

Калінін Є.І.,
Лузан А.С.
Харківський національний технічний
університет сільськогосподарства
імені Петра Василенка
E-mail: kalininhtusg@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ БОРВМІСТНИХ
ДИСПЕРСНИХ ФАЗ НА ТРИБОЛОГІЧНІ
ХАРАКТЕРИСТИКИ НАПЛАВЛЕНОГО ПОКРИТТЯ
НА ОСНОВІ СПЛАВУ ПГ-10Н-01

УДК 621.793.7

DOI 10.37700/ts.2020.21.8-15

Калінін Є.І., Лузан А.С. «Дослідження впливу борвмістних дисперсних фаз на трибологічні характеристики наплавленого покриття на основі сплаву ПГ-10Н-01»

В роботі представлені результати дослідження триботехнічних характеристик наплавлених покриттів на основі сплаву ПГ-10Н-01, модифікованих розробленим композиційним матеріалом, що містить диборид титану, борид нікелю, оксиди титану і заліза. Дослідження наплавлених покриттів показали більш високу зносостійкість композиційних покриттів в порівнянні зі сплавом ПГ-10Н-01 в процесі нормального тертя, а також в абразивному середовищі.

Ключові слова: модифікуючий композиційний матеріал, СВС-процес, бориди, оксиди, зносостійкість, наплавлення.

Калинин Е.И., Лузан А.С. «Исследования влияния борсодержащих дисперсных фаз на трибологические характеристики наплавленного покрытия на основе сплава ПГ-10Н-01»

В работе представлены результаты исследования триботехнических характеристик наплавленных покрытий на основе сплава ПГ-10Н-01, модифицированных разработанным композиционным материалом, содержащим диборид титана, борид никеля, оксид титана и железа. Исследования наплавленных покрытий показали более высокую износостойкость композиционных покрытий по сравнению со сплавом ПГ-10Н-01 в процессе нормального трения, а также в абразивной среде.

Ключевые слова: модифицирующий композиционный материал, СВС-процесс, бориды, оксиды, износостойкость, наплавка.

E.I. Kalinin, A.S. Luzan "Investigation of the effect of boron-containing dispersed phases on the tribological characteristics of the deposited coating based on the PG-10N-01 alloy"

The paper presents the results of the study of tribotechnical characteristics of welded coatings based on PG-10N-01 alloy, modified with the developed composite material containing titanium diboride, nickel boride, titanium oxides and iron. Studies of welded coatings have shown higher wear resistance of composite coatings compared with the alloy PG-10N-01 in the process of normal friction, as well as in abrasive media.

Keywords: modifying composite material, SHS process, borides, oxides, wear resistance, surfacing.

Актуальність проблеми

Причина низького ресурсу деталей машин пов'язана переважно з зносом і корозійним пошкодженням їх поверхневих шарів. Абразивний знос превалює над усіма іншими: близько 40% деталей засобів транспорту і сільськогосподарських машин мають чисто абразивний знос і більш 50% – абразивний знос в комбінації з іншими видами зносу і руйнувань поверхневого шару. Тому проблема створення ефективних відновлювальних покриттів на поверхні деталей при ремонті машин є актуальною.

В даний час одержав розвиток новий напрям – застосування для відновлення деталей наплавлених покриттів, модифікованих композиційними матеріалами, з метою підвищення їх зносостійкості. Проте, поряд з широкими дослідженнями процесів тертя і зношування матеріалів з гомогенною і мікрогетерогенною структурою [1], зношування композиційних матеріалів (КМ), що містять карбід титану і інші зносостійкі матеріали досліджені недостатньо.

Аналіз публікацій за темою дослідження

Для протидії впливу зовнішнього середовища метал повинен мати тверду складову, що чинитиме опір впливу абразиву. Такою складовою в металі найчастіше є карбіди [2]. Ці карбіди повинні бути пов'язані матрицею, властивості якої мають подвійне значення: вона скріплює карбідні частинки і сама безпосередньо протидіє зношуванню. Так, тверда

матриця (мартенсит) сама по собі здатна протистояти абразивного зносу. В'язка матриця з нестабільного аустеніту також може забезпечити високу зносостійкість, оскільки, з одного боку, вона забезпечує гарне закріплення карбідів і опір металу ударним навантаженням, а з іншого – під впливом абразиву, в певних умовах, вона може зазнавати мартенситних перетворень в поверхневому шарі з підвищенням за рахунок цього опору впливу абразиву. В роботі [2] зроблено висновок, що зносостійкість з твердістю можна ототожнювати тільки для того ж матеріалу після різної термообробки. Для різних за структурною природою матеріалів зносостійкість з твердістю ототожнювати не можна.

Всі зносостійкі сплави мають високий вміст карбідів, боридів і карбоборидів, що забезпечує високу твердість і жароміцність захисних покриттів [2, 3].

Захисні покриття, що працюють при ударно-абразивному зношуванні, також включають дві складові частини – основу і зміцнюючу фазу [4, 5]. Основа є в'язкою матрицею, що утримує в собі тугоплавкі сполуки, які є зміцнюючою фазою.

Відомо, що сполуки металів з бором – бориди, мають високу твердість з пластичними властивостями і високу хімічну інертність, вони є одним з найбільш ефективних і економічних мікролегуючих елементів сталі. У більшості випадків мінімальна концентрація бору в металі для отримання позитивного результату становить близько однієї тисячної масової частки відсотка. Унікальність бору полягає в тому, що при такому малому вмісті в сталі, він здатний надавати на її властивості вплив, еквівалентний дії значно більшої кількості таких легуючих елементів, як Cr, Mo, Ni та ін. [6].

Характерною властивістю боридів є їх значна твердість, пов'язана з спрямованим характером і високою енергетичною міцністю міжатомних зв'язків. Наявність високої твердості у боридів пов'язана в основному з міцними ковалентними зв'язками В-В.

У ряді робіт [5, 7] зазначено, що для захисних покриттів, які працюють в умовах ударного або ударно-абразивного зносу, існує максимально допустимий обсяг зміцнюючої фази в покритті, який знаходиться в межах від 20 до 35%. При підвищенні в складі захисного покриття зміцнюючої фази більше 35% відбувається збільшення внутрішніх напружень, зниження кількості більш пластичної фази (основи), що в кінцевому рахунку, призводить до зниження ударної в'язкості.

Це пов'язано з фактором, при якому абразив може не тільки ковзати по поверхні, але і проникати між пластичною основою і карбідом, що призведе, в кінцевому підсумку, до випадання частки карбїду. При цьому необхідно зазначити, що присутність в сплаві боридів призводить до суттєвого підвищення зносостійкості, але стійкість до ударного зносу знижується в рази через більш високі значення твердості [2, 8, 9].

Мета дослідження

Дослідження триботехнічних характеристик наплавлених покриттів на основі матеріалу системи Ni-Cr-B-Si, модифікованого борвмістними елементами.

Результати дослідження

Багаторічна практика застосування феробору показала, що здійснити мікролегування сталі бором з його допомогою досить складно. Пов'язано це, в першу чергу, з високою реакційною здатністю бору в сталевому розплаві і його високою хімічною спорідненістю по відношенню до кисню і азоту. Крім того, в більшості випадків потрібно забезпечити в металі вкрай малу концентрацію розчиненого бору.

Тому при отриманні композиційного матеріалу будемо синтезувати диборид титану із застосуванням СВС-процесу (1):



Крім цього слід зазначити високий екзотермічний ефект реакції утворення карбиду титану (2):



За рахунок тепла що виділяється, температура твердих і розплавлених продуктів реакції досягає 2500-3500 К, тому реакція не залежить від зовнішніх джерел нагріву і може поширюватися як хвиля горіння, яка сама виробляє енергію для свого поширення.

В рамках проведених досліджень відпрацьовувалися склади вихідних порошкових сумішей і режими їх механоактивації для отримання композиційних матеріалів (КМ) для наплавлення.

В якості вихідних матеріалів для отримання модифікуючого композиційного матеріалу (МКМ) використовували порошки титану марки ВТ1-0, бору В і вуглецю марки ПМ-15. Крім того, для збільшення теплового ефекту СВС процесу в механічну суміш вводили термореагуючий порошок алюмінід нікелю ПТ-НА-01, алюмінієву пудру (порошок) ПАП-1 ГОСТ 5494-95 і оксид заліза Fe_2O_3 [10].

Фракційний склад всіх вихідних порошкових компонентів знаходився в межах (63...100) мкм. Співвідношення компонентів в суміші було еквімолярним, щоб в результаті подальшої СВС-реакції відбувався синтез боридів стехіометричного складу [11].

На рис. 1 представлені результати зносних випробувань покриттів ПГ-10Н-01 і КМ (20% МКМ + 80% ПГ-10Н-01) на машині тертя МІ за схемою диск-колодка в середовищі індустриального мастила з питомим навантаженням 8 МПа.

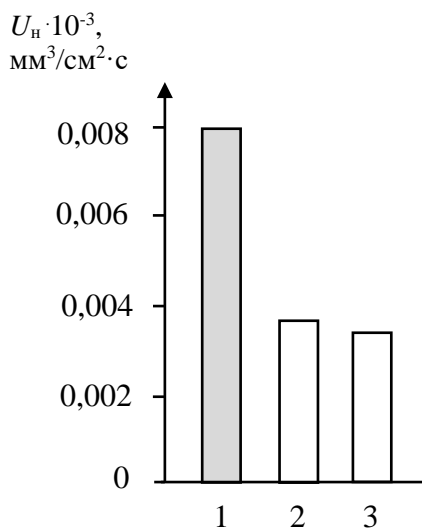


Рис. 1. Зносостійкість наплавлених електродуговим методом матеріалів в процесі нормального тертя: 1 – сплав ПГ-10Н-01; 2 – КМ (10% МКМ + 90% ПГ-10Н-01); 3 – КМ (20% МКМ + 80% ПГ-10Н-01)

Досліджувані покриття КМ, наплавлені електродуговим методом, наносились на колодку. Перед початком випробувань здійснювалась їх приробка в кількості $N = 30 \cdot 10^3$ циклів для забезпечення контакту по всій поверхні тертя. Тривалість випробувань $200 \cdot 10^3$ циклів або 16,6 годин. Виміри зносу шляхом зваження здійснювалися через кожні $20 \cdot 10^3$ циклів.

Дослідження інтенсивності зношування в процесі нормального тертя покриттів на машині тертя МІ показали більш високу зносостійкість КМ. Так зносостійкість КМ складу (10% МКМ + 90% ПГ-10Н-01) в 2,1 рази перевищує зносостійкість самофлюсівного сплаву марки ПГ-10Н-01 ($0,0038 \cdot 10^{-3}$ і $0,008 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^3/\text{см}^2 \cdot \text{с}$ відповідно), КМ (20% МКМ + 80% ПГ-10Н-01) в 2,35 рази ($0,0034 \cdot 10^{-3}$ і $0,008 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^3/\text{см}^2 \cdot \text{с}$ відповідно) (рис. 1).

Результати випробувань на тертя о закріплені частки представлені на рис. 2. В якості контрольного матеріалу використовувався сплав ПГ-10Н-01, його зносостійкість була прийнята за одиницю.

Як свідчать результати випробувань на зносостійкість наплавлених електродуговим методом матеріалів (рис. 2), абразивна зносостійкість КМ (10% МКМ + 90% ПГ-10Н-01) в 1,5 рази, а КМ (20% МКМ + 80% ПГ-10Н-01) в 1,7 раз перевищує показник для самофлюсівного сплаву ПГ-10Н-01.

Таким чином, наявність в наплавленому покритті дибориду титану (TiB_2), боридів хрому (CrB) і нікелю (Ni_3B), оксидів титану та заліза призводить до зниження інтенсивності зношування.

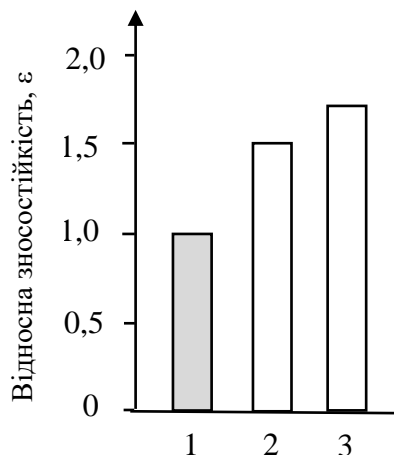


Рис. 2. Зносостійкість наплавлених електродуговим методом матеріалів в умовах впливу закріплених частинок абразиву

На підставі експериментальних даних була побудована залежність відносної зносостійкості при терті о закріплені частки в залежності від кількісного вмісту МКМ в композиційному матеріалі (рис. 3).

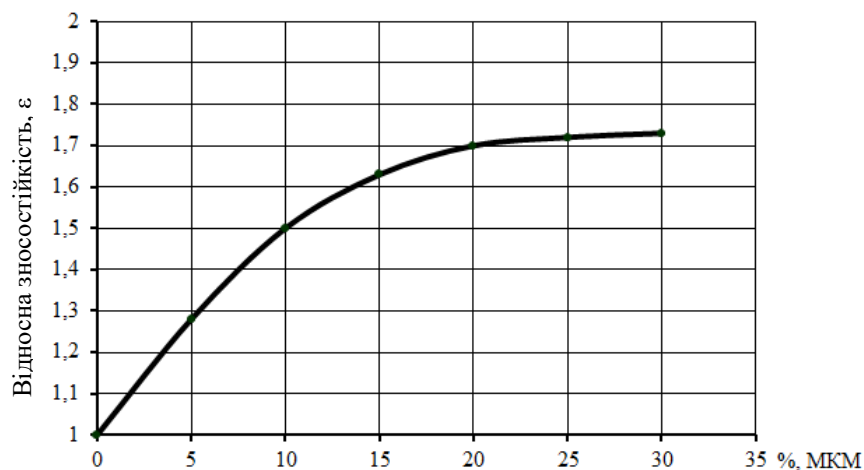


Рис. 3. Відносна зносостійкість покриттів КМ в залежності від вмісту МКМ

Згідно з результатами випробувань, наведеними на графіку, зносостійкість наплавленого покриття підвищується зі збільшенням вмісту МКМ в композиційному матеріалі. Необхідно відзначити, що в інтервалі вмісту МКМ від 0 до 15% зносостійкість зростає більш інтенсивно, ніж в подальшому інтервалі від 15 до 30%. У той же час слід зазначити, що перевищення вмісту в композиційному матеріалі синтезованого МКМ більше 20% погіршує його наплавочно-технологічні властивості.

Морфологія поверхонь тертя також добре узгоджується з результатами випробувань на тертя о закріплені частки наплавлених покриттів ПГ-10Н-01 і КМ (рис. 4).

При зношуванні в умовах впливу закріплених частинок абразиву виявлені досить глибокі паралельні канавки на покритті зі сплаву ПГ-10Н-01 (рис. 4).

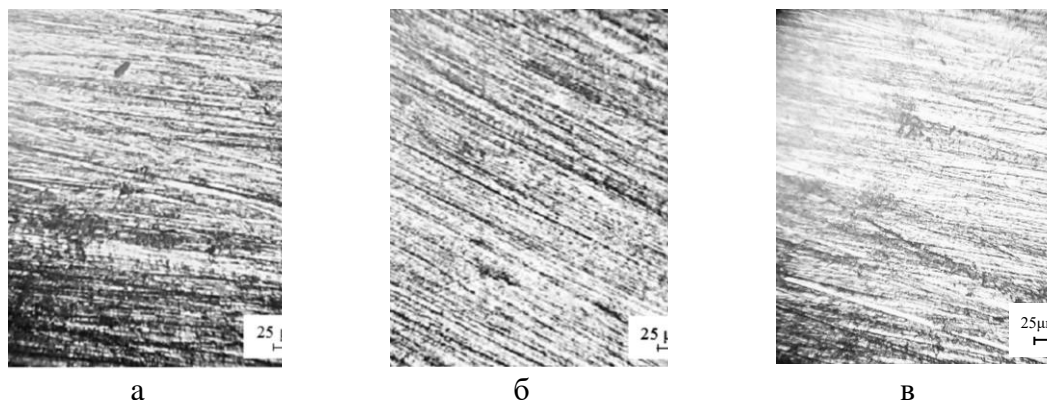


Рис. 4. Морфологія поверхонь тертя при зношуванні о закріплені частинки абразиву наплавлених матеріалів
а – ПГ-10Н-01, б – КМ (10% МКМ + 90% ПГ-10Н-01), в – КМ (20% МКМ + 80% ПГ-10Н-01)

Також зустрічаються і більш глибокі борозенки від відколовшихся твердих частинок боридів від нікелевої матриці. Рельєф поверхні зношування має нерівномірний характер. На поверхнях наплавлених покриттів з КМ спостерігаються неглибокі, дрібні і рівномірно розташовані подряпини від тертя (рис. 4, б і в), причому зі збільшенням вмісту МКМ подряпини стають більш дрібними. Це пояснюється введенням МКМ, який сприяє утворенню нових центрів кристалізації при напавленні і в результаті призводить до подрібнення структури. Пластична матриця на основі нікелю ПГ-10Н-01 перерозподіляє напруги, забезпечуючи умови, в яких тверді складові займають сприятливе положення. Завдяки цьому усувається локальне підвищення контактного тиску і знижується ймовірність відриву твердих зносостійких частинок. При введенні модифікуючого матеріалу в кількості до 20%

Для досліджень зносостійкості поверхневих шарів при терті в умовах впливу нежорстко закріплених абразивних частинок використовували річковий пісок з розміром частинок ~ 200 мкм.

На рис. 5 представлені залежності втрати маси досліджуваних наплавлених покриттів від шляху тертя.

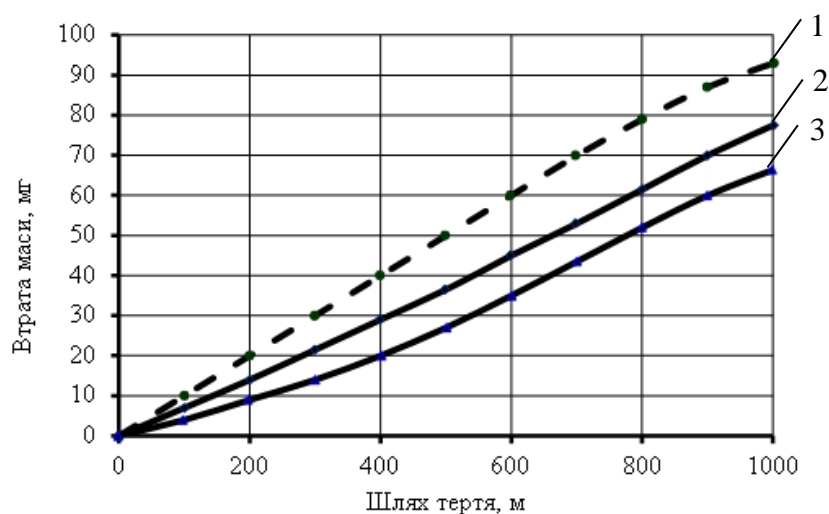


Рис. 5. Втрати маси наплавлених покриттів при впливі нежорстко закріплених абразивних частинок
1 – ПГ-10Н-01, 2 – КМ (10% МКМ + 90% ПГ-10Н-01), 3 – КМ (20% МКМ + 80% ПГ-10Н-01)

З аналізу отриманих залежностей можна зробити висновок, що характер зношування матричного ПГ-10Н-01 і композиційних матеріалів (2, 3) однаковий. Абразивна стійкість у

композиційних матеріалів вища, ніж у самофлюсівного сплаву ПГ-10Н-01, причому зі збільшенням вмісту в композиційному матеріалі МКМ його зносостійкість збільшується.

На рис. 6 представлені результати дослідження відносної зносостійкості наплавлених шарів в умовах впливу нежорстко закріплених абразивних частинок, яку оцінювали відповідно до ГОСТ 23.208-79 за формулою:

$$K_z = \frac{\bar{g}_e \rho_d N_d}{\bar{g}_d \rho_e N_e}, \quad (3)$$

де ρ_e, ρ_d , – щільності еталонного та досліджуваного матеріалів, г/см³;

N_e, N_d – кількість обертів ролика при випробуваннях еталонного та досліджуваного матеріалів.

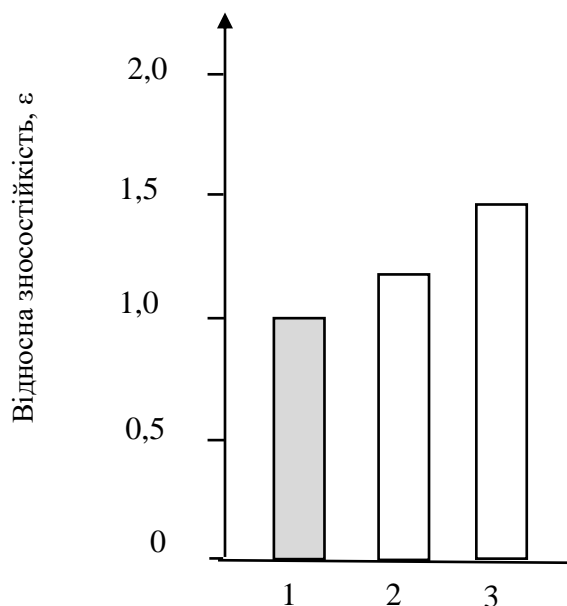


Рис. 6. Відносна зносостійкість наплавлених електродуговим методом матеріалів при терті в умовах впливу нежорстко закріплених абразивних частинок

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

З аналізу рис. 6 видно, що відносна зносостійкість наплавленого композиційного матеріалу, що містить 10% МКМ в 1,2 рази, а 20% МКМ в 1,4 рази більше в порівнянні зі сплавом ПГ-10Н-01.

Такі результати обумовлені більш високою здатністю композиційних матеріалів чинити опір процесам мікрорізання за рахунок формування структури на основі нікелевої матриці, в якій містяться рівномірно розподілені тверді включення у вигляді дибориду титану (TiB_2), боридів нікелю (Ni_3B) і хрому (CrB), оксидів титану (TiO) та заліза (Fe_3O_4).

Поверхня тертя в лунці зносу наплавлених зразків сплавом ПГ-10Н-01 характеризується наявністю глибоких подряпин (рис. 7, а), що свідчать про розвиток процесу інтенсивного зношування. Покриття, отриманому при наплавленні сплаву ПГ-10Н-01, відповідає високий рівень шорсткості матеріалу, який складає $R_a = 1,32$.

Поверхні тертя в лунках зносу наплавлених зразків композиційним матеріалом характеризуються також наявністю подряпин, але менших за розміром. Так шорсткість КМ (10% МКМ + 90% ПГ-10Н-01) складає $R_a = 0,82$ та $R_a = 0,38$ (20% МКМ + 80% ПГ-10Н-01) (рис. 7 б, в). Викришування твердих частинок (боридів, оксидів) не встановлено.

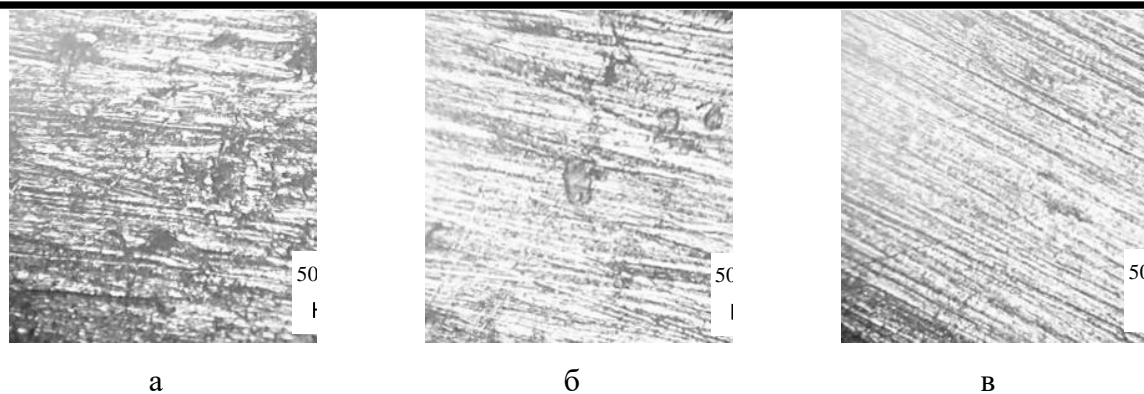


Рис. 7. Поверхні зношування матеріалів після випробувань в умовах впливу нежорстко закріплених абразивних частинок

Порівняльний аналіз свідчить про те, що в умовах впливу нежорстко закріплених абразивних частинок наплавлені шари композиційними матеріалами характеризуються більш високою стійкістю.

Висновки

Результати дослідження впливу борвмістних дисперсних фаз на трибологічні характеристики наплавленого покриття на основі сплаву ПГ-10Н-01 показали підвищення його зносостійкості в різних умовах тертя. Так в умовах тертя ковзання зносостійкість розробленого КМ складу (10% МКМ + 90% ПГ-10Н-01) в 2,1 рази перевищує зносостійкість самофлюсівного сплаву марки ПГ-10Н-01, КМ (20% МКМ + 80% ПГ-10Н-01) в 2,35 рази. При терті в умовах впливу закріплених абразивних частинок зносостійкість КМ в 1,5-1,7 рази вища в порівнянні зі сплавом ПГ-10Н-01.

Абразивна стійкість у композиційних матеріалів при терті в умовах впливу нежорстко закріплених абразивних частинок також вища, ніж у самофлюсівного сплаву ПГ-10Н-01 в 1,2-1,4 рази. Поверхня тертя в лунці зносу наплавлених зразків сплавом ПГ-10Н-01 характеризується наявністю глибоких подряпин ($R_a = 1,32$), КМ також наявністю подряпин, але менших за розміром. Так шорсткість КМ (10% МКМ + 90% ПГ-10Н-01) складає $R_a = 0,82$ та $R_a = 0,38$ (20% МКМ + 80% ПГ-10Н-01). Викришування твердих частинок (боридів, оксидів) не встановлено.

Список використаних джерел,

1. Сорокин Г.М. Трибология сталей и сплавов / Г.М. Сорокин – М.:ОАО"Недра",2000.–317с.
2. Лившиц Л.С. Металловедение для сварщиков (сварка сталей) / Лившиц Л.С. – М.: Машиностроение, 1979. – 253 с.
3. Сидоров, А. И. Восстановление деталей машин напылением и наплавкой / А. В. Сидоров. - М.: Машиностроение, 1987. – 192 с.
4. Кудинов, В. Д. Наплавка композиционным сплавом деталей металлургического оборудования / В. Д. Кудинов, Б. В. Филимонов, С. А. Шевцов // Автоматическая сварка. – 1985. – № 5. – С. 48-50.
5. Киселев В. С., Радченко М. В. Создание информационно-измерительной системы диагностики сверхзвуковой газопорошковой наплавки покрытий на основе никеля и технических алмазов // Сварка и диагностика. – 2013. – № 5. – С. 50 - 53.
6. Собачкин А.В. Формирование износостойких покрытий для деталей сельскохозяйственного машиностроения при электродуговой наплавке многокомпонентных

механоактивированных СВС-материалов : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.16.09 «Материаловедение (в машиностроении)». – Барнаул, 2013. – 22 с.

7. Пантелеенко, Ф. И. Влияние структуры защитных покрытий на их износостойкость / Ф. И. Пантелеенко, Л. Г. Ворошин, С. Н. Любецкий // Трение и износ. – 1991. – Т.12. – № 2. – С. 310-314.

8. Лузан С.А. СВС-процессы в технологиях упрочнения и восстановления деталей машин наплавкой и газотермическими способами напыления покрытий (обзор) / С.А. Лузан, А.И. Сидашенко, А.С. Лузан // Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів. – Харків: 2016. - № 6. – С. 152-162.

9. Туренко А.Н. Интегрирование технологии газотермического напыления покрытий и метода электроискрового легирования / А.Н. Туренко, А.С. Полянский, С.А. Лузан // Автомобильный транспорт : сб. научн. трудов. – 2011. – Вып. 28. – С. 109-113.

10. Luzan S.A. Composite material for hardening of tillage machines working bodies containing titanium and chromium borides synthesized using SHS-process // S.A. Luzan, A.I. Sidashenko, A.S. Luzan // Металлофизика и новейшие технологии. – 2020. – Т. 42. – Вып. 4. – С. 541-552.

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.

References

1. Sorokin G.M. Tribologiya stalej i splavov / G.M. Sorokin – М.:ОАО"Недра", 2000.–317 с.
2. Livshic L.S. Metallovedenie dlya svarshikov (svarka stalej) / Livshic L.S. – М.: Mashinostroenie, 1979. – 253 s.
3. Sidorov, A. I. Vosstanovlenie detalej mashin napyleniem i naplavkoj / A. B. Sidorov. - М.: Mashinostroenie, 1987. – 192 s.
4. Kudinov, V. D. Naplavka kompozicionnym splavom detalej metallurgicheskogo oborudovaniya / V. D. Kudinov, B. V. Filimonov, C. A. Shevcov // Avtomaticheskaya svarka. – 1985. – № 5. – S. 48-50.
5. Kiselev B. C., Radchenko M. V. Sozdanie informacionno-izmeritelnoj sistemy diagnostiki sverhzhukovoj gazoporoshkovej naplavki pokrytij na osnove nikelya i tehnicheskixalmazov // Svarka i diagnostika. – 2013. – № 5. – S. 50 - 53.
6. Sobachkin A.V. Formirovanie iznosostojkix pokrytij dlya detalej selsko-hozyajstvennogo mashinostroeniya pri elektrodugovoj naplavke mnogokomponentnyh mehanoaktivirovannyh SVS-materialov : avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk : spec. 05.16.09 «Materialovedenie (v mashinostroenii)». – Barnaul, 2013. – 22 s.
7. Panteleenko, F. I. Vliyanie struktury zashitnyh pokrytij na ih iznosostojkost / F. I. Panteleenko, L. G. Voroshin, S. N. Lyubeckij // Trenie i iznos. – 1991. – Т.12. – № 2. – S. 310-314.
8. Luzan S.A. SVS-processy v tehnologiyah uprochneniya i vosstanovleniya detalej mashin naplavkoj i gazotermicheskimi sposobami napyleniya pokrytij (obzor) / S.A. Luzan, A.I. Sidashenko, A.S. Luzan // Tehnichnij servis agropromislovogo, lisovogo ta transportnogo kompleksiv. – Harkiv: 2016. - № 6. – S. 152-162.
9. Turenko A.N. Integrirovaniye tehnologii gazotermicheskogo napyleniya pokrytij i metoda elektroiskrovogo legirovaniya / A.N. Turenko, A.S. Polyanskij, S.A. Luzan // Avtomobilnyj transport : sb. nauchn. trudov. – 2011. – Vyp. 28. – S. 109-113.
10. Luzan S.A. Composite material for hardening of tillage machines working bodies containing titanium and chromium borides synthesized using SHS-process // S.A. Luzan, A.I. Sidashenko, A.S. Luzan // Metallofizika i novejschie tehnologii. – 2020. – Т. 42. – Vyp. 4. – S. 541-552.
11. Patent № 133419, Ukrayina, MPK (2019.01) C22C 14/00, B22F 1/00. Shihta dlya otrimannya kompozicijnogo znosostijkogo materialu z vikoristannyam SVS-procesu / S.O. Luzan, O.I. Sidashenko, A.S. Luzan – Opubl. 10.04.2019; Byul. № 7.