

УДК 620.198

DOI: 10.18372/0370-2197.2(95).16548

В. М. ГОЛУБЕЦЬ¹, М. І. ПАШЕЧКО², І. М. ГОНЧАР¹, Ю. С. ШПУЛЯР¹, О. Б. ГАСІЙ¹¹Національний лісотехнічний університет України, м. Львів, Україна²Люблінський технічний університет «Люблінська політехніка», м. Люблін, Польща

ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ЕЛЕКТРОІСКРОВИХ ПОКРИТТІВ, ОТРИМАНИХ ІЗ ПОРОШКОВИХ ДРОТІВ, У КОНТАКТІ З ДЕРЕВИНОЮ

У роботі досліджено основні трибологічні характеристики (величини зносу і коефіцієнтів тертя) інструментальної сталі 9ХС після гартування і низького відпуску з нанесеними на робочу поверхню електродами з порошкових дротів електроіскровими покриттями (ЕІП) в контакті з деревиною залежно від породи деревини, її вологості та напрямку волокон. Встановлено вплив хімічного складу порошкових дротів різних систем на фрикційну поведінку досліджуваних матеріалів в умовах контактної взаємодії при зворотно-поступальному русі. Виявлено, що знос ЕІП з вологою деревиною більший в порівнянні з сухою. Охарактеризовано вплив вологи на тестування вибраної трибосистеми з ЕІП. Зафіксовано більші значення коефіцієнта тертя в контакті з вологою деревиною. За обраних умов тестування пари тертя «сталь 9ХС-деревина» встановлено нормальне механохімічне зношування з утворенням вторинних структур, які знають періодичного руйнування і відновлення.

Ключові слова: коефіцієнт тертя, зношування, електрод, дріт порошковий, покриття електроіскрове, деревина, напрям волокон, закрите різання.

Вступ. Підвищення ресурсу роботи дереворізальних інструментів є актуальним для деревообробних підприємств України, оскільки витрати на їх придбання та загострювання є досить значними. Інтенсифікація режимів оброблення можлива при застосуванні за різальні елементи інструментів твердих сплавів. Але їх використання значно підвищує вартість інструментів і ускладнює технологію їх виготовлення. Тому вигіднішим є застосування методів поверхневого зміцнення для підвищення зносостійкості різальних лез інструментів, виготовлених з однорідного матеріалу. Матеріал інструменту повинен мати необхідні технологічні властивості, зокрема: хорошу оброблюваність різанням і тиском, термостійкість, прогартовуваність, стійкість до деформацій та утворення тріщин і певні властивості щодо шліфування [1, 2].

Зміцнення лез інструментів та відновлення вихідних розмірів деталей відбувається шляхом нанесення на їх поверхню шару покриття, що відрізняється від основи підвищеними механічними характеристиками. Одним із шляхів зменшення витрат на вирішення цих проблем є обґрунтування вибору недорогих матеріалів та способів, які використовують у технологічному процесі зміцнення чи відновлення.

Електроіскрове легування (ЕІЛ) є одним з найбільш ефективних методів нанесення на робочі поверхні лез метало- та дереворізальних інструментів покриттів певного хімічного складу, який дає можливість значно підвищити їх зносостійкість. Метод ЕІЛ завдяки своїм перевагам, а саме: нанесення покриття відбувається без помітної деформації інструменту, відсутність нагрівання різальної частини, низька енергоємність процесу, має широке використання в промисловості.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Найчастіше для одержання зносостійких покриттів на деталях машин в різних галузях промисловості

використовують сплави металевих систем. Нанесення зносостійких покриттів на різальні леза інструментів з конструкційних, легованих та інструментальних сталей теж має на сучасному етапі широке використання.

Способи нанесення цих покриттів на поверхні деталей та інструментів є дуже різноманітними. Так, наприклад, наплавлені шари на основі Ni, Co, W досліджено за різних умов абразивного зношування і доведена їх ефективність. Але це високовартісні матеріали, які актуалізують створення дешевших систем, які б не поступалися за зносостійкістю [1, 2]. Сплави на основі заліза (системи C-Cr-B-Fe) теж вважають перспективними для наплавлення [3, 4]. Їх вартість істотно нижча, але зносостійкість є досить високою [5-8]. Матеріали цієї системи наплавляють багатьма способами, зокрема під шаром флюсу, в захисних газах, порошковим та лазерним наплавленням [9-12]. У мікроструктурі наплавлених шарів матеріалами системи C-Cr-B-Fe виділяють первинні FeCr карбіди твердістю 1500 HV_{0,1} та карбобориди заліза Fe₂₃(C, B)₆, твердістю 1690 HV_{0,1} в структурі евтектичної матриці з твердістю 1000 HV_{0,1} [13-15].

Нанесення покриттів зі сплавів системи WC-9Co-4Cr проводять високошвидкісними способами газотермічного напилення з використанням методів детонаційного, надзвукового повітряно-газового плазмового (НППГН) та надзвукового газополум'яного (HVOF) напилення [3, 7]. Ці методи напилення дозволяють формувати щільні покриття, що складаються з включень карбіду вольфраму, рівномірно розподілених в Co-Cr матриці. Пористість покриттів не перевищує 1 %, мікротвердість становить 11,0...11,7 ГПа, що перевищує мікротвердість покриття з гальванічного хрому (10ГПа). Мікротвердість детонаційного покриття є меншою і становить 8,5 ГПа, що пов'язано з частковою втратою вуглецю та появою у покритті включень оксидів внаслідок наявності окисного середовища продуктів детонації. За комплексом показників твердості, міцності зчеплення (більше 50 МПа) та пористості дані покриття мають перевагу перед гальванічним хромуванням. Серед інших методів високошвидкісного газотермічного напилення покриттів системи WC-9Co-4Cr метод НППГН характеризується найвищою продуктивністю (15 кг/год.).

З метою здешевлення процесу напилення постійно ведуться роботи з розробки порошкових дротів (ПД) на безвольфрамовій основі, які б не поступались за триботехнічними характеристиками вольфрамовмісним покриттям. Зокрема, встановлено факт підвищення абразивної зносостійкості покриттів з ПД систем Fe-Cr [8], Fe-B [9], Fe-Cr-B і Fe-Cr-B-C [10], досліджено структуру і фізико-механічні властивості таких покриттів. Для ПД системи Fe-B встановлено триботехнічні характеристики аморфізованих газополум'яних покриттів [11].

Широкого розповсюдження набули ПД системи Fe-Cr-C [12] та ПД для електродугового напилення серії ФМІ на основі системи Fe-Cr-B-Al [13-15]. Висока зносостійкість і продуктивність покриттів при механічній обробці забезпечуються за умови досягнення твердості HV 300...400 з мінімальною кількістю оксидної фази у структурі. Оптимальна твердість покриття в діапазоні HV 300...400 забезпечується за наявності в ПД 6...12 мас. % алюмінію. Матричною фазою таких покриттів є ферит, легований хромом, та алюміній. В залежності від співвідношення легуючих елементів покриття системи Fe-Cr-B-Al має твердість HV 650, Fe-Cr-Al-Mn-Mo-Si - HV 350, Fe-Cr-B-Al-Ni - HV 1000, Fe-Cr-B-Al-W - HV 1150, Fe-Cr-Al-Mn-Mo-Ti - HV 500. Встановлено, що зносостійкість покриттів зростає зі збільшенням твердості до HV 700...800 і зменшується, при твердості

більше HV 800, що пов'язано з виникненням мікротріщин у покриттях. Покриття на основі системи Fe–Cr–B–Al марок ФМІ забезпечують підвищення зносостійкості в умовах абразивного зношування в 3,5...7 разів.

Широкий комплекс досліджень присвячено застосуванню ПД системи Fe–Mn–B–C для нанесення зносостійких евтектичних покриттів [16-18]. Позитивний вплив на стійкість проти абразивного зношування і зносостійкість за умов граничного мащення встановлено при нанесенні електродугових покриттів із ПД систем Fe–Cr–C і Fe–Cr–B–Al, а також вплив лазерного оплавлення таких покриттів для покращення їх трибологічних характеристик [19]. Комплекс досліджень мікромеханічних характеристик ЕПП із ПД і ПДГ марки 80X20P3T подано в роботі [20]. Позитивний вплив на зносостійкість сталі таких ЕПП за умов сухого тертя засвідчено у [21], а за умов граничного мащення у [22]. Наведено результати впровадження технології нанесення ЕПП із ПД і ПДГ на різальний інструмент при обробці деревини, а також суттєве підвищення ресурсу роботи різального інструменту із сталі Р6М15 з ЕПП із ПД і ПДГ в умовах свердління гартованих виробів [23].

Проте зовсім не висвітлено використання ПД для технології отримання ЕПП, що працюють в контакт з деревиною. Відсутні дані по зносостійкості цих покриттів в роботі такої трибосистеми. Тому дослідження та аналіз фрикційної поведінки ЕПП, отриманих із ПД в умовах контактної взаємодії з деревиною є важливим для ефективного практичного використання як при поверхневому зміцненні різних виробів, так і різальних інструментів.

Мета дослідження. Встановлення закономірностей поведінки трибологічних характеристик ЕПП, отриманих з ПД деяких систем у контакт з деревиною, в умовах роботи трибоспряження при зворотно-поступальному рухові.

Методика нанесення ЕПП і трибологічних досліджень. Досліджували дерев'яні зразки із дуба і сосни в сухому (10% вологи) і вологому (40% вологи) стані і металеві із сталі 9ХС гартованої і низьковідпущеної (HRC 62) з нанесеним ЕПП. Нанесення ЕПП на торцеву поверхню металевого зразка формували на установці «Елітрон-20» із електродів: твердого сплаву Т15К6; порошкового дроту ПД1 діаметром 2 мм (система Fe–Mn–B–C з добавкою Si, Ni і Cr); порошкового дроту ПД2 (ПП-НП ПД80X20P3T) діаметром 3,2 мм (система Fe–Cr–B–C); комбінованого електроду ПДГ (з ПД2 та додатком графіту МПГ-7) діаметром 6 мм. Оболонка порошкових дротів виготовлена із низьковуглецевої сталі 08 кп і заповнена компонентами шихти необхідних систем. Конструкцію комбінованого ПДГ та режими електроіскрового легування на установці «Елітрон-20» детально описано в роботі [20].

Трибологічні дослідження проводили за схемою зворотно-поступального руху шліфованого дерев'яного зразка із сосни і дуба розміром 50×40×10 мм по торцевій поверхні металевого зразка із сталі 9ХС розміром 10×10×8 мм з нанесеним на нижній торець електроіскровим покриттям (ЕПП) – рис 1. Таким чином була сформована обернена пара тертя, оскільки покриття формували на контргілі. В порівнянні з прямою парою тертя це були більш жорсткі умови випробувань.

Використовували спроектовану і виготовлену у ФМІ НАН України установку для трибологічних та трибокорозійних досліджень (рис. 2), яка складається з механічної частини (1), пульта керування швидкостями переміщення столика (2), потенціостата ПИ-50-1 (3), приєднаного через аналого-цифровий перетворювач АЦП (4) до персонального комп'ютера (5).

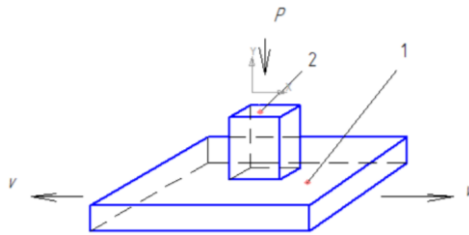


Рис. 1. Схема тертя ковзання пари дерев'яний зразок (1) в сухому і вологому стані по металевому зразку (2) із сталі 9ХС гартованої і низьковідпущеної з нанесеним електроіскровим покриттям із порошкових дрітків

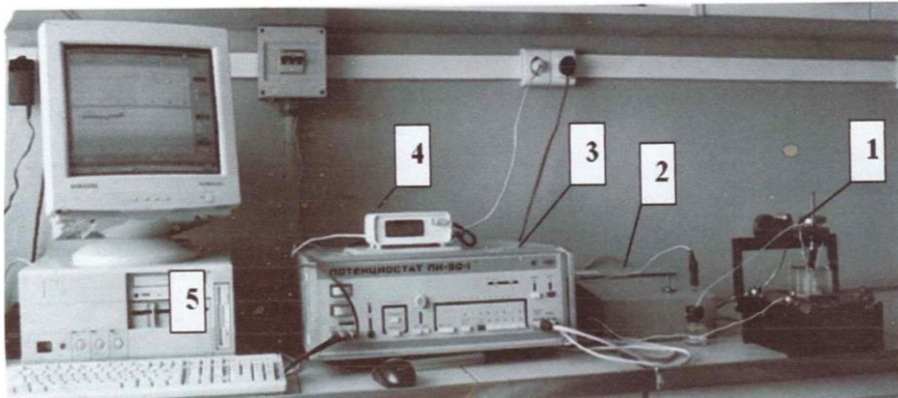


Рис. 2. Загальний вигляд установки для трибологічних та трибокорозійних досліджень умов зворотно-поступального руху: 1 – механічна частина; 2 – пульт керування швидкостями переміщення столика; 3 – потенціостат; 4 – аналого-цифровий перетворювач; 5 – персональний комп'ютер

Для проведення трибологічних випробувань використовували тільки механічну частину установки (рис. 3), яка складалася з станини (1), де встановлено підшипники (4), які забезпечують прямолінійність руху столика (2) та виключають можливість його зміщення в поперечному напрямку. Столик приводиться в рух черв'ячною передачею, з'єднаною з електродвигуном (10). Швидкість обертання двигуна регульована і в кожному подвійному ході є постійною, що має перевагу над установками з кулісним приводом, в яких швидкість переміщення змінюється за синусоїдальним законом, що утруднює аналіз перебігу трибопроцесу. Дерев'яний зразок встановлювали на столик (2), через ущільнювач з оргскла, його затискали до столика та фіксували. Зразок з деревини встановлювали на пластину з контактним виводом, ізольованим від столика ізоляційною прокладкою. Металевий зразок встановлювали у вертикальне коромисло (7).

Навантаження зразків проводили наважками (6), які встановлювали на вертикальне коромисло. Горизонтальна балка (8), в яку вмонтовано вертикальне коромисло, виставляється за допомогою рівня (5), для забезпечення його перпендикулярності до поверхні дерев'яного зразка. Вертикальне коромисло рухається у вертикальному напрямку в горизонтальній балці. На ньому наклеєні тензодавачі, які працюють в обох напрямках руху.

Швидкість руху столика складала 0,9 м/хв, навантаження на зразок – 10 МПа. Час τ на зняття коефіцієнта тертя μ складав 900 с, на виявлення зносу контртіла – 80 год. Площа контакту пари становила $80 \times 10^{-6} \text{ м}^2$, шлях тертя $L = 4320 \text{ м}$. За один

подвійний хід дерев'яний зразок проходив шлях 0,02 м. Під час експериментів здійснювали комп'ютерний запис електричних сигналів від зміни вимірювальних параметрів коефіцієнта тертя μ . Величини зносу металевого зразка (контртіла) із сталі 9ХС з ЕПП визначали на аналітичній вазі Radvag WAA 160 (похибка $\pm 0,0001$ г), які подано як середнє значення із випробування трьох зразків.



Рис. 3. Установка для трибологічних досліджень за умов зворотно-поступального руху: 1 – станина; 2 – столик; 3 – пара тертя «деревина-сталь 9ХС з ЕПП»; 4 – підшипники; 5 – горизонтальний рівень; 6 – навантаження; 7 – вертикальне коромисло; 8 – горизонтальна балка; 9 – вертикальний рівень; 10 – двигун

Результати досліджень та їх аналіз. Трибологічними дослідженнями контактних пар виявили, що під час фрикційної взаємодії вздовж волокон величина зносу сталі 9ХС без покриття та з ЕПП із Т15К6 по дубу у вологому стані є вищою, ніж у сухому (рис. 4 а-А, поз. 1 і 2). Знос ЕПП із ПД1 і ПД2 приблизно однаковий як у сухому, так і у вологому станах (поз. 3 і 4), а за абсолютними величинами він у 1,5...2 рази є меншим в порівнянні зі зносом сталі 9ХС без покриття та з ЕПП із Т15К6. Найменше значення величини зносу як у сухому, так і у вологому станах зафіксоване для ЕПП на сталі 9ХС з електроду ПДГ (поз. 5), що підтверджується вищою твердістю таких ЕПП. Так, мікротвердість $H_{\mu 50}$ ЕПП із ПД2 становить 7,765 ГПа ($HV_{0,2}1710$), з ПДГ - 14 ГПа ($HV_{0,2}2311$), твердість НРА ЕПП зі сплаву Т15К6 становить 88...90.

У випадку фрикційної взаємодії пар тертя поперек волокон (рис. 4б-А) по дубу у вологому стані для сталі 9ХС без покриття і з усіма видами ЕПП тенденція збільшення величини зносу зберігається. Суттєво менші величини зносу сталі 9ХС зафіксовано з ЕПП із ПД 1 і ПД2 (поз. 3 і 4). Найменше значення величини зносу також має місце для ЕПП із ПДГ (поз. 5).

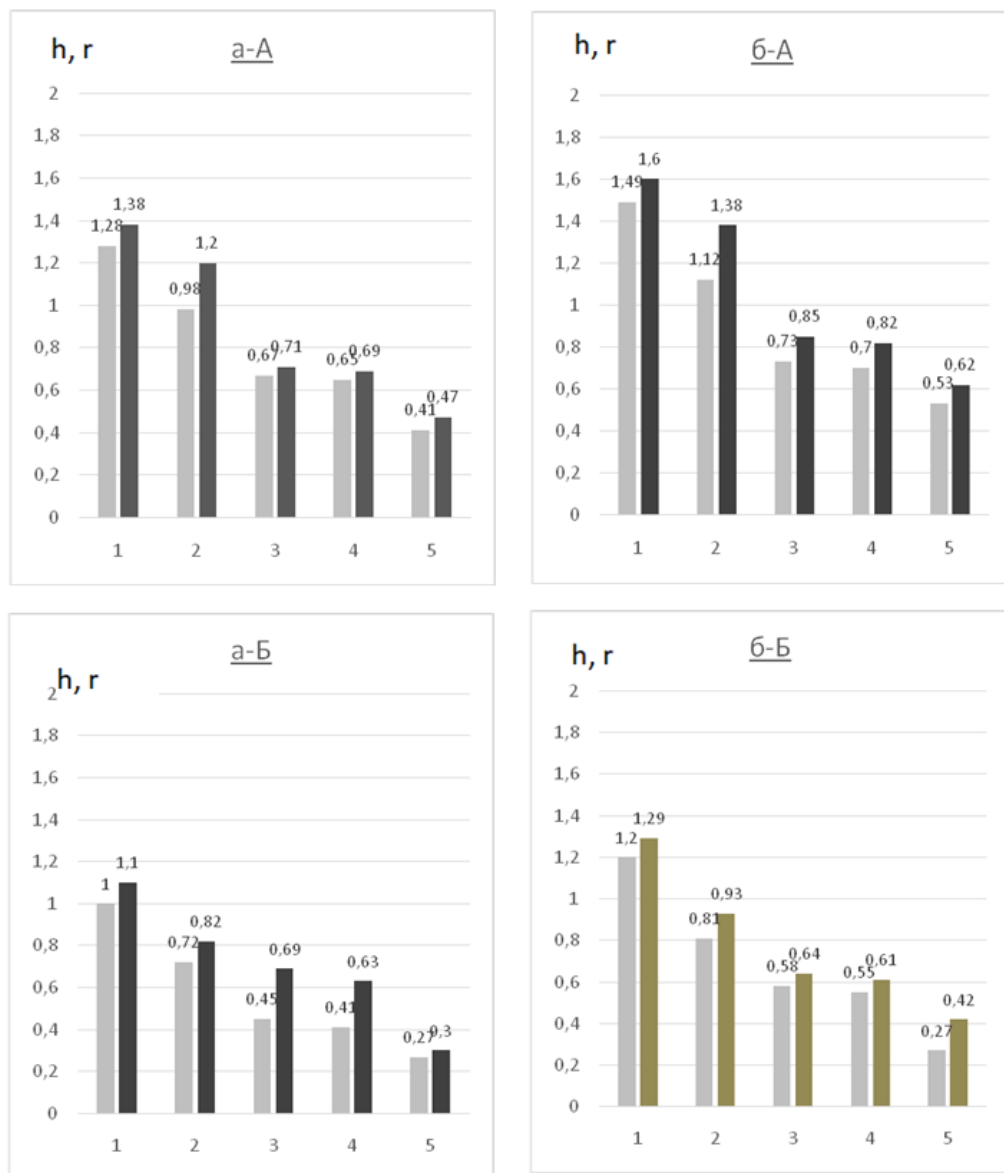


Рис. 4. Усереднені значення зміни ваги сталі 9ХС з ЕПП в усталеному режимі при терті під навантаженням 10 МПа упродовж 80 год. вздовж (а) і поперек волокон (б) по дубу (А) і сосні (Б) в сухому (світлі гістограми) і вологому (затемнені) стани: 1 – сталь 9ХС без покриття; 2 – електрод Т15К6; 3 – ПД1; 4 – ПД2; 5 – ПДГ; $V = 0,9$ м/хв.

В процесі тертя контактної пари «сосна-сталь 9ХС з ЕПП» вздовж волокон (рис.4, а-Б) також виявлено, що знос сталі з усіма нанесеними ЕПП є вищим у вологому стані порівняно з сухим. Близькими по зносу є ЕПП із ПД 1 і ПД2 (поз. 3 і 4) як у вологому, так і в сухому стані. Найменший знос зафіксовано у покриттві з порошкового дроту ПДГ (поз. 5).

На рис. 4, б-Б засвідчено аналогічну фрикційну поведінку пари тертя «сосна-сталь 9ХС з ЕПП» при терті поперек волокон, як і на рис. 4, а-Б. При цьому величини зносу у деяких випадках є вищими.

Слід відзначити також, що величини зносу при терті зразків із сосни в сухому і вологому стані вздовж і поперек волокон з усіма видами покриттів на сталі 9ХС (рис. 4, *a-B* і *b-B*) є меншими в порівнянні з отриманими при терті по дубу (рис. 4, *a-A* і *b-A*).

В процесі трибологічних досліджень контактної взаємодії пар тертя «деревина-сталь 9ХС з ЕПП» встановлено абсолютні значення коефіцієнтів тертя μ для обраних умов випробувань, а саме: вздовж волокон, поперек волокон та різних видів ЕПП. На рис. 5 для прикладу наведено форму запису коефіцієнта тертя. Динаміка закономірностей зміни μ від початку руху пари тертя до усталеного стану при контактній взаємодії сосни зі сталлю 9ХС подано в табл. 1, а при контактній взаємодії дуба зі сталлю – в табл. 2.

Аналізуючи закономірності зміни μ при контактній взаємодії сосни зі сталлю 9ХС з різними ЕПП (табл. 1), можна зробити висновок, що значення μ у випадку вологої сосни у всіх випадках випробувань є більшими в порівнянні із величинами μ у випадку сухої сосни (як при терті вздовж, так і поперек волокон). Значення μ у випадку сухої сосни при терті поперек волокон у всіх випадках випробувань є меншими в порівнянні з іншими умовами досліджень.

Аналогічні закономірності зміни μ , що описані вище для випадку тертя по сосні у вологому і сухому стані як вздовж так і поперек волокон, встановлено також для пар тертя «дуб-сталь 9ХС з ЕПП» (табл. 2).

Таким чином, отримані в процесі трибологічних досліджень усереднені значення зносу пар тертя «деревина-сталь 9ХС з ЕПП» засвідчують, що найбільш ефективним для використання в технології електроіскрового легування щодо зносостійкості є електрод ПДГ із порошкового дроту 80Х20Р3Т системи Fe-Cr-V-C з добавкою графіту. Вибір вказаного електроду обумовлений його широким використанням для відновлення зношених поверхонь наплавленням, низькою вартістю, у 2,5...4 рази кращою зносостійкістю наплавленого матеріалу, який суттєво міняє інженерію поверхневого шару. Показники мікро- і субмікрооб'ємів поверхневого шару даного ЕПП засвідчують високу твердість (на 24 % вища, ніж у ПД2), збільшення повзучості до 0,97%, релаксаційної здатності до 0,51 %, модуля Юнга до 207,86 ГПа, що призводить до підвищення міцності [20]. Структура ЕПП з ПДГ являє собою аустенітну матрицю з боридними включеннями (Fe, Cr)₂B, бориду заліза Fe₂B, а також хромистих боридів заліза Cr_{1,65}Fe_{0,35}B_{0,96}.

В окремих випадках (рис. 4, *a-A* і рис. 4, *a-B*) можливим є застосування технології нанесення ЕПП електродами ПД1 системи Fe-Mn-C-V і ПД2 системи Fe-Cr-V-C (адже остання є базовою для ПДГ). Фазовий склад евтектичного ЕПП системи Fe-Mn-C-V з добавкою Si, Ni і Cr являє собою γ - (Fe,Ni), γ - (Fe,Cr); марганцевистий карбід заліза Fe_{0,4}Mn_{3,6}C, а також Fe₃C і сліди Fe₂B, які надають покриттю високої твердості [24], що приводить до зменшення фрикційних зв'язків в контакті матеріалів та підвищення зносостійкості сталі 9ХС з ЕПП із ПД1 і ПД2.

Характер поверхонь тертя дуба і сосни після випробувань засвідчує наявність гладкої зношеної смужки вздовж волокон та аналогічної за розміром смужки поперек волокон із частково зруйнованими волокнами, що має місце як для сухого, так і для вологого стану.

Вплив вологи на процеси фрикційної взаємодії ЕПП при контакті з деревиною для обраних нами умов досліджень можна пояснити, виходячи з її впливу на параметри процесу різання деревини.

Таблиця 1

Динаміка закономірностей зміни коефіцієнта тертя μ від початку руху до усталеного стану при контактній взаємодії сосни зі сталлю 9ХС із ЕП

№ з/п	Характеристика пари тертя та умови її роботи	Абсолютні значення коефіцієнта тертя μ впродовж випробувань через проміжок у трих вилини					
		поча-ток руху	3	6	9	12	15
1	2	3	4	5	6	7	8
1	«сосна суха-сталь 9ХС без покриття, тертя вздовж волокон»	0,35	0,31	0,34	0,37	0,37	0,37
2	«сосна волога-сталь 9ХС без покриття, тертя вздовж волокон»	0,42	0,46	0,52	0,52	0,52	0,52
3	«сосна суха-сталь 9ХС без покриття, тертя поперек волокон»	0,19	0,15	0,15	0,16	0,16	0,16
4	«сосна волога-сталь 9ХС без покриття, тертя поперек волокон»	0,50	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62
5	«сосна суха-сталь 9ХС з ЕП із Т15К6, тертя вздовж волокон»	0,25	0,27	0,40	0,49	0,49	0,51
6	«сосна волога-сталь 9ХС з ЕП із Т15К6, тертя вздовж волокон»	0,13	0,45	0,55	0,45	0,45	0,45
7	«сосна суха-сталь 9ХС з ЕП із Т15К6, тертя поперек волокон»	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
8	«сосна волога-сталь 9ХС з ЕП із Т15К6, тертя поперек волокон»	0,35	0,45	0,60	0,60	0,60	0,60
9	«сосна суха-сталь 9ХС з ЕП із ПД1, тертя вздовж волокон»	0,25	0,19	0,18	0,17	0,16	0,16
10	«сосна волога-сталь 9ХС з ЕП із ПД1, тертя вздовж волокон»	0,55	0,6	0,65	0,49	0,49	0,49
11	«сосна суха-сталь 9ХС з ЕП із ПД1, тертя поперек волокон»	0,19	0,17	0,14	0,12	0,12	0,12
12	«сосна волога-сталь 9ХС з ЕП із ПД1, тертя поперек волокон»	0,65	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60
13	«сосна суха-сталь 9ХС з ЕП із ПД2, тертя вздовж волокон»	0,17	0,11	0,08	0,075	0,075	0,075
14	«сосна волога-сталь 9ХС з ЕП із ПД2, тертя вздовж волокон»	0,55	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65
15	«сосна суха-сталь 9ХС з ЕП із ПД2, тертя поперек волокон»	0,18	0,13	0,12	0,11	0,11	0,11
16	«сосна волога-сталь 9ХС з ЕП із ПД2, тертя поперек волокон»	0,49	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
17	«сосна суха-сталь 9ХС з ЕП із ПДГ, тертя вздовж волокон»	0,30	0,27	0,28	0,32	0,32	0,32

Продовження табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8
18	«сосна волога-сталь 9XC з ЕІП із ПДГ, тертя вздовж волокон»	0,4	0,72	0,59	0,59	0,58	0,58
19	«сосна суха-сталь 9XC з ЕІП із ПДГ, тертя поперек волокон»	0,23	0,18	0,17	0,16	0,16	0,16
20	«сосна волога-сталь 9XC з ЕІП із ПДГ, тертя поперек волокон»	0,50	0,55	0,65	0,70	0,75	0,75

Таблиця 2

Динаміка закономірностей зміни коефіцієнта тертя μ від початку руху до усталеного стану при контактній взаємодії дуба зі сталлю 9XC із ЕІП

№ з/п	Характеристика пари тертя та умови її роботи	Абсолютні значення коефіцієнта тертя μ впродовж випробувань через проміжок у три хвилини					
		початок руху	3	6	9	12	15
1	2	3	4	5	6	7	8
1	«сухий дуб-сталь 9XC без покриття, тертя вздовж волокон»	0,25	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31
2	«вологий дуб-сталь 9XC без покриття, тертя вздовж волокон»	0,41	0,40	0,39	0,38	0,36	0,35
3	«сухий дуб-сталь 9XC без покриття, тертя поперек волокон»	0,20	0,20	0,23	0,27	0,28	0,28
4	«вологий дуб-сталь 9XC без покриття, тертя поперек волокон»	0,40	0,35	0,35	0,40	0,42	0,45
5	«вологий дуб-сталь 9XC з ЕІП із Т15К6, тертя вздовж волокон»	0,15	0,52	0,58	0,59	0,60	0,60
6	«сухий дуб-сталь 9XC з ЕІП із Т15К6, тертя вздовж волокон»	0,42	0,52	0,58	0,60	0,60	0,60
7	«сухий дуб-сталь 9XC з ЕІП із Т15К6, тертя поперек волокон»	0,22	0,20	0,16	0,15	0,15	0,15
8	«вологий дуб-сталь 9XC з ЕІП із Т15К6, тертя поперек волокон»	0,36	0,40	0,42	0,48	0,51	0,56
9	«сухий дуб-сталь 9XC з ЕІП із ПД1, тертя вздовж волокон»	0,18	0,12	0,11	0,10	0,10	0,10
10	«вологий дуб-сталь 9XC з ЕІП із ПД1, тертя вздовж волокон»	1,00	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
11	«сухий дуб-сталь 9XC з ЕІП із ПД1, тертя поперек волокон»	0,16	0,13	0,11	0,12	0,12	0,12
12	«вологий дуб-сталь 9XC з ЕІП із ПД1, тертя поперек волокон»	0,75	0,80	0,90	0,90	0,90	0,90
13	«сухий дуб-сталь 9XC з ЕІП із ПД2, тертя вздовж волокон»	0,15	0,10	0,09	0,08	0,07	0,07
14	«вологий дуб-сталь 9XC з ЕІП із ПД2, тертя вздовж волокон»	0,69	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62

Продовження табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8
15	«сухий дуб-сталь 9ХС з ЕП із ПД2, тертя поперек волокон»	0,35	0,25	0,25	0,25	0,26	0,26
16	«вологий дуб-сталь 9ХС з ЕП із ПД2, тертя поперек волокон»	0,75	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68
17	«сухий дуб-сталь 9ХС з ЕП із ПДГ, тертя вздовж волокон»	0,24	0,16	0,18	0,20	0,21	0,22
18	«вологий дуб-сталь 9ХС з ЕП із ПДГ, тертя вздовж волокон»	0,40	0,35	0,38	0,40	0,42	0,42
19	«сухий дуб-сталь 9ХС з ЕП із ПДГ, тертя поперек волокон»	0,23	0,19	0,18	0,19	0,20	0,20
20	«вологий дуб-сталь 9ХС з ЕП із ПДГ, тертя поперек волокон»	0,48	0,58	0,64	0,65	0,72	0,72

Характеризуючи вплив вологи на параметри процесу різання, а в нашому випадку на процеси тертя, слід мати на увазі, що мова йде не про вільну воду, яка утримується силами капілярної взаємодії у порожнинах клітин і міжклітковому просторі і мало впливає на фізико-механічні властивості деревини, а про зв'язану (або гігроскопічну) воду, яка поділяється на адсорбційну та мікрокапілярну, утримується у клітинних стінках і суттєво впливає на зміну згаданих властивостей [25].

Зростання сили різання та зниження зносостійкості під впливом вологи підтверджується нижче поданими дослідженнями для закритого різання, яке можна віднести до нашої схеми випробувань (три леза). Виходячи із значень поправкового коефіцієнту, що враховує вплив вологи і визначається як відношення сили різання за даних умов до сили різання при вологості 10 %, сила різання по вологій деревині на 5...10 % більша, ніж по сухій [26]. При цьому слід мати на увазі, що ці дані для закритого різання відображають сумарний вплив вологості на силу різання та силу тертя різального елемента в заготовці.

Оскільки процес вологопоглинання деревиною полягає у сорбції парів водою основними органічними речовинами клітинної стінки, то на поверхні структурних утворень із целюлози, лігніну та геміцелюлози концентруються молекули адсорбційної води. При цьому спостерігається ефект контракції, коли об'єм вологої деревини стає меншим, ніж сума об'ємів сухої деревини та поглиненої води. Згідно теорії будови звичайної води до її складу, крім вільних молекул, входять кластери – агрегати молекул, що постійно утворюються та руйнуються. Густина кластерів – 920 кг/м³, а неагрегатованої води – 1120 кг/м³. Компоненти деревини руйнують кластери і збільшують частку неагрегатованої води. Цей процес призводить до підвищення загальної густини деревини, а адсорбційна вода за пружними властивостями наближається до твердого тіла [27].

Підвищення вмісту зв'язаної води у деревині супроводжується явищем набухання, тобто збільшенням лінійних розмірів і об'єму. За рахунок цього внутрішній тиск в тангенціальному напрямку у сосни досягає 1,98 МПа, у дуба – 3,1 МПа, а в радіальному напрямку – в 1,5...2 рази менше. Також встановлено, що знос вологої деревини більший, ніж сухої [25].

На поверхні різального інструмента над шаром оксидів знаходяться вторинні структури, що складаються з адсорбованих шарів газів, води та полярних молекул органічних речовин, і зазнають періодичного руйнування і відновлення. При порушенні суцільності оксидного шару відкривається доступ до ювенільної поверхні металу, що володіє високою адсорбційною та хімічною активністю. Адсорбовані цією

поверхню речовини заглиблюються у внутрішні шари металу. Чим більше у деревині води, тим більше проявляється її агресивний вплив на стан поверхні інструмента. Цей процес інтенсифікується за наявності поверхнево-активних речовин, що утворюються в процесі різання внаслідок термічної деструкції деревини [28].

Висновки. Встановлено абсолютні значення зносу сталі 9ХС з ЕП різних систем при терті вздовж і поперек волокон по дубу і сосні в сухому і вологому стані. Показано, що найбільшою стійкістю проти зношування в контакті з деревиною як в сухому, так і у вологому стані володіє ЕП, отримане електродом із порошкового дроту ПП-НП ПД80Х20Р3Т (система Fe-Cr-B-C) з добавкою графіту МПГ-7 (у 2,5...4 рази краща в порівнянні зі сталлю 9ХС гартованою і низьковідпущеною).

Виявлено основні закономірності зміни коефіцієнта тертя μ в діапазоні від початку руху пари тертя до усталеного стану при контактній взаємодії дуба і сосни зі сталлю 9ХС із ЕП при навантаженні 10 МПа, швидкості ковзання 0,9 м/хв впродовж 900 с, які засвідчили більші значення μ у вологому стані в порівнянні із сухим.

Показано, що покриттям з ПД різного хімічного складу властиве нормальне механохімічне зношування за обраних умов випробувань в контакті з деревиною, яке забезпечується як фізико-механічними характеристиками поверхневого шару ЕП, їх структурою, фазовим складом, так і характером взаємодії з вологим середовищем, що приводить до збільшення зносу вологої деревини в порівнянні з сухою.

Список літератури

1. Харламов Ю. А., Полонский Л. Г. Газотермическое напыление. Современное состояние и перспективы развития. Вестник Восточнoукраинского национального университета имени Владимира Даля. 2016. № 226 (2). С. 5–19.
2. Moreau C., Bisson J.-F., Lima R. S., Marple B. R. Diagnostics for advanced materials processing by plasma spraying. Pure and applied chemistry. 2005. №77(2). P. 443–462.
3. Борисов Ю. С., Астахов Е. А., Мурашов А. П., Грищенко А. П., Вигилянская Н. В., Коломьшев М. В. Исследование структуры и свойств газотермических покрытий системы WC-Co-Cr, полученных высокоскоростными методами напыления. Автоматическая сварка. 2015. № 10. С. 26–29.
4. Chivavibul P., Watanabe M., Kuroda S. Development of WC-Co coatings deposited by warm spray process. Journal of Thermal Spray Technology. 2008. Vol. 17. Iss. 5-6. P. 750–756.
5. Knapp J. K., Nitta H. Fine-particle slurry wear resistance of selected tungsten carbide thermal spray coatings. Tribology International. 1997. Vol. 30. Iss. 3. P. 225–234.
6. Du L., Xub B., Dong S. Sliding wear behaviour of the supersonic plasma sprayed WC-Co coating in oil containing sand. Surface and Coatings Technology. 2008. Vol. 202. Iss. 15. P. 3709–3714.
7. Murthy J. K. N., Venkataraman B. Abrasive wear behaviour of WC-Co-Cr and Cr₃C₂-20(NiCr) deposited by HVOF and detonation spray processes. Surface and Coatings Technology. 2006. Vol. 200. Iss. 8. P. 2642–2652.
8. Борисова А. Л., Клейман А. Ш. Влияние алюминия на структуру и физико-механические свойства электрометаллизационных покрытий из порошковых проволок с наполнителем из феррохрома // Прочность деталей сельскохозяйственной техники. - Кишинев: Кишиневский с.-х. институт. 1990. С. 27–33.
9. Борисова А. Л., Миц И. В., Кайда Т. В. Структура и свойства электродуговых покрытий на основе ферробора, полученных из порошковых проволок. Автоматическая сварка. 1991. № 9. С. 66–68.
10. Борисов Ю.С., Козьяков И.А., Коржик В.Н. Коржик В. Н. Структура и свойства газотермических покрытий, полученных с использованием порошковых проволок системы Fe-Cr-B, Fe-Cr-B-C. Автоматическая сварка. 1996. № 5 (518). С. 21–24.

11. Козьяков И.А., Коржик В.Н., Борисов Ю.С. Трибологические характеристики аморфизированных газопламенных покрытий, напыляемых порошковыми проволоками системы Fe–В. Автоматическая сварка. 1996. № 10. С. 24–28.
12. Борисова М. З., Стручков Н. Ф., Винокуров Г. Г. Анализ структуры износостойкого покрытия, полученного электродуговой металлизацией порошковой проволоки с тугоплавкими добавками. Наука и образование. 2016. № 2. С. 76–80.
13. Похмурский В. В., Студент М. М., Гвоздецкий В. М., Похмурская А. В. Порошковые проволоки серии ФМИ для электродугового напыления покрытий (Обзор). Автоматическая сварка. 2011. № 9. С. 52–57.
14. Pokhmurska A., Student M., Bielanska E. et al. Tribological properties of arc sprayed coatings obtained from FeCrB and FeCr based powder wires. *Surface & Coating Technology*. 2002. № 151–152. P. 490–494.
15. Pokhmurskii V., Dovhnyuk V., Student M. et al. Triboelektrochemiczne wlasciwosci powlok natryskiwanych lukowo na stopy aluminium. *Inzynieria Powierzchni*. 2008. № 1. P. 9–13.
16. Борисов Ю. С., Борисова А. Л., Бурлаченко А. Н., Цымбалистая Т. В., Сендеровский Ц. Структура и свойства легированных порошков на основе интерметаллида Fe₃Al для газотермического напыления, полученных методом механохимического синтеза. Автоматическая сварка. 2017. № 9. С. 40–47.
17. Rafiei M., Enayati M.N., Karimzadeh F. Characterization and formation mechanism of nanocrystalline (Fe,Ti)₃Al intermetallic compound prepared by mechanical alloying. *Journal of Alloys and Compounds*. 2009. № 480. С. 392–396.
18. Григоренко Г. М., Коржик В. Н., Адеева Л. И., Туник А. Ю., Степанюк С. Н., Карпец М. В., Дорошенко Л. К., Лютик М. П., Чайка А. А. Особенности металлургических процессов при плазменно-дуговым напылении покрытий, полученных из порошковой проволоки со стальной оболочкой и наполнителями В₄С и В₄С+ZrO₂. Вісник Приазовського державного технічного університету. Розділ: Технічні науки. 2016. № 32. С. 125–137.
19. Петров С. В., Карп И. Н. Плазменное газоздушное напыление. Киев: Наукова думка, 1993. 495 с.
20. Holubets V. M., Pashechko M. I., Barszcz M., Borc J. Micromechanical characteristics of the Surface Layer of 45 steel after electric-spark treatment. *Materials Science*. 2019. Vol. 55. № 3. P. 409–416.
21. Holubets V. M., Pashechko M. I., Borc J., Tisov O. V., Shpuliar Yu. S. Wear Resistance of Electrospark-Deposited Coatings in Dry Sliding Friction Conditions. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2021. №60. P. 90–96.
22. Holubets V. M., Dovhnyuk V. M., Pashechko M. I., Korniy S. A., Shpuliar Yu. S. Friction Behavior of Electric-Spark Coatings Under the Conditions of Boundary Lubrication. *Materials Science*. 2020. № 56. P. 43–49.
23. Голубец В.М. Підвищення стійкості метало- і дереворізального інструменту нанесенням електроіскрових покриттів / В.М.Голубець, І.М.Гончар, Ю.С.Шпуляр // *Наук. вісник НЛТУ України*. Т.28, 2018, № 2. – С. 111-114.
24. Пашечко М. И., Голубец В. М., Чернец М. В. Формирование и фрикционная стойкость эвтектических покрытий. Киев: Наукова думка, 1993. 344 с.
25. Уголев Б. Н. Древоисоведение и лесное товароведение: учебник. Москва: МГУЛ, 2007. 351 с.
26. Любченко В. И. Резание древесины и древесных материалов: учебник. Москва: МГУЛ, 2004. 306 с.
27. Бейнарт И. И., Ведерников Н. А., Громов В. С. Клеточная стенка древесины и ее изменение при химическом воздействии. Рига: Зинатне, 1972. 510 с.
28. Моисеев А. В. Износостойкость дереворежущего инструмента. Москва: Лесная промышленность, 1981. 112 с.

Стаття надійшла до редакції 05.04.2022.

V. M. HOLUBETS, M. I. PASHECHKO, I. M. HONCHAR, Yu. S. SHPULIAR, O. B. HASIY

WEAR RESISTANCE OF ELECTRIC-SPARK COATINGS, OBTAINED FROM POWDER WIRE, IN CONTACT WITH WOOD

The paper investigates the main tribological characteristics (wear values and friction coefficients) of electric-spark coating (ESC), which was applied to the working surface of the 9XC tool steel using powder wire electrodes, in contact with wood depending on the species of the wood, its moisture content and the wood grain. The ESC was applied to the tool steel after hardening and low tempering. Determined was the influence of the chemical composition of powder wires of various systems on the frictional behavior of the materials under study in the conditions of contact interaction during reciprocating motion. It was found that ESC wear in contact with wet wood is greater than in contact with dry wood. The influence of moisture on the tribological characteristics of the selected ESC system is characterized. A higher value of the coefficient of friction in contact with wet wood was recorded. Under the selected testing conditions for the friction pair «9XC steel-wood», normal mechanochemical wear was determined with the formation of secondary structures that are subject to periodic destruction and restoration.

The average values of wear of friction pairs «wood- 9XC steel with ESC» obtained in the process of tribological studies indicate that the most effective for use in the technology of electrospark alloying in terms of wear resistance is the PWG electrode made from powder wire of the Fe-Cr-B-C system with graphite addition. The choice of this electrode is due to its widespread use for the restoration of worn surfaces by applying coating, low cost, a 2.5 ... 4 times better wear resistance of the welded material compared to the 9XC tool steel after hardening and low tempering, which significantly changes the engineering of the surface layer. The indexes of micro- and submicro-volumes of the surface layer of this ESC indicate high hardness, an increase in creep up to 0.97 %, relaxation ability up to 0.51 %, Young's modulus up to 207.86 GPa, which leads to an increase in strength. The structure of ESC from PWG is an austenitic matrix with boride inclusions (Fe, Cr)B, iron boride Fe_2B , and chromium iron borides $Cr_{1.65}Fe_{0.35}B_{0.96}$.

Key words: coefficient of friction, wear, electrode, powder wire, electric-spark coating, wood, grain direction, closed cutting.

References

1. Kharlamov Yu. A., Polonsky L. G. Gazotermicheskoe napyilenie. Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya. Vestnik Vostochnoukrainskogo natsionalnogo universiteta imeni Vladimira Dalya. 2016. № 226(2). S. 5–19.
2. Moreau C., Bisson J.-F., Lima R. S., Marple B. R. Diagnostics for advanced materials processing by plasma spraying. Pure and applied chemistry. 2005. №77(2). P. 443–462.
3. Borisov Yu. S., Astakhov E. A., Murashov A. P., Grishchenko A. P., Vigilyanskaya N. V., Kolomytsev M. V. Issledovanie struktury i svoystv gazotermicheskikh pokrytiy sistemy WC-Co-Cr, poluchennykh vysokoskorostnymi metodami napyleniya. Avtomaticheskaya svarka. 2015. № 10. S. 26–29.
4. Chivavibul P., Watanabe M., Kuroda S. Development of WC-Co coatings deposited by warm spray process. Journal of Thermal Spray Technology. 2008. Vol. 17. Iss. 5-6. P. 750–756.
5. Knapp J. K., Nitta H. Fine-particle slurry wear resistance of selected tungsten carbide thermal spray coatings. Tribology International. 1997. Vol. 30. Iss. 3. P. 225–234.
6. Du L., Xub B., Dong S. Sliding wear behaviour of the supersonic plasma sprayed WC-Co coating in oil containing sand. Surface and Coatings Technology. 2008. Vol. 202. Iss. 15. P. 3709–3714.
7. Murthy J. K. N., Venkataraman B. Abrasive wear behaviour of WC-Co-Cr and $Cr_3C_2-20(NiCr)$ deposited by HVOF and detonation spray processes. Surface and Coatings Technology. 2006. Vol. 200. Iss. 8. P. 2642–2652.

8. Borisova A. L., Kleyman A. Sh. Vliyanie alyuminiya na strukturu i fiziko-mehaniicheskie svoystva elektrometallizatsionnykh pokrytiy iz poroshkovykh provolok s napolnitelem iz ferrohroma. Prochnost detaley selskohozyaystvennoy tehniky. Kishinev: Kishinevskiy s.-h. Institut. 1990. S. 27–33.
9. Borisova A. L., Mits I. V., Kaida T. V. Struktura i svoystva elektrodugovykh pokrytiy na osnove ferrobora, poluchennykh iz poroshkovykh provolok. Avtomaticheskaya svarka. 1991. № 9. S. 66–68.
10. Borisov Yu. S., Koziakov I. A., Korzhyk V. N. Struktura i svoystva gazotermicheskikh pokrytiy, poluchennykh s ispolzovaniem poroshkovykh provolok sistemy Fe–Cr–B, Fe–Cr–B–C. Avtomaticheskaya svarka. 1996. № 5 (518). S. 21–24.
11. Koziakov I. A., Korzhyk V. N., Borisov Yu. S. Tribologicheskie karakteristiki amorfizirovannykh gazoplamennykh pokrytiy, napylyaemykh poroshkovymi provolokami sistemy Fe–B. Avtomaticheskaya svarka. 1996. № 10. S. 24–28.
12. Borisova M. Z., Struchkov N. F., Vinokurov G. G. Analiz struktury iznosostoykogo pokrytiya, poluchennogo elektrodugovoy metallizatsiey poroshkovoy provoloki s tugoplavkimi dobavkami. Nauka i obrazovanie. 2016. № 2. S. 76–80.
13. Pokhmurskii V. V., Student M. M., Hvozdet'skii V. M., Pokhmurska A. V. Poroshkovye provoloki serii FMI dlya elektrodugovogo napyleniya pokrytiy (Obzor). Avtomaticheskaya svarka. 2011. № 9. S. 52–57.
14. Pokhmurska A., Student M., Bielanska E. et al. Tribological properties of arc sprayed coatings obtained from FeCrB and FeCr based powder wires. *Surface & Coating Technology*. 2002. № 151–152. P. 490–494.
15. Pokhmurskii V., Dovhunyuk V., Student M. et al. Triboelektrochemiczne wlasciwosci powlok natryskiwanych lukowo na stopy aluminium. *Inzynieria Powierzchni*. 2008. № 1. P. 9–13.
16. Borisov Yu. S., Borisova A. L., Burlachenko A. N., Tsymbalistaya T. V., Senderowski C. Struktura i svoystva legirovannykh poroshkov na osnove intermetallida Fe₃Al dlya gazotermicheskogo napyleniya, poluchennykh metodom mehanohimicheskogo sinteza. Avtomaticheskaya svarka. 2017. № 9. S. 40–47.
17. Rafiei M., Enayati M.N., Karimzadeh F. Characterization and formation mechanism of nanocrystalline (Fe,Ti)₃Al intermetallic compound prepared by mechanical alloying. *Journal of Alloys and Compounds*. 2009. № 480. P. 392–396.
18. Grigorenko G.M., Korzhik V.N., Adeeva L.I., Tunik A.Yu., Stepanyuk S.M., Karpets M.V., Doroshenko L.K., Lyutik M.P., Chayka A.A. Osobennosti metallurgicheskikh protsessov pri plazmenno-dugovom napylenii pokrytiy, poluchennykh iz poroshkovoy provoloki so stalnoy obolochkoy i napolnitelyami B₄C i B₄C+ZrO₂. *Visnyk Pryazovskogo derzhavnogo tehnichnogo universytetu. Rozdil: Tehnični nauki*. 2016. № 32. S. 125–137.
19. Petrov S. V. Carp I. N. Plazmennoe gazovozdushnoe napylenie. Kiev: Naukova dumka, 1993. 495 s.
20. Holubets V. M., Pashechko M. I., Barszcz M., Borc J. Micromechanical characteristics of the Surface Layer of 45 steel after electric-spark treatment. *Materials Science*. 2019. Vol. 55. №3. P. 409–416.
21. Holubets V. M., Pashechko M. I., Borc J., Tisov O. V., Shpuliar Yu. S. Wear Resistance of Electrospark-Deposited Coatings in Dry Sliding Friction Conditions. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2021. №60. P. 90–96.
22. Holubets V. M., Dovhunyuk V. M., Pashechko M. I., Korniy S. A., Shpuliar Yu. S. Friction Behavior of Electric-Spark Coatings Under the Conditions of Boundary Lubrication. *Materials Science*. 2020. №56. P. 43–49.
23. Holubets V. M., Honchar I. M., Shpuliar Yu. S. Pidvyshchennia stiikosti metalo- i derevorizalnoho instrumentu nanesenniam elektroiskrovykh pokryttiv. *Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy*. 2018. T.28, № 2. S. 111–114.
24. Pashechko M. I., Holubets V. M., Chernets M. V. Formirovanie i friktsionnaya stoykost evtekticheskikh pokrytiy. Kiev: Naukova dumka, 1993. 344 s.

25. Ugolev B. N. Drevesinovedenie i lesnoe tovarovedenie: uchebnik. Moskva: MGUL, 2007. 351 s.

26. Lyubchenko V. I. Rezanie drevesiny i drevesnyh materialov: uchebnik. Moskva: MGUL, 2004. 306 s.

27. Beynart I. I., Vedernikov N. A., Gromov V. S. Kletochnaya stenka drevesiny i ee izmenenie pri himicheskom vozdeystvii. Riga: Zinatne, 1972. 510 s.

28. Moiseev A. V. Iznosostoykost derevorezhushchego instrumenta. Moskva: Lesnaya promyshlennost, 1981. 112 s.

Голубець Володимир Михайлович – д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри прикладної механіки і технології машинобудування Національного лісотехнічного університету України, golubets.volodymyr@gmail.com; pmitm@nltu.edu.ua

Пашечко Михайло Іванович – д-р техн. наук, професор кафедри основ техніки Люблінського технічного університету «Люблінська політехніка».

Гончар Іван Миколайович – канд. техн. наук, доцент кафедри прикладної механіки і технології машинобудування Національного лісотехнічного університету України.

Шпуляр Юрій Степанович – аспірант кафедри прикладної механіки і технології машинобудування Національного лісотехнічного університету України.

Гасій Олександр Богданович - д-р техн. наук, доцент кафедри прикладної механіки і технології машинобудування Національного лісотехнічного університету України.