

УДК 621.793.7

СТРУКТУРА І ТРИБОТЕХНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ НАПЛАВЛЕНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ ШАРІВ НА ОСНОВІ СПЛАВУ ПГ-10Н-01, ЩО МІСТЯТЬ Al_2O_3

С. О. ЛУЗАН, В. А. БАНТКОВСЬКИЙ

*Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут";
Державний біотехнологічний університет, Харків*

Досліджено мікроструктуру наплавлених шарів композиційним матеріалом (КМ) на основі самофлюсівного сплаву ПГ-10Н-01, модифікованого механоактивованим КМ, отриманим з допомогою саморозповсюджувального високотемпературного синтезу. Рентгенофазовим аналізом встановлено наявність у структурі наплавленого шару включень дибориду титану, боридів нікелю NiB, Ni₂B, Ni₃B, хрому CrB, Cr₂B, карбідів хрому Cr₃C₂, Cr₇C₃, силіциду нікелю Ni₃Si, оксидів титану (TiO), заліза (Fe₃O₄) та алюмінію (Al₂O₃), розподілених у нікелевій матриці. Встановлено, що модифікувальний КМ під час дугового наплавлення сприяє подрібненню структури та зниженню коефіцієнта тертя, підвищенню мікротвердості наплавленого шару, зниженню інтенсивності зношування за різних умов тертя.

Ключові слова: *композиційний матеріал, наплавлені шари, саморозповсюджувальний високотемпературний синтез, бориди, оксиди, зносостійкість, фазовий склад, абразив, сплав ПГ-10Н-01.*

The microstructure of deposited layers with a composite material (CM) based on the self-fluxing ПГ-10Н-01 alloy, modified with a mechanoactivated CM obtained using the self-propagating high-temperature synthesis, was studied. The X-ray phase analysis revealed in the structure of the deposited layer the inclusions of nickel borides NiB, Ni₂B, Ni₃B, chromium borides CrB, Cr₂B, chromium carbides Cr₃C₂, Cr₇C₃, distributed in the nickel matrix. It was established that the modifying CM during arc welding contributed to the grinding of the structure and the reduction of the friction coefficient, the increase of the microhardness of the deposited coatings, and the reduction of the wear intensity in various friction conditions.

Keywords: *composite material, deposited layers, self-propagating high-temperature synthesis, borides, oxides, wear resistance, phase composition, abrasive, ПГ-10Н-01 alloy.*

Вступ. Наплавлення композиційних матеріалів (КМ) широко застосовують для відновлення та зміцнення деталей машин, які працюють в умовах абразивного зношування [1–5]. Робота деталей в абразивних середовищах передбачає присутність у їх складі зносостійкої складової з високою стійкістю до твердих включень робочого середовища та узгодженістю фізико-механічних властивостей матричного матеріалу та основи. Таким чином, практичний інтерес викликають композиційні покриття з металевою матрицею зі зносостійкого сплаву на основі нікелю системи Ni–Cr–B–C, додатково модифікованого боридами, карбідами, оксидами тощо [6, 7].

Раніше [8] для підвищення зносостійкості наплавлених шарів на основі сплаву ПГ-10Н-01, зміцненого включеннями дисперсних фаз, використовували склади шихт для саморозповсюджувального високотемпературного синтезу (СВС),

які містять титан, бор, алюміній, вуглець. Одним з основних елементів для синтезування твердих дисперсних фаз є бор (1...2%). Важливо вивчити можливість застосування у складі шихти для синтезування модифікувального композиційного матеріалу (МКМ), а саме, оксиду алюмінію Al_2O_3 замість дорогого бору. Мета роботи – дослідити вплив модифікувального додатка (матеріал матриці – сплав на нікелевій основі ПГ-10Н-01), синтезованого зі шихти складу Ti , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , Al , C , ПТ-НА-01 за допомогою СВС, на структурні особливості наплавлених шарів та їх триботехнічні властивості.

Методики досліджень. Як вихідні матеріали для отримання МКМ використовували порошки титану марки ВТ1-0, оксидів алюмінію Al_2O_3 і заліза Fe_2O_3 , вуглецю марки ПМ-15, термореактивний порошок алюмініду нікелю ПТ-НА-01, алюмінієву пудру (порошок) ПАП-1 (ГОСТ 5494). Розмір фракційних складників всіх вихідних порошкових компонентів знаходився в межах 63...100 μm .

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, а їх маса 200 g. Тривалість механоактивації варіювали від 2 до 6 min. Отримували композиційний матеріал у два етапи: на першому порошки Ti , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , C , ПТ-НА-01, Al змішували і механоактивували, додаючи в'язуче – клей марки “Метилан”, формували циліндр і сушили, ініціювали СВС, під час якого синтезували МКМ у вигляді спеку; на другому етапі дробили спек і змішували отриманий порошок з промисловим марки ПГ-10Н-01 (ТУУ 322-19-004-96), отриману суміш механоактивували, додавали до неї рідке скло (ГОСТ 13078) до набуття пастоподібного стану. Пасту наносили на підготовану для наплавлення поверхню сталеві пластина (сталь 20) і після просушування наплавли графітовим електродом \varnothing 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 шарів вимірювали згідно з ГОСТ 2999 “Метали та сплави. Метод вимірювання твердості за Віккерсом”.

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

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

де G_1 , G_2 – маса зразка до і після випробування, відповідно, 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. Як абразивні частинки використовували карбід кременію зелений марки 64С зернистістю 8Н (ГОСТ 10094). 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 – абсолютне лінійне зношування еталонного і випробовуваного зразків відповідно, mm; d_e , d_t – їх фактичний діаметр, mm.

Фазовий склад наплавлених шарів визначали дифрактометром ДРОН-3 у монохроматизованому CuK_{α} -випромінюванні в кутовому інтервалі $2\theta = 10...80^\circ$.

Рентгенограми реєстрували в дискретному режимі. Готували зразки для аналізу шліфуванням абразивним папером і поліруванням до досягнення необхідної шорсткості поверхні. Під час розшифрування дифрактограм використовували дані картотеки ASTM.

Результати та їх обговорення. В результаті дугового наплавлення КМ графітовим електродом на поверхні сталі сформовано шари завтовшки 0,5...2 мм. Виявили, що мікроструктура наплавленого порошком ПГ-10Н-01 шару дендритна (рис. 1а). Структура шару КМ, яка складається з матричного матеріалу сплаву ПГ-10Н-01, в якому рівномірно розподілені тверді включення МКМ, має дрібнозернисту будову, причому зі збільшенням вмісту МКМ з 10 до 20%, а відповідно і оксиду алюмінію Al_2O_3 з 1 до 2%, однорідність структури підвищується внаслідок збільшення центрів кристалізації (рис. 1б, с). Дослідження показали, що зі збільшенням вмісту МКМ понад 20% утворюються конгломерати у наплавленому шарі, які погіршують його технологічні властивості (рис. 2). Вони можуть бути джерелами утворення тріщин під час затвердіння через значну відмінність коефіцієнтів лінійного розширення матричного матеріалу ПГ-10Н-01 і МКМ.

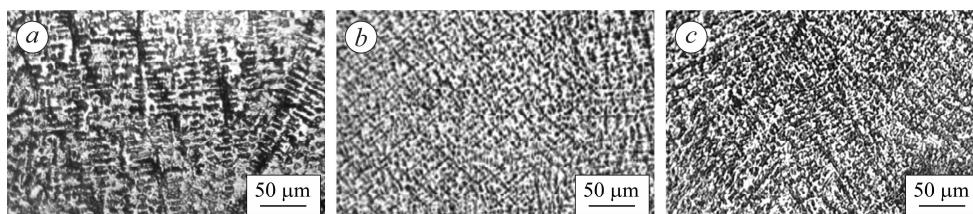


Рис. 1. Мікроструктура наплавлених шарів: *a* – ПГ-10Н-01; *b* – КМ (10% МКМ + 90% ПГ-10Н-01); *c* – КМ (20% МКМ + 80% ПГ-10Н-01).

Fig. 1. Microstructure of the deposited coatings: *a* – ПГ-10Н-01 powder; *b* – composite material (CM) (10% modifying composite material (MCM) + 90% ПГ-10Н-01); *c* – CM (20% MCM + 80% ПГ-10Н-01).

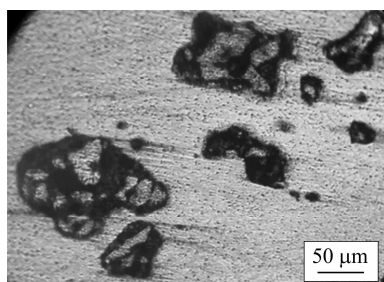


Рис. 2. Конгломерати МКМ у наплавленому шарі КМ (30% МКМ + 70% ПГ-10Н-01).

Fig. 2. МКМ conglomerates in the CM deposited coating (30% MCM + 70% ПГ-10Н-01).

За дугового наплавлення існує небезпека спливання частинок Al_2O_3 на поверхню шару через суттєву різницю питомих густин оксидної кераміки і нікелевої матриці – самофлюсівного порошку ПГ-10Н-01. Однак, як показали результати досліджень структур, частинки Al_2O_3 та інші тверді включення досить рівномірно розподілені у наплавленому шарі з вмістом 10...20% МКМ (рис. 3).

За результатами рентгенофазового аналізу для всіх шарів спостерігаємо такі фази: нікелева матриця, інтерметалідні сполуки Cr_7Ni_3 , бориди нікелю NiB , Ni_2B , Ni_3B ; силіцид нікелю Ni_3Si , бориди хрому CrB , Cr_2B ; карбіди хрому Cr_3C_2 , Cr_7C_3 , оксиди титану (TiO), заліза (Fe_3O_4) та алюмінію (Al_2O_3). Хімічної взаємодії оксидів алюмінію з компонентами самофлюсівного сплаву не виявлено.

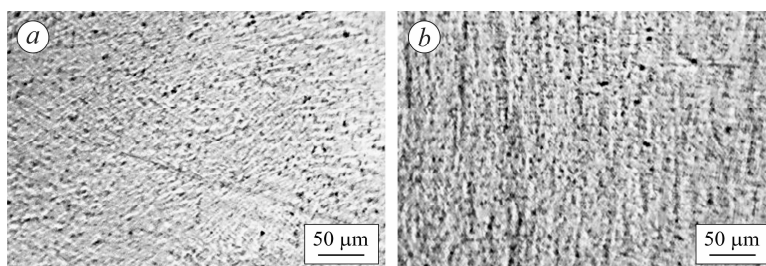


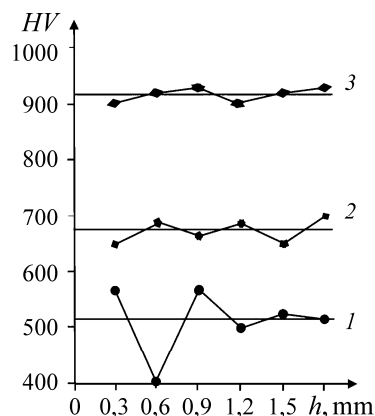
Рис. 3. Мікроструктура наплавлених шарів (не травлених):
a – КМ (10% МКМ + 90% ПГ-10Н-01); *b* – КМ (20% МКМ + 80% ПГ-10Н-01).

Fig. 3. Microstructure of the deposited coatings (not etched):
a – CM (10% MCM + 90% PG-10H-01); *b* – CM (20% MCM + 80% PG-10H-01).

На рис. 4 показано розподіл мікротвердості за товщиною наплавлених шарів в напрямку від поверхні основи до поверхні шару.

Рис. 4. Зміна мікротвердості *HV* наплавленого металу в напрямку від поверхні основи до поверхні шару: 1 – сплав ПГ-10Н-01; 2 – КМ (10% МКМ + 90% ПГ-10Н-01); 3 – КМ (20% МКМ + 80% ПГ-10Н-01).

Fig. 4. Change in the microhardness *HV* of the deposited metal in the direction from the base surface to the layer surface: 1 – ПГ-10Н-01 alloy; 2 – CM (10% MCM + 90% PG-10H-01); 3 – CM (20% MCM + 80% PG-10H-01).



Середня мікротвердість шару КМ (10% МКМ + 90% ПГ-10Н-01) становить 673 HV, а КМ (20% МКМ + 80% ПГ-10Н-01) – 915 HV, що перевищує середню мікротвердість шару ПГ-10Н-01, яка дорівнює 520 HV. З розподілу мікротвердості КМ видно, що існує тенденція до її підвищення в напрямку до поверхні наплавленого шару (рис. 4, криві 2, 3). Розподіл мікротвердості КМ з 20% МКМ стабільніший порівняно з шаром з 10% МКМ. Це можна пояснити рівномірнішим розподілом у матричному матеріалі ПГ-10Н-01 твердих частинок зі збільшенням їх концентрації. Мікротвердість наплавленого шару ПГ-10Н-01 стабілізується в напрямку від основи до його поверхні, що можна пояснити ефектом самофлюсування сплаву під час наплавлення і рівномірнішим розподілом у нікелевій матриці твердих включень Ni_3B .

Таким чином, результати дослідження мікротвердості шарів дають змогу зробити висновок, що в дендритній структурі немодифікованого наплавленого шару значення мікротвердості нестабільні і абсолютні показники знаходяться в межах 396...578 HV (рис. 4, крива 1). Під час наплавлення КМ формується структура, яка насичена боридами нікелю NiB , Ni_2B , Ni_3B , хрому CrB , Cr_2B , карбідами хрому Cr_3C_2 , Cr_7C_3 , силіцидом нікелю Ni_3Si , оксидами титану (TiO), заліза (Fe_3O_4) та алюмінію (Al_2O_3), що підвищує середню мікротвердість для КМ (10% МКМ + 90% ПГ-10Н-01) у 1,29 разів, а для КМ (20% МКМ + 80% ПГ-10Н-01) у 1,76 рази (рис. 4, криві 2, 3). Також важливо відзначити, що мікротвердість в модифікованих покриттях має менший розкид значень на всій товщині наплавленого шару, що є критерієм стабільно високої зносостійкості.

Дослідження інтенсивності зношування в умовах нормального тертя шарів на машині МІ виявили, що зносостійкість КМ (10% МКМ + 90% ПГ-10Н-01) в 1,9 рази, а КМ складу (20% МКМ + 80% ПГ-10Н-01) в 2,16 рази більша, ніж самофлюсівного сплаву ПГ-10Н-0, відповідно (рис. 5).

Коефіцієнт тертя розраховували через певні проміжки часу за формулою

$$K_f = \frac{M_f}{P \cdot R}, \quad (3)$$

де M_f – момент тертя, kg·m; P – навантаження, kg; R – радіус диска, m.

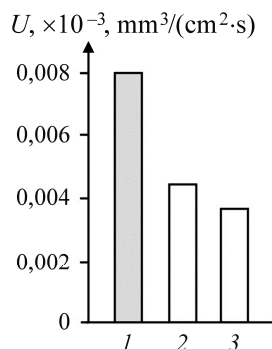


Рис. 5. Зносостійкість наплавлених дуговим методом матеріалів під час нормального тертя:

- 1 – сплав ПГ-10Н-01;
- 2 – КМ (10% МКМ + 90% ПГ-10Н-01);
- 3 – КМ (20% МКМ + 80% ПГ-10Н-01).

Fig. 5. Wear resistance of materials deposited by the arc method in the process of normal friction:

- 1 – ПГ-10Н-01 alloy;
- 2 – CM (10% MCM + 90% ПГ-10Н-01);
- 3 – CM (20% MCM + 80% ПГ-10Н-01).

Також під час випробувань на зношування в умовах нормального тертя визначили коефіцієнти тертя (K_f) для КМ по сталі 45 (50 HRC). Робочі поверхні зразків обробляли шліфуванням до шорсткості $R_a = 0,25 \mu\text{m}$ (рис. 6). Як бачимо, характер зміни кривих однаковий. Період припрацювання, коли коефіцієнт тертя зменшується, становить ~ 3 h, після чого він стабілізується. Результати дослідження свідчать, що шари КМ (10 і 20% МКМ) володіють меншими коефіцієнтами тертя у парі зі сталлю 45 порівняно зі сплавом ПГ-10Н-01: 0,07; 0,04 та 0,03 відповідно.

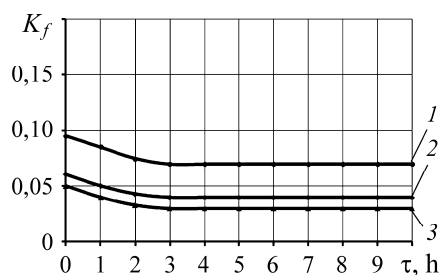


Рис. 6. Коефіцієнти тертя під час нормального тертя в парі зі сталлю 45 (50 HRC):

- 1 – сплав ПГ-10Н-01;
- 2 – КМ (10% МКМ + 90% ПГ-10Н-01);
- 3 – КМ (20% МКМ + 80% ПГ-10Н-01).

Fig. 6. Friction coefficients in the process of normal friction paired with steel 45 (50 HRC):

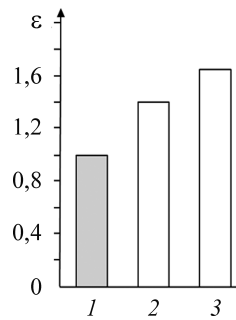
- 1 – ПГ-10Н-01 alloy;
- 2 – CM (10% MCM + 90% ПГ-10Н-01);
- 3 – CM (20% MCM + 80% ПГ-10Н-01).

Результати випробувань на тертя закріпленими абразивними частинками наведені на рис. 7. Як контрольний матеріал використовували сплав ПГ-10Н-01, його зносостійкість прийняли за одиницю.

Як свідчать результати випробувань на зносостійкість наплавлених дуговим методом матеріалів (рис. 7), абразивна зносостійкість КМ (10% МКМ + 90% ПГ-10Н-01) в 1,4 рази, а КМ (20% МКМ + 80% ПГ-10Н-01) в 1,65 рази перевищує показник для самофлюсівного сплаву ПГ-10Н-01.

Рис. 7. Зносостійкість наплавлених дуговим методом матеріалів за впливу закріплених абразивних частинок:
 1 – сплав ПГ-10Н-01; 2 – КМ (10% МКМ + 90% ПГ-10Н-01);
 3 – КМ (20% МКМ + 80% ПГ-10Н-01).

Fig. 7. Wear resistance of materials deposited by the arc method under influence of fixed abrasive particles:
 1 – ПГ-10Н-01 alloy; 2 – СМ (10% МСМ + 90% ПГ-10Н-01);
 3 – СМ (20% МСМ + 80% ПГ-10Н-01).



Морфологія поверхонь тертя добре узгоджується з результатами випробувань на тертя наплавлених шарів ПГ-10Н-01 і КМ закріпленими абразивними частинками (рис. 8).

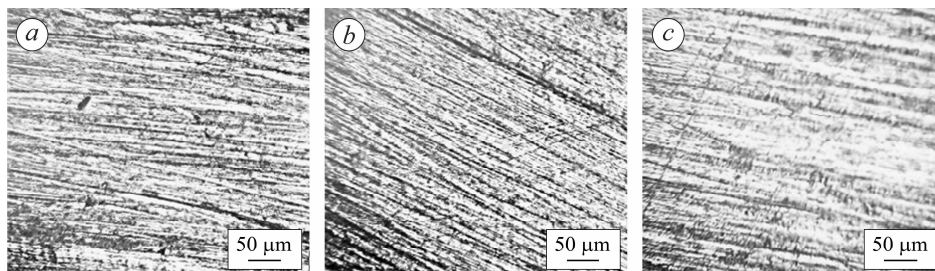


Рис. 8. Морфологія поверхонь тертя під час зношування наплавлених матеріалів за впливу абразиву: *a* – ПГ-10Н-01; *b* – КМ (10% МКМ + 90% ПГ-10Н-01); *c* – КМ (20% МКМ + 80% ПГ-10Н-01).

Fig. 8. Morphology of friction surfaces during wear of deposited materials under action of abrasive particles : *a* – ПГ-10Н-01 alloy; *b* – СМ (10% МСМ + 90% ПГ-10Н-01); *c* – СМ (20% МСМ + 80% ПГ-10Н-01).

Під час зношування за впливу абразиву виявлені досить глибокі паралельні канавки на шарі зі сплаву ПГ-10Н-01 (рис. 8*a*). Рельєф поверхні нерівномірний ($R_a = 1,35 \mu\text{m}$). На поверхні наплавлених шарів з КМ спостерігаємо неглибокі, дрібні і рівномірно розташовані подряпини від тертя ($R_a = 0,85 \mu\text{m}$ при 10% МКМ і $0,4 \mu\text{m}$ при 20% МКМ) (рис. 8*b, c*). Це пояснюємо введенням МКМ, який сприяє утворенню нових центрів кристалізації за наплавлення, яке в результаті призводить до подрібнення структури. Викришування твердих частинок (боридів, оксидів) не виявили.

ВИСНОВКИ

Шари композиційних матеріалів 10...20% МКМ + 90...80% ПГ-10Н-01 за дугового наплавлення містять у структурі тверді включення у вигляді боридів нікелю NiB, Ni₂B, Ni₃B, хрому CrB, Cr₂B, карбідів хрому Cr₃C₂, Cr₇C₃, силіциду нікелю Ni₃Si, оксидів титану (TiO), заліза (Fe₃O₄) та алюмінію (Al₂O₃), що забезпечує середню мікротвердість покриття 673...915 HV. Їх порівняли з базовим шаром ПГ-10Н-01 з основною зміцнювальною фазою Ni₃B та середньою мікротвердістю 520 HV. Для одержання МКМ зі застосуванням СВС використали порошки титану марки ВТ1-0, оксидів алюмінію Al₂O₃ і заліза Fe₂O₃, вуглецю марки ПМ-15, термореактивний порошок алюмініду нікелю ПТ-НА-01, алюмінієву пудру (порошок) ПАП-1. Встановлено, що в умовах зношування за впливу закріпленими абразивними частинками зносостійкість КМ (10% МКМ + 90% ПГ-10Н-01) в 1,4 рази, а КМ (20% МКМ + 80% ПГ-10Н-01) в 1,65 рази вища порівняно зі сплавом

ПГ-10Н-01. Зносостійкість наплавлених дуговим методом КМ з 10 і 20% МКМ під час нормального тертя в 1,9 і 2,16 рази перевищує зносостійкість самофлюсівного сплаву марки ПГ-10Н-01, що зумовлено введенням МКМ, який сприяє утворенню нових центрів кристалізації під час наплавлення і в результаті призводить до подрібнення структури та зниження коефіцієнта тертя до 0,03...0,04 порівняно з базовим сплавом ПГ-10Н-01 ($K_f = 0,07$). Таким чином, наявність у наплавленому шарі боридів нікелю NiB, Ni₂B, Ni₃B, хрому CrB, Cr₂B, карбідів хрому Cr₃C₂, Cr₇C₃, силіциду нікелю Ni₃Si, оксидів алюмінію (Al₂O₃), титану (TiO) та заліза (Fe₃O₄) призводить до зниження інтенсивності зношування за різних умов тертя.

1. *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, and O. Z. Student // *Materials Science*. – 2016. – **52**, № 3. – С. 365–370.
2. *Luzan S. O. and Luzan A. S. Microstructure and abrasive wear resistance of deposited materials of the Ni–Cr–B–Si system with inclusions of dispersed phases* // *Materials Science*. – 2020. – **56**, № 3. – С. 381–388.
3. *Luzan S. A., Sidashenko A. I., and Luzan A. S. Composite material for hardening of tillage machines working bodies containing titanium and chromium borides synthesized using shs-process* // *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. – 2020. – **42**, № 4. – P. 541–552. <https://doi.org/10.15407/mfint.42.04.0541>
4. *Prediction the melting characteristics of self-shielded flux cored arc welding (FCAW-S) with exothermic addition (CuO–Al)* / B. Trembach, O. Balenko, V. Davydov, V. Brechko, I. Trembach, and O. Kabatskyi // *IEEE 4th Int. Conf. on Modern Electrical and Energy System (MEES)*. – Kremenchuk, 2022. – P. 01–06.
5. *Effect of incomplete replacement of Cr for Cu in the deposited alloy of Fe–C–Cr–B–Ti alloying system with a medium boron content (0.5% wt.) on its corrosion resistance* / B. O. Trembach, M. G. Sukov, V. A. Vynar, I. O. Trembach, V. V. Subbotina, O. Yu. Rebrov, O. M. Rebrova, and V. I. Zakiev // *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. – 2022. – **44**, № 4. – P. 493–513.
6. *Разработка композиционного материала на основе оксидной керамики с включениями твердой смазки для газотермического напыления* / Ф. И. Пантелеенко, В. А. Оковитый, О. Г. Девойно, А. Ф. Пантелеенко, В. В. Оковитый // *Наука и техника*. – 2012. – № 4. – С. 17–21.
7. *Лузан А. С. Структурно-фазовий стан і трибологічні властивості наплавленого самофлюсувального сплаву ПГ-10Н-01, модифікованого матеріалом, що містить бор* // *Вісник Харківськ. нац. автомобільно-дорожнього ун-ту*. – 2020. – Вип. 88. – С. 95–102.
8. *Сідашенко О. І., Лузан А. С. Дослідження трибологічних характеристик наплавленого покриття, модифікованого композиційним матеріалом* // *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. – 2018. – № 14. – С. 128–135.

Одержано 24.02.2023