l_e}{\Delta l_t} \left(\frac{d_e}{d_t} \right)^2, \quad (2)$$

де Δl_e , Δl_t – абсолютний лінійний знос еталонного і випробуваного зразків, mm; d_e , d_t – їх фактичний діаметр, mm.

Фазовий склад наплавлених шарів визначали, застосовуючи дифрактометр ДРОН-3 у монохроматизованому $CuK\alpha$ -випромінюванні в кутовому інтервалі $2\theta = 10...80^\circ$. Рентгенограми реєстрували в дискретному режимі. Готували зразки до аналізу шляхом шліфування абразивним папером і полірування до досягнення необхідної шорсткості поверхні. Під час розшифрування дифрактограм використовували дані картотеки ASTM. Мікроструктуру наплавлених шарів досліджували на сканівному електронному мікроскопі JSM-6390LV.

Результати та їх обговорення. Для СВС модифікувального композиційного матеріалу застосовували циліндричні зразки в умовах фронтального синтезу. Підпалювали реагуючий склад електричною дугою. Далі композиційний матеріал

у вигляді спека подрібнювали, додавали 90% порошку ПГ-10Н-01 і механоактиваційно обробляли. Виявили, що мікроструктура наплавленого порошком ПГ-10Н-01 покриття дендритна (рис. 1а), а наплавленого КМ (10% МКМ + 90% ПГ-10Н-01) представляє собою матричний матеріал – сплав ПГ-10Н-01, в якому рівномірно розподілені тверді включення (рис. 1б).

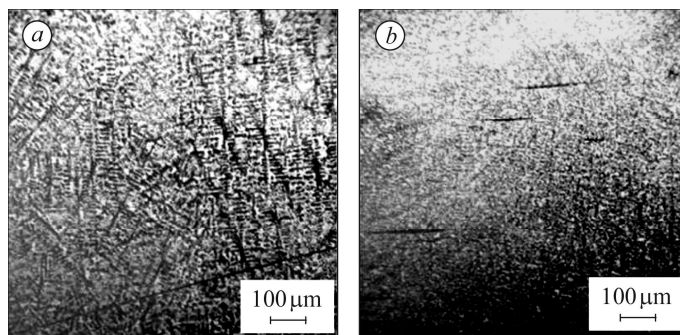


Рис. 1. Мікроструктура наплавлених покриттів:
а – порошком ПГ-10Н-01; б – КМ (10% МКМ + 90% ПГ-10Н-01).

Fig. 1. Microstructure of the deposited coatings: а – powder ПГ-10Н-01; б – composite material (CM) (10% MCM + 90% ПГ-10Н-01) (MCM – modifying composite material).

Мікротвердість наплавлених покриттів, заміряна у напрямі від поверхні основи до поверхні шару, змінювалась нерівномірно (рис. 2). Середнє значення мікротвердості покриття, наплавленого КМ, вище, ніж наплавленого порошком ПГ-10Н-01. Мікротвердість КМ зростає в напрямку до поверхні наплавленого шару (рис. 2, крива 2), що пояснюють ростом концентрації твердих включень у матричному матеріалі ПГ-10Н-01. Мікротвердість наплавленого шару ПГ-10Н-01 стабілізується в напрямку від основи до його поверхні, що зумовлено ефектом самофлюсування сплаву під час наплавлення і рівномірнішим розподілом у нікелевій матриці твердих включень Ni_3B [10].

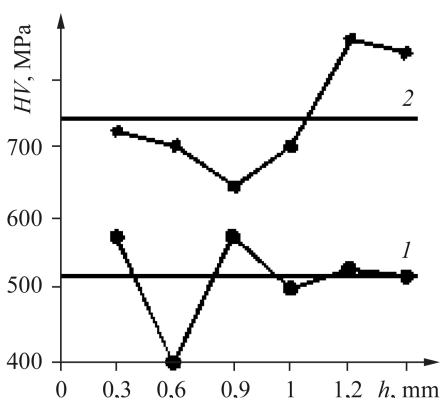


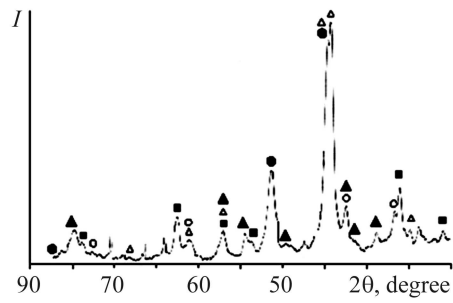
Рис. 2. Зміна мікротвердості HV наплавленого металу в напрямку від поверхні основи до поверхні шару:
1 – сплав ПГ-10Н-01; 2 – КМ.

Fig. 2. Change in the microhardness HV of the deposited metal in the direction from the base surface to the layer surface:
1 – alloy ПГ-10Н-01; 2 – CM.

Коерцитивну силу H_c у наплавлених на сталь 20 валиках вимірювали структуроскопом КРМ-Ц-К2М згідно з рекомендаціями галузевого стандарту СОУ 29.32.4-37-532: 2006. Під час наплавлення порошку ПГ-10Н-01 вона становила 4,9 А/см, а за наплавлення КМ, що містить 10% МКМ, дорівнювала 5,1...5,8 А/см. Її збільшення також підтверджує наявність у структурі КМ неметалічних твердих складників – дибориду титану (TiB_2), бориду нікелю (Ni_3B), оксидів титану (TiO) та заліза (Fe_3O_4) (рис. 3).

Рис. 3. Рентгенівська дифрактограма наплавленого КМ шару: ● – Ni; ▲ – Ni₃B; ■ – Fe₃O₄; △ – TiB₂; ○ – TiO.

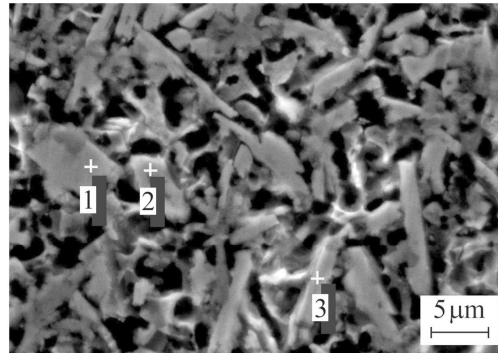
Fig. 3. X-ray diffractogram of the deposited CM layer: ● – Ni; ▲ – Ni₃B; ■ – Fe₃O₄; △ – TiB₂; ○ – TiO.



Дослідження на сканівному електронному мікроскопі JSM-6390LV з енергодисперсійним детектором X-max N засвідчили, що мікроструктура наплавлених шарів має типову морфологію, яка формується під час кристалізації зі спрямованим відведенням тепла. Метод сканівної електронної мікроскопії з рентгенівським мікроаналізом підтвердив фазову неоднорідність наплавленого шару на мікрорівні (рис. 4).

Рис. 4. Мікроструктура і хімічний склад (mass%) наплавленого покриття КМ.

Fig. 4. Microstructure and chemical composition (mass%) of the deposited CM coating.



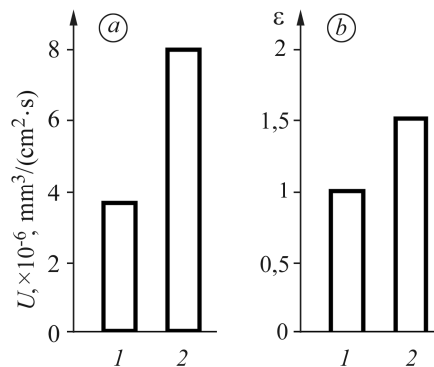
Спектр	B	C	O	Si	P	Ti	Cr	Fe	Ni
1	24,91	3,66	0,77	–	–	1,03	21,97	36,86	10,80
2	17,61	17,09	9,13	0,61	0,38	4,84	7,39	18,44	24,51
3	14,07	9,06	4,16	0,98	0,21	4,79	4,85	20,93	40,93

У покритті присутні В, О, Ті, Ні, Fe (рис. 4), що підтверджує результати рентгенофазового аналізу (див. рис. 3). Досліджуючи інтенсивність зношування під час нормального тертя покриттів на машині МІ, виявили, що зносостійкість КМ (10% МКМ + 90% ПГ-10Н-01) в 2,1 рази більша, ніж самофлюсівного сплаву ПГ-10Н-01 ($0,0038 \cdot 10^{-3}$ і $0,008 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^3/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ відповідно) (рис. 5а).

Рис. 5. Зносостійкість наплавлених електродуговим методом матеріалів:

a – під час нормального тертя;
b – в умовах впливу закріплених частинок абразиву; 1 – сплав ПГ-10Н-01; 2 – КМ.

Fig. 5. Wear resistance of materials deposited by the electric arc method:
a – during normal friction;
b – under the influence of fixed abrasive particles; 1 – alloy ПГ-10Н-01; 2 – CM.



Результати випробувань на тертя об закріплені частинки наведені на рис. 5b. Сплав ПГ-10Н-01 використовували як контрольний матеріал, зносостійкість якого прийняли за одиницю. Встановили, що під час випробувань наплавлених електродуговим методом матеріалів (рис. 5b) диборид титану (TiB₂) і борид нікелю

(Ni₃B), оксиди титану та заліза в наплавленому покритті КМ знижують інтенсивність зношування. Таким чином, абразивна зносостійкість КМ в 1,5 рази вища, ніж сплаву ПГ-10Н-01 (рис. 6).

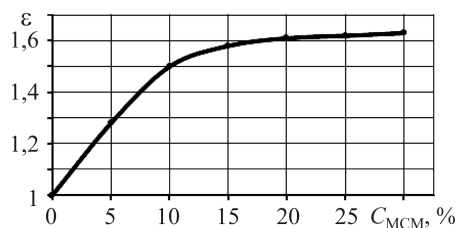


Рис. 6. Відносна зносостійкість покриттів КМ залежно від вмісту МКМ.

Fig. 6. Relative wear resistance of CM coatings depending on the content of MCM.

Виявили, що зі збільшенням вмісту МКМ зносостійкість наплавленого шару зростає. Водночас слід зазначити, що за його перевищення понад 20% наплавлювально-технологічні властивості матеріалу погіршуються. Крім того, ударна в'язкість, визначена за ГОСТ 6996-66, зі збільшенням концентрації МКМ від 10 до 30% *KCV* зменшується відповідно з 4,5 до 2,1 J/cm². Зі збільшенням вмісту МКМ понад 10% тверді включення з матричного матеріалу викиркуються. Тому для деталей, що працюють в умовах ударно-абразивного зношування, слід застосовувати КМ, в якому не більше 10% МКМ.

Таким чином, після введення в пластичну матрицю зміцнювача МКМ (дибориду титану, бориду нікелю) зносостійкість матеріалу суттєво підвищується: тверді частинки сприймають навантаження і сприяють зниженню коефіцієнта тертя і зносу. Пластична матриця на основі сплаву ПГ-10Н-01 перерозподіляє напруження, забезпечуючи умови, в яких тверді складники займають сприятливе розташування. Тому унеможливується локальне підвищення контактного тиску і знижується ймовірність відриву твердих зносостійких частинок [10]. Результати досліджень морфології поверхонь тертя також добре узгоджуються з результатами випробувань на тертя об закріплені частинки наплавлених покриттів ПГ-10Н-01 і КМ (10% МКМ + 90% ПГ-10Н-01) (рис. 7).

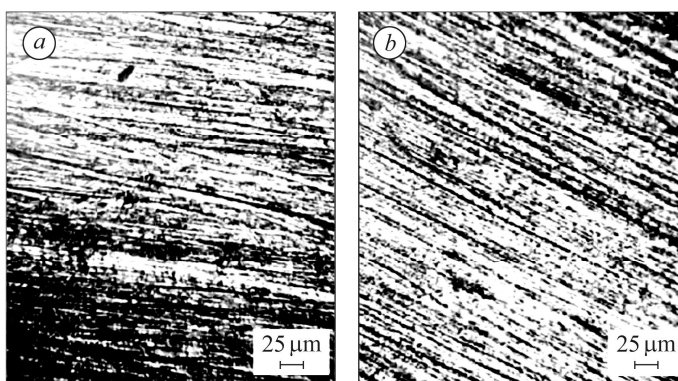


Рис. 7. Морфологія поверхонь під час тертя об закріплені частинки абразиву наплавленого сплаву ПГ-10Н-01 (а) і КМ (b).

Fig. 7. Morphology of surfaces under friction with fixed abrasive particles of the deposited alloy Г-10Н-01 (a) and CM (b).

Під час зношування в умовах впливу закріплених частинок абразиву утворюються досить глибокі паралельні канавки на покритті зі сплаву ПГ-10Н-01 (див. рис. 6) Також зустрічаються і глибші борозенки твердих частинок боридів, що відколосились від нікелевої матриці. Рельєф поверхні зношування має нерівномірний характер. На поверхні наплавленого покриття з КМ є неглибокі дрібні і рівномірно розташовані подряпини від тертя (рис. 6b), які пояснюють введенням МКМ, що сприяє виникненню нових центрів кристалізації під час наплавлення, а

отже, призводить до подрібнення структури. Викришування твердих включень (боридів, оксидів) не зафіксували, що зумовлено введенням 10% МКМ.

ВИСНОВКИ

Розроблено композиційний матеріал на основі порошку системи Ni–Cr–B–Si (марки ПГ-10Н-01), модифікований механоактивованим композиційним матеріалом, отриманим із застосуванням СВС-процесу, для зміцнення робочих органів ґрунтообробних машин [11]. Встановлено, що модифікувальний композиційний матеріал, що містить диборид титану (TiB₂), борид нікелю (Ni₃B), оксиди титану (TiO) та заліза (Fe₃O₄), сприяє диспергуванню структури композиційного матеріалу на основі сплаву ПГ-10Н-01, підвищенню мікротвердості наплавленого шару від 520 до 740 НV. В результаті абразивна зносостійкість КМ (10% МКМ + 90% ПГ-10Н-01) збільшується в 1,5 рази проти самофлюсівного сплаву ПГ-10Н-01.

РЕЗЮМЕ. Исследована микроструктура наплавленных покрытий композиционным материалом на основе самофлюсующегося сплава ПГ-10Н-01, модифицированного механоактивированным композиционным материалом, полученным с использованием СВС-процесса. Рентгенофазовым анализом в структуре наплавленного покрытия обнаружены включения диборида титана (TiB₂), бориды никеля (Ni₃B), оксидов титана (TiO) и железа (Fe₃O₄), распределенных в никелевой матрице. Выявлено, что модифицирующая добавка при электродуговой наплавке способствует измельчению структуры, повышению твердости и микротвердости наплавленного слоя, увеличению абразивной износостойкости в 1,5 раза в сравнении с сплавом ПГ-10Н-01.

Ключевые слова: композиционный материал, наплавленные слои, СВС-процесс, бориды, оксиды, износостойкость, фазовый состав, абразив, порошок системы Ni–Cr–B–Si.

SUMMARY. The microstructure of the coatings deposited by a composite material based on a self-fluxing alloy ПГ-10Н-01 modified by a mechano-activated composite material obtained using a self-propagating high-temperature synthesis process is investigated. The X-ray phase analysis reveals the presence in the structure of the deposited coating of inclusions of titanium diboride (TiB₂), nickel boride (Ni₃B), titanium oxide (TiO) and iron (Fe₃O₄), distributed in the nickel matrix. It is shown that the use of the modifying additive in electric arc surfacing promotes grinding of the structure, increase of the hardness and microhardness of the deposited layer, increase of the abrasive wear resistance in 1.5 times in comparison with the ПГ-10Н-01 alloy.

Keywords: composite material, deposited layers, SHS process, borides, oxides, wear resistance, phase composition, abrasive, Ni–Cr–B–Si powder.

1. Вплив вібрації під час наплавлення захисного шару на його микроструктуру та ударно-абразивне зношування / Г. В. Похмурська, М. М. Студент, О. С. Ланець, А. А. Войтович // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2015. – **51**, № 3. – С. 107–11.

(*Influence of vibration in the course of surfacing of a protective layer on its microstructure and impact-abrasive wear / H. V. Pokhmurs'ka, M. M. Student, O. S. Lanets, A. A. Voitovych // Materials Science. – 2015. – 51, № 3. – P. 412–417.*)

2. Микроструктура та опір абразивному зношуванню віброннаплавленого металу з порошкового дроту базової системи Fe–Cr–B / А. А. Войтович, Г. В. Похмурська, М. М. Студент, О. З. Студент // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2016. – **52**, № 3. – С. 63–68.

(*Microstructure and abrasive-wear resistance of the vibration-deposited metal of core wires of the basic Fe–Cr–B system / A. A. Voitovych, H. V. Pokhmurs'ka, M. M. Student, O. Z. Student // Materials Science. – 2016. – 52, № 3. – P. 365–370.*)

3. Оптимізація вмісту хрому в порошкових дротах систем Fe–Cr–C, Fe–Cr–B за корозійною тривкістю електродугових покривів / Т. Р. Ступницький, М. М. Студент, Г. В. Похмурська, В. М. Гвоздецький // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2016. – **52**, № 2. – С. 23–28.

(*Optimization of the chromium content of powder wires of Fe–Cr–C and Fe–Cr–B systems according to the corrosion resistance of electric-arc coating / T. R. Stupnytskyi, M. M. Stu-*

- dent, H. V. Pokhmurska, V. M. Hvozdets'kyi // *Materials Science*. – 2016. – **52**, № 2. – P. 165–172.)
4. *Вплив високотемпературної корозії на газоабразивну тривкість електродугових покриттів* / М. М. Студент, Г. В. Похмурська, В. В. Гвоздецький, М. Я. Головчук, М. С. Романів // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2009. – **45**, № 4. – С. 19–28.
(*Effect of high-temperature corrosion on the gas-abrasive resistance of electric-arc coatings* / М. М. Student, H. V. Pokhmurs'ka, V. V. Hvozdets'kyi, M. Y. Holovchuk, M. S. Romaniv // *Materials Science*. – 2009. – **45**, № 4. – P. 481–489.)
 5. *Сисолин П. В., Погорельий Л. В. Почвообрабатывающие и посевные машины: история, машиностроение, конструирование*. – К.: Феникс, 2005. – 264 с.
 6. *Zikin A., Hussainova I., and Katsich C. Advanced chromium carbide-based hardfacings* // *Surf. and Coatings Technol.* – 2012. – **206**. – P. 4270–4278.
 7. *Исследование закономерностей влияния мелкодисперсных добавок TiB₂ на формирование структурно-фазового состава композиционных порошков и покрытий системы (Ni–Cr–Si–B)–TiB₂* / А. П. Уманский, А. Е. Терентьев, М. С. Стороженко, И. С. Марценюк // *Наук. нотатки*. – 2013. – № 41-2. – С. 213–221.
 8. *Hou Q. Y., Huang Zh., and Wang J. T. Influence of nano-Al₂O₃ particles on the microstructure and wear resistance of thenickel-based alloy coating deposited by plasma transferred arc overlay welding* // *Surf. and Coatings Technol.* – 2011. – **205**. – P. 2806–2812.
 9. *Żórawski W. and Skrzypek S. J. Tribological properties of plasma and HVOF-sprayed NiCrBSi–Fe₂O₃ composite coatings* // *Surf. and Coatings Technology*. – 2013. – **220**. – P. 282–289.
 10. *Семененко В. Е., Пилипенко Н. Н. Микроструктура и свойства боридных сплавов никеля с регулярной структурой* // *Вопросы атомной науки и техники*. – 2004. – № 6. – С. 140–146.
 11. *Патент № 133419*, Україна, МПК (2019.01) C22C 14/00, B22F 1/00. Шихта для отримання композиційного зносостійкого матеріалу з використанням СВС-процесу / С. О. Лузан, О. І. Сідашенко, А. С. Лузан. – Опубл. 10.04.2019; Бюл. № 7.

Одержано 24.09.2019