

Сідашенко О.І.,
Лузан А.С.
Харківський національний
технічний університет
сільського господарства
імені Петра Василенка
E-mail: khadi.luzan@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИБОЛОГІЧНИХ
ХАРАКТЕРИСТИК НАПЛАВЛЕНОГО ПОКРИТТЯ,
МОДИФІКОВАНОГО КОМПОЗИЦІЙНИМ
МАТЕРІАЛОМ

УДК 631.3.004.8:339.13

Розглянуто питання розробки та дослідження трибологічних характеристик наплавлених покриттів на основі сплаву ПГ-10Н-01, модифікованих композиційним матеріалом, що містить карбід і борид титану. Розроблений композиційний матеріал підвищує зносостійкість відновлювальних покриттів і його можна рекомендувати для відновлення робочих органів ґрунтообробних машин.

Ключові слова: композиційний матеріал, СВС-процес, модифікування, механоактивація, компоненти, трибологічні характеристики, зносостійкість, знос.

Вступ. Аналіз досліджень зносостійкості та надійності сільськогосподарської техніки (СГТ) свідчить про те, що зношування є основною причиною втрати працездатності і відмов ресурсовизначальних деталей і робочих органів.

Геометрична форма спрацьованої робочої поверхні визначає працездатність і методи компенсації зносу деталей, вибір технологій їх відновлення та зміцнення. При терті та зношуванні для деталей, крім геометричних параметрів, важливим чинником є матеріал, структура і інші властивості. Необхідно відзначити, що деталі і робочі органи СГТ переважно виготовляють з середньовуглецевих та низьколегованих сталей, які піддають термічній обробці та хімікотермічній обробці з подальшим гартуванням [1].

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 [2, 3], зношування композиційних матеріалів (КМ), що містять карбід титана і інші зносостійкі матеріали досліджені недостатньо.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Створення КМ базується на основі поєднання в певному об'ємі матеріалів різних класів, що володіють цілим комплексом властивостей характерних металу, кераміці або полімеру в залежності від вмісту компонентів [4, 5].

Природа вихідних компонентів, їх фазовий стан, співвідношення, стан границі поділу фаз і створення певної мікро- і макроструктури визначають властивості КМ, необхідні для підвищення зносостійкості деталей і робочих органів СГТ [6, 7].

Найбільш керованим є КМ з порошків, які являють собою інтегровані комплекси вихідних компонентів (метал, кераміка, пластмаса) у кожній порошковій частинці [8, 9], а їх плакування може бути здійснено: з твердої фази; з розплаву, з водяних розчинів, з газової фази, у вакуумі.

Стабільними по складу і конструкції є заздалегідь сформовані КМ з визначеним рівнем зв'язку між компонентами та високою технологічністю. Зазначене сприяє одержанню більш високої якості КМ у порівнянні з відокремленими компонентами або з несформованих композицій (механічних сумішей, шлікерів, суспензій, розчинів і т.п.).

Методи зміцнення деталей КМ можна поділити на три основні групи: рідкофазні, твердофазні і процеси осадження і напилювання. Найбільш поширеними з них для робочих органів СГТ при виготовленні і відновлюванні є: наплавлення, газотермічне напи-

лювання, наварювання, припикання, електрохімічне і хімічне осадження, комбіновані методи [8-10].

На практиці ефективними є комбінації технологічних способів зміцнення: напилювання і оплавлення, напилювання і контактне наварювання або припикання, напилювання і просочення, електролітичне осадження і термообробка та інші. Необхідно відзначити, що оплавлення висококонцентрованими потоками енергії, наприклад лазерна обробка, забезпечує формування покриття з дрібнодисперсною структурою, армованої з рівномірно розподіленими зміцненими фазами, що відрізняється високими триботехнічними властивостями [9, 11, 12]. Термічна обробка концентрованими потоками енергії дозволяє підсилити міжфазну взаємодію між компонентами в КМ і підвищити їх експлуатаційні характеристики.

На основі аналізу робіт, присвячених теорії тертя і зношування, В.А. Белого, В.Я. Белоусова, Д.М. Гаркунова, Б.І. Костецького, В.І. Крагельського, М.М. Хруцова та інших [13-18] можна сформулювати основні вимоги до композиційних матеріалів, що підвищують абразивну стійкість наплавлених покриттів:

- структура КМ повинна бути гетерогенною і складатися з твердих наповнювачів (включень), рівномірно розподілених в пружно-пластичній матриці;
- структура КМ не повинна істотно змінюватися в процесі тертя;
- шар КМ, нанесений на поверхню деталі, повинен мати меншу міцність ніж шари, що лежать нижче;
- поверхневий шар, зміцнений КМ, в процесі тертя не може підлягати наклепуванню;
- до складу КМ рекомендується вводити речовини, здатні працювати як тверде мастило;
- між структурними складовими КМ має бути адгезійний зв'язок;
- коефіцієнти тертя твердих наповнювачів між собою і по матеріалу матриці КМ повинні бути мінімальними та ін.

Вимоги до структури і властивостей зносостійких КМ можуть бути уточнені і конкретизовані в процесі експериментальних та теоретичних досліджень в залежності від типу триботехнічної системи, умов тертя і виду зношування [4, 13, 19]: мінімізація пористості; забезпечення гетерогенної структури матеріалу зерна твердих складових з розмірами близькими до абразивної частинки і рівномірним їх розподілом в пружнопластичній матриці; адгезійний зв'язок між компонентами має бути достатньо міцним; в умовах абразивного зношування співвідношення твердості зміцненого матеріалу й абразивної частинки $K \geq 1,0 \dots 1,2$.

Постановка проблеми. Метою даної роботи є дослідження трибологічних характеристик, розробленого зносостійкого композиційного матеріалу для модифікування наплавлених покриттів.

Основна частина. Аналіз експлуатаційних характеристик КМ триботехнічного призначення [5, 9, 13] свідчить, що вони визначаються умовами роботи триботехнічних систем і в широких межах варіюються: низькі значення коефіцієнта тертя і висока зносостійкість; поєднання оптимальної об'ємної і поверхневої міцності з легкою припрацьовуваністю поверхонь спряжених деталей та достатньої в'язкості для виключення крихкого руйнування; висока втомна міцність; здатність утворювати шари вторинної структури; достатня теплопровідність і оптимальні значення коефіцієнта теплового розширення; наявність запасу твердого або рідкого мастила; економічність і технологічність при виготовленні [5, 11].

У якості технологічних ознак формування КМ [20], то можна виділити основні групи шляхів одержання і підвищення їх зносостійкості: зменшення пористості, утворення дрібнозернистої гетерогенної структури, її стабілізація і сферодізація. Виявлено,

що основними тенденціями підвищення зносостійкості деталей з удосконаленням технологій зміцнення робочих органів СГТ КМ є:

- гетерогенізація структури КМ із забезпеченням оптимального розподілу напружень і зосередженням передачі навантаження на їх тверді складові, що мають порівняно невисокий коефіцієнт тертя і суттєво не зношують спряжену поверхню;
- формування зміцненого шару КМ з регульованою пористістю, використанням перколяційних процесів та облітерації;
- введення частинок твердого мастила (графіту, сульфідів, селенідів, фторидів і т.п.) в якості наповнювачів КМ;
- використання КМ на основі матриць з нікелю, заліза, кобальту, алюмінію, а в якості наповнювачів – карбідів, боридів, оксидів, нітридів, інтерметалідів та полімерних матеріалів;
- застосування ХТО, механоактивації складових КМ, дисперсійних твердіння і зміцнення та армування вуглецевими, боридними, скляними волокнами матриці.

При виготовленні робочих органів ґрунтообробних машин застосування конструкторських методів підвищення зносостійкості [21] дозволяє: оптимізувати геометрію і форму робочих органів та різальних елементів; оптимізувати локальні області і робочі поверхні, які підлягають зміцненню; ввести в конструкцію легкозмінні елементи; передбачити резервування зносостійкості в деталях робочих органів; розробити систему контролю зносу робочих органів; забезпечити реалізацію ефекту самоорганізації при різних варіантах і типах зміцнення та модифікування матеріалів робочих органів.

Ефективність конструкторських заходів реалізують переважно на стадії виготовлення і застосування технологічних методів підвищення зносостійкості оптимізацією параметрів обробки з можливістю керування ступеню зміцнення локальних областей і робочих поверхонь робочих органів ґрунтообробних машин в цілому. На сьогодні для виготовлення активних і пасивних робочих органів ґрунтообробних машин застосовують: матеріали з високою твердістю – сталі карбідних класів, які зміцнюють методами ТО, ХТО, ТМО; спеціальні чавуни, леговані хромом, марганцем, вольфрамом, нікелем; сталі та чавуни з аустенітно-карбідною структурою, в яких аустеніт нестабільний і здатний до мартенітного перетворення в процесі тертя; проводять зміцнення КМ. Загальновідомо, що чим вища твердість матеріалу, тим більша його крихкість, а тому використання таких матеріалів обмежується умовами експлуатації робочих органів ґрунтообробних машин, особливо це стосується умов динамічних навантажень, які викликають об'ємне руйнування.

Для технологічних методів зміцнення робочих органів ґрунтообробних машин найчастіше використовують наплавлення [5, 6]: ручне та механізоване; плазмо-дугове, індукційне, лазерне та ін.

Технологія наплавлення повинна забезпечувати рівномірність шару твердого сплаву по товщині і властивостям (зносостійкість, міцність), рівномірність розподілення пор і тріщин, що переходять із твердого сплаву в основний метал. При виробництві робочих органів ґрунтообробних машин майже 90 % усіх наплавочних робіт виконуються при індукційному нагріванні СВЧ, що пояснюється: високою продуктивністю процесу; достатньою якістю наплавленого шару за хімічним складом, щільністю, структурною однорідністю і шорсткістю поверхні; можливістю одержання тонких шарів наплавленого металу (до 0,3 мм) [1]. При цьому наплавлювальні сплави повинні мати мінімальну магнітну проникність і температуру плавлення на 150...200 К нижче температури плавлення основного металу. До таких сплавів відносяться сормайт у виді гранульованого порошку ПГ-С27, ФБХ-6-2, самофлюсуючі сплави системи Ni-Cr-B-Si порошки типу ПГ-10Н-01 із високими наплавочними властивостями і зносостійкістю [6, 22]. Але поряд з перевагами, індукційне наплавлення має недоліки: об'ємний термічний вплив може викликати

зміцнення матеріалу основи; спосіб не дає можливості зміцнювати локальні ділянки робочої поверхні деталі; номенклатура зміцнюваних деталей залежить від геометричної конфігурації індукторів; висока енергоємність індукційного наплавлення та ін., а також недостатня абразивна зносостійкість [1].

Ця обставина привела до створення нових композиційних матеріалів з високою абразивною зносостійкістю методом високотемпературного синтезу (СВС). При цьому в процесі підготовки шихти для проведення СВС-синтезу проводиться механоактивація компонентів суміші.

Виконання операції механоактивації реакційної суміші в атриторі дозволяє зробити взаємоподрібнення вихідних порошків і сформувати композиційні частки з рівномірним розподілом вихідних реагентів за обсягом, а також знижує тепловтрати при синтезі, підвищує активність системи і гомогенність продукту горіння. Найбільш популярними є композиції на основі карбіду титану. Це пов'язано з високим екзотермічним ефектом реакції освіти карбіду титану з елементів (179 кДж / моль), що забезпечує широкий вибір матеріалу зв'язки [22].

Завдяки теплу, 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, що сама виробляє енергію для свого поширення. Незважаючи на високу температуру, перехід будь-якого з компонентів суміші в газову фазу незначний, і їм можна знехтувати. Бор 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 мати на її властивості вплив, еквівалентний дії значно більшої кількості таких легуючих елементів, як Cr, Mo, Ni та ін. Використання бору для легування сталі привабливо також з точки зору безпеки його застосування і екологічної нешкідливості. Однак, існують певні труднощі з борним мікролегуванням сталі, які до теперішнього часу залишаються невирішеними. Традиційним матеріалом, використовуваним для борного легування сталі, є ферробор. Багаторічна практика застосування ферробору 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:



В якості вихідних матеріалів для отримання порошкових наплавочних сумішей використовували порошки титану марки ВТ1-0, бору В, вуглецю марки ПМ-15 з метою синтезування карбіду і дибориду титану. Крім того, для збільшення теплового ефекту в процесі синтезу карбіду і дибориду титану в механічну суміш, вводиться термореагуючий порошок алюмініду нікелю ПТ-НА-01, алюмінієвий порошок ПАП-1 ГОСТ 5494-95 і оксид заліза Fe₂O₃. Фракційний склад всіх вихідних порошкових компонентів знаходиться в межах (63 ... 100) мкм.

Обрані компоненти змішувалися, і отримана порошкова суміш піддавалася механічній активації. Вибір даного способу впливу на матеріали обумовлений необхідністю створення композитів, в мікрооб'ємах яких повинна відбуватися реакція СВС. Функцію матричного матеріалу виконував самофлюсуючий наплавочний порошок марки ПГ-10Н-01 ТУ 322-19-004-96.

На рис. 1 представлені результати зносних випробувань наплавлених покриттів ПГ-10Н-01 і ПГ-10Н-01, модифікованих композиційним матеріалом (КМ), отриманим із застосуванням СВС-процесу з наступних компонентів (Ti+B+C+Fe₂O₃+Al), на машині тертя типу МІ за схемою диск-колодка в середовищі індустриального мастила з питомим навантаженням 8 МПа. износных испытаний

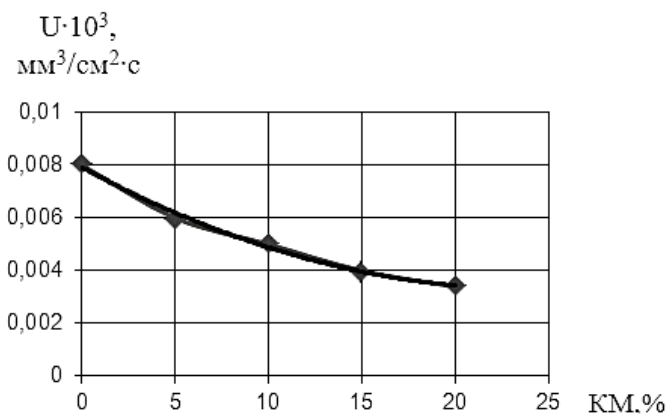


Рис. 1 – Залежність інтенсивності зношування наплавленого покриття на основі сплаву ПГ-10Н-01 в парі зі сталлю 45 HRC 50 від змісту композиційного матеріалу

З аналізу рис. 1 видно, що навіть мале додавання КМ значно підвищує зносостійкість покриття в порівнянні з матричним сплавом ПГ-10Н-01. Характер кривої свідчить про те, що зі збільшенням вмісту в матеріалі що наплавляється КМ інтенсивність зношування зменшується і при досягненні вмісту 20% КМ її величина в 2,35 разів менше, ніж у матричного сплаву ПГ-10Н-01. Експериментально встановлено, що перевищення вмісту в композиційному матеріалі синтезованого модифікуючого композиційного матеріалу більше 20% погіршує його наплавочно-технологічні властивості.

На рис. 2 показані залежності коефіцієнтів тертя $k_{тр}$ у наплавлених покриттях на основі сплаву ПГ-10Н-01 від питомого навантаження в процесі тертя. Результати випробувань показали, що коефіцієнти тертя у наплавлених покриттях на основі сплаву ПГ-10Н-01, що містять КМ, незначно вище, ніж у матричного матеріалу ПГ-10Н-01. Необхідно відзначити, що зі збільшенням вмісту КМ в наплавляемому матеріалі, коефіцієнт тертя зростає. Це можна пояснити тим, що тверді частинки карбиду і дибориду титану в умовах тертя вириваються з поверхні покриття і потрапляють в зону тертя, утворюючи канавки в більш м'якому матричному матеріалі, що і призводить до підвищення коефіцієнтів тертя. При збільшенні питомої тиску до 8 МПа за рахунок приробітки і наявності продуктів зносу в зоні тертя зразків коефіцієнт тертя знижується, що пояснюється заповненням продуктами зносу канавок, що утворилися в матричному матеріалі.

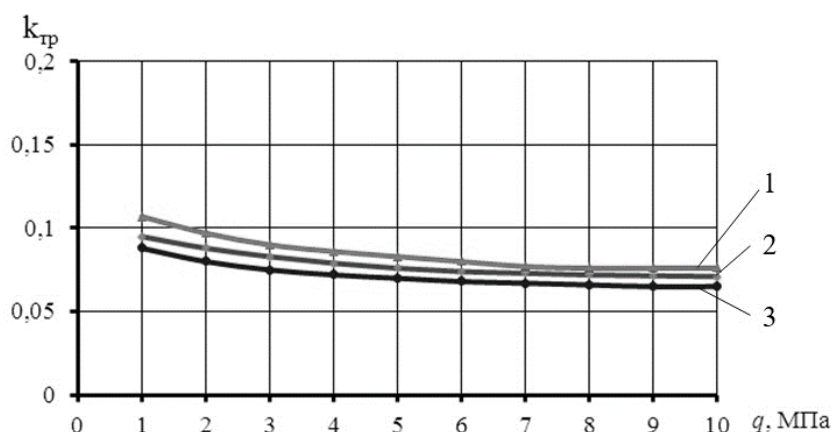


Рис. 2 – Залежності коефіцієнтів тертя $k_{тр}$ у наплавлених покриттях на основі сплаву ПГ-10Н-01 від питомого навантаження в процесі тертя:
 1 – 80% ПГ-10Н-01 + 20% КМ; 2 – 90% ПГ-10Н-01 + 10% КМ; 3 – ПГ-10Н-01

Мікроструктура наплавлених покриттів являє собою матричний матеріал – сплав ПГ-10Н-01, в якому рівномірно розподілені тверді включення, імовірно, ґрунтуючись на

результатах виконаних досліджень, це частинки карбиду (TiC) і диборида титану (TiB₂), карбиду заліза (Fe₃C) [22].

Висновки.

1. Розроблено зносостійкий композиційний матеріал для модифікування наплавлених покриттів на основі самофлюсуючого сплаву ПГ-10Н-01 ТУ У 322-19-004-96), що одержується з застосуванням СВС-процесу з компонентів: Ti, B, C, Fe₂O₃, Al.

2. Композиційний матеріал підвищує триботехнічні властивості наплавленого покриття з матричного сплаву ПГ-10Н-01, так зносостійкість відновлювального покриття збільшується до 2,35 разів.

3. Створений зносостійкий композиційний матеріал для модифікування наплавлених покриттів ПГ-10Н-01 можна рекомендувати для відновлення робочих органів ґрунтообробних машин.

Література:

1. Ткачев В.Н. Работоспособность деталей в условиях абразивного изнашивания / В.Н. Ткачев. – М. Машиностроение, 1995. – 336 с.
2. Ванин Г.А. Микромеханика композиционных материалов: монографія / Г.А. Ванин. – К.: Наук. думка, 1985. – 304с.
3. Сорокин Г.М. Трибология сталей и сплавов / Г.М. Сорокин – М.:ОАО"Недра",2000.–317с.
4. Бондаренко В.П. Триботехнические композиты с высоко модульными наполнителями / В.П. Бондаренко. – К.: Наук. думка, 1987. – 232 с.
5. Бородин И.Н. Упрочнение деталей композиционными покрытиями / И.Н. Бородин. – М.: Машиностроение, 1982. – 141 с.
6. Зенкин М.А. Повышение эксплуатационных характеристик композиционных материалов путем оптимизации упрочняющих технологий: Монография / М.А. Зенкин, В.И. Копылов. – К.: 2002. – 272 с.
7. Черновол М.И. Технологические основы восстановления деталей сельскохозяйственной техники композиционными покрытиями: дис. ... д-ра. техн. наук: 05.20.03. – Кировоград., 1992. – 502 с.
8. Мельниченко И.М. Восстановление и повышение долговечности подшипниковых узлов сельскохозяйственной техники с использованием композиционных материалов и покрытий: автореф. дисс. на соискание ученой степени д-ра. техн. наук / И.М. Мельниченко. – Челябинск, 1992. – 31 с.
9. Савуляк В.І. Наукові засади формування на сплавах заліза композиційних металокарбідних шарів зі стабільними структурами та підвищеними триботехнічними характеристиками: Автореф. дис... д-ра техн. наук: 05.02.01 / В.І. Савуляк; НАН України. Ін-т проблем матеріалознавства ім. І.М.Францевича. – К., 2004. – 39 с.
10. Прибытков Г.А. Межфазный массоперенос на границе металлов и тугоплавких соединений с металлическими расплавами и его роль в формировании структуры композиционных материалов и покрытий: автореф. дисс. на соискание ученой степени д-ра техн. наук: спец. 05.16.01 "Материаловедение и обработка металлов" / Г.А. Прибытков – Томск, 2002. – 40 с.
11. Девойко О.Г. Создание композиционных покрытий на основе смесей с использованием лазерного нагрева / О.Г. Девойко, М.А. Кардаполова // Сб.науч.работ ПГТУ. – Новополюцк, 2003. – С.141-144.
12. Курапов П.А. Трение и работоспособность сопряжений в условиях использования микрогетерогенных смазочных композиций: автореф. дисс. на соиск. уч. степени д-ра техн. наук: спец.05.02.04 "Трения и износ в машинах" / П.А.Курапов – Москва, 2011. – 39с.

13. Белоусов В.Я. Долговечность деталей машин с композиционными материалами / В.Я. Белоусов. – Львів: Вицашкола, 1984. – 180 с.
14. Белый А.В. Структура и методы формирования износостойких поверхностных слоев / А.В. Белый, Г.Д. Карпенко, Н.К. Мышкин. – М.: Машиностроение, 1991. – 208 с.
15. Костецкий Б.И. Управление изнашиванием машин/ Б.И. Костецкий. – Киев: Знание, 1984. – 20 с.
16. Костецкий Б.И. Фундаментальные закономерности трения и износа / Б.И. Костецкий. – Киев: Знание, 1981. – 31 с.
17. Крагельский И.В. Трение и износ / И.В. Крагельский. – М.: Машиностроение, 1968. – 480 с.
18. Хрущов М.М. Абразивное изнашивание/М.М. Хрущов, М.А. Бабичев. – М.: Наука, 1970. – 252 с.
19. Виноградов В.Н. Абразивное изнашивание/ В.Н. Виноградов, Г.М. Сорокин, М.Г. Колокольников. – М.: Машиностроение, 1990. – 224 с.
20. Бабаев И.А. Исследование и разработка технологии восстановления деталей порошковыми композиционными покрытиями – автореф. дисс. на соискание науч. степени канд. техн. наук: спец. 05.20.03 "Технологии и средства техн. обслуживания в сельском хозяйстве" / И.А. Бабаев. – М., 1982. – 17 с.
21. Бабей Ю.И. Поверхностное упрочнение металлов: монография / [Ю.И. Бабей, Б.И. Бутаков, В.Г. Сысоев]. – К.: Наукова думка, 1995. – 253 с.
22. Лузан С.А. Получение и исследование восстановительных покрытий на деталях машин с использованием механокомпозитов, содержащих TiC и TiB₂ / С.А. Лузан, А.И. Сидашенко, А.С. Лузан // Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин, вип. 47, ч. II. – Кропивницький: 2017. – С. 159-166.

Summary

A. Sidashenko, A. Luzan Study of tribological characteristics of concrete coating, modified by composite material

The questions of development and research of tribological characteristics of surfacing coatings on the basis of PG-10H-01 alloy modified with composite material containing carbide and titanium boride are considered. The developed composite material increases the durability of restorative coatings and it can be recommended for the restoration of working bodies of soil-working machines.

Key words: *composing material, SVS-process, modification, mechano-activation, components, tribological characteristics, wear resistance, wear.*

References

1. Tkachev V.N. Rabotosposobnost' detalej v usloviyah abrazivnogo iznashivaniya / V.N. Tkachev. – М. Mashinostroenie, 1995. – 336 s.
2. Vanin G.A. Mikromekhanika kompozicionnyh materialov: monografiya / G.A. Vanin. – К.: Nauk. dumka, 1985. – 304s.
3. Sorokin G.M. Tribologiya stalej i splavov / G.M. Sorokin – М.: ОАО "Nedra", 2000.–317s.
4. Bondarenko V.P. Tribotekhnicheskie kompozity s vysokomodul'nymi napolnitelyami / V.P. Bondarenko. – К.: Nauk. dumka, 1987. – 232 s.
5. Borodin I.N. Uprochnenie detalej kompozicionnymi pokrytyami / I.N. Borodin. – М.: Mashinostroenie, 1982. – 141 s.
6. Zenkin M.A. Povyshenie ehkspluatacionnyh harakteristik kompozicionnyh materialov putem

- optimizacii uprochnyayushchih tekhnologij: Monografiya / M.A. Zenkin, V.I. Kopylov. – K.: 2002. – 272 s.
7. Chernovol M.I. Tekhnologicheskie osnovy vosstanovleniya detalej sel'skohozyajstvennoj tekhniki kompozicionnymi pokrytiami: dis. ... d-ra. tekhn. nauk: 05.20.03. – Kirovograd., 1992. – 502 s.
 8. Mel'nichenko I.M. Vosstanovlenie i povyshenie dolgovechnosti podshipnikovyh uzlov sel'skohozyajstvennoj tekhniki s ispol'zovaniem kompozicionnyh materialov i pokrytij: avtoref. diss. na soiskanie uchenoj stepeni d-ra. tekhn. nauk / I.M. Mel'nichenko. – CHelyabinsk, 1992. – 31 s.
 9. Savulyak V.I. Naukovi zasady formuvannya na splavah zaliza kompozicijnih metalokarbidnih shariv zi stabil'nimi strukturami ta pidvishchenimi tribotekhnichnimi harakteristikami: Avtoref. dis... d-ra tekhn. nauk: 05.02.01 / V.I. Savulyak; NAN Ukraïni. In-t problem materialoznavstva im. I.M.Francevicha. – K., 2004. – 39 s.
 10. Pribytkov G.A. Mezhfaznyj massoperenos na granice metallov i tugoplavkih soedinenij s metallischeskimi rasplavami i ego rol' v formirovanii struktury kompozicionnyh materialov i pokrytij: avtoref. diss. na soiskanie uchenoj stepeni d-ra tekhn. nauk: spec. 05.16.01 "Materialovedenie i obrabotka metallov " / G.A. Pribytkov – Tomsk, 2002. – 40 s.
 11. Devojko O.G. Sozdanie kompozicionnyh pokrytij na osnove smesej s ispol'zovaniem lazernogo nagreva / O.G. Devojko, M.A. Kardapolova // Sb.nauch.rabot PGTU. – Novopolock, 2003. – S.141-144.
 12. Kurapov P.A. Trenie i rabotosposobnost' sopryazhenij v usloviyah ispol'zovaniya mikroheterogen-nyh smazochnyh kompozicij: avtoref. diss. na soisk. uch. stepeni d-ra tekhn. nauk: spec.05.02.04 "Treniya i iznos v mashinah"/P.A. Kurapov – Moskva, 2011. – 39s.
 13. Beloysov V.Y. Dolgovechnost' detalej mashin s kompozicionnymi materialami / V.Y. Belousov. – L'viv: Vishchashkola, 1984. – 180 s.
 14. Belyj A.V. Struktura i metody formirovaniya iznosostojkih poverhnostnyh sloev / A.V. Belyj, G.D. Karpenko, N.K. Myshkin. – M.: Mashinostroenie, 1991. – 208 s.
 15. Kosteckij B.I. Upravlenie iznashivaniem mashin/ B.I. Kosteckij. – Kiev: Znanie, 1984. – 20 s.
 16. Kosteckij B.I. Fundamental'nye zakonomernosti treniya i iznosa / B.I. Kosteckij. – Kiev: Znanie, 1981. – 31 s.
 17. Kragel'skij I.V. Trenie i iznos / I.V. Kragel'skij. – M.: Mashinostroenie, 1968. – 480 s.
 18. Hrushchov M.M. Abrazivnoe iznashivanie/M.M. Hrushchov, M.A. Babichev. – M.: Nauka, 1970. – 252 s.
 19. Vinogradov V.N. Abrazivnoe iznashivanie / V.N. Vinogradov, G.M. Sorokin, M.G. Kolokol'nikov. – M.: Mashinostroenie, 1990. – 224 s.
 20. Babaev I.A. Issledovanie i razrabotka tekhnologii vosstanovleniya detalej poroshkovymi kompozicionnymi pokrytiami – avtoref. diss. na soiskanie nauch. stepeni kand. tekhn. nauk: spec. 05.20.03 "Tekhnologii i sredstva tekhn. obsluzhivaniya v sel'skom hozyajstve" / I.A. Babaev. – M., 1982. – 17 s.
 21. Babej Y.I. Poverhnostnoe uprochnenie metallov: monografiya / [Y.I. Babej, B.I. Butakov, V.G. Sysoev]. – K.: Naukova dumka, 1995. – 253 s.
 22. Luzan S.A. Poluchenie i issledovanie vosstanovitel'nyh pokrytij na detalyah mashin s ispol'zovaniem mekhanokompozitov, sodержashchih TiC i TiB₂ / S.A. Luzan, A.I. Sidashenko, A.S. Luzan // Zagal'noderzhavnij mizhvidomchij naukovo-tekhnichnij zbirnik. Konstruyuvannya, virobnictvo ta ekspluataciya sil'skogospodars'kih mashin, vip. 47, ch. II. – Kropivnic'kij: 2017. – S. 159-166.