

Антифрикційні покриття з самозмащувальною дією на основі оксиду магнію

В. В. Щепетов¹ • Н. М. Фіалко¹ • С. С. Бись² • К. О. Зворикін³

Received: 10 May 2025 / Revised: 6 June 2025 / Accepted: 24 June 2025

Анотація. До актуальних проблем сучасного матеріалознавства належить проблема підвищення довговічності і експлуатаційної надійності рухомих спряжень деталей машин. При цьому значний інтерес становить застосування складних оксидних сполук, зокрема, оксиду магнію як матеріалу для вузлів тертя. До того ж важливим є розроблення композицій, здатних за умов тертя виконувати роль твердих мастил.

Метою роботи стало визначення закономірностей тертя та зношування композиційного покриття на основі оксидних сполук магнію зі структурно-вільним карбідом магнію і вивчення їх структурно-фазового складу та впливу на формування і самоорганізацію поверхневих структур.

У якості матеріалу для напilenня застосовувався ортосилікату магнію, до якого додавалися леговані домішки з порошків хрому, нікелю, титану, алюмінію та ін. Вихідну композицію для напilenня одержували методом механіко-хімічного синтезу. Фізико-механічні властивості і закономірності тертя та зношування покриттів досліджувалися за торцевою схемою в режимі безперервного ковзання при постійному навантаженні. Комплексна методика включала металографію, дюрOMETричний аналіз, растрову електронну мікроскопію та рентгеноструктурний фазовий аналіз.

За результатами досліджень було розроблено високоефективні покриття на основі ортосилікату магнію, що характеризуються покращеними антифрикційними властивостями. Визначено оптимальний режим детонаційно-газового напilenня пропонуваніх покриттів. Вивчено характер та закономірності, які зумовлюють схильність покриттів до пасивації.

Результати досліджень закономірностей тертя та зношування запропонованого детонаційного покриття і їх структурно-фазового складу та особливостей самоорганізації поверхневих структур розширюють уявлення в сфері сучасного триботехнічного матеріалознавства.

Ключові слова: детонаційне покриття, інтенсивність зношування, структурно-фазовий склад, графітизація.

Вступ

Підвищення довговічності і експлуатаційної надійності рухомих спряжень деталей машин, що працюють в умовах зношування, залишається актуальною проблемою сучасного виробництва.

Значну увагу з точки зору триботехнічного матеріалознавства привертають складні оксидні сполуки і, в першу чергу, оксиди магнію, як перспективні мате-

ріали для вузлів тертя. З'єднання магнію завдяки своїм винятковим властивостям широко практикуються в інноваційних технологіях. Без них неможливе функціонування технічних конструкцій від сплавів та хімічних джерел струму до вогнеупорів та систем військової техніки [1]–[2]. Їх використання у триботехнічному матеріалознавстві пов'язано з сучасними досягненнями трибології. Так, в якості структурних складових покриттів вони застосовуються для захисту машин і механізмів від прояву деструктивних процесів зношування в умовах тертя [3]–[4].

Засобами зменшення сил тертя і боротьби зі зносом можуть бути матеріали, що утримують складні сполуки оксидів магнію, які здатні виконувати при терті роль твердих мастил. У сучасних трибосистемах контактна взаємодія рухомих спряжень в умовах відсутності мастил практично не реалізується. Ефективне

✉ В. В. Щепетов
lavruhin.egor@gmail.com

¹ Інститут технічної теплофізики НАНУ, Київ, Україна

² Хмельницький національний університет, Хмельницький, Україна

³ КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

функціонування вузлів тертя машин і механізмів забезпечується, головним чином, використанням різноманітних мастильних матеріалів, які значною мірою знижують параметри тертя та зношування. Застосування котрих зумовлено у кожному конкретному випадку їх змащувальними властивостями, так полімерні змазки є ефективним матеріалом від кімнатної температури до 300 °C; ламінарні тверді мастила розширюють діапазон до 400 °C; графіт, будучи шаруватим твердим матеріалом, виняток, оскільки забезпечує мастильну здатність в умовах температур, що перевищують 450 °C. Стабільні фториди та оксиди металів можуть бути задіяні при температурах від 500° до 1000 °C [5].

Потреба, що виникає з актуальних виробничих завдань та внутрішньої логіки наукового розвитку, вимагає нових рішень у реалізації загального матеріалознавчого імперативу [6]. При цьому все більшу роль у забезпеченні довговічних зносостійких властивостей рухомих спряжень набуває використання самозмащувальних покриттів на основі твердих мастил [7]–[8].

Узагальнюючи, можна відзначити, що розробка порошкових композицій для високоякісних антифрикційних покриттів є пріоритетним напрямком сучасного триботехнічного матеріалознавства та актуальним завданням, що пов'язано з підвищенням експлуатаційного ресурсу деталей машин промислового виробництва [9].

Метою роботи є визначення в рамках феноменологічного розгляду закономірностей тертя та зношування композиційного покриття на основі оксидних сполук магнію зі структурно-вільним карбідом магнію, вивчення їх структурно-фазового складу та впливу на формування і самоорганізацію поверхневих структур, що мають самозмащувальну здатність.

Матеріали та методи досліджень. В роботі цілеспрямовано використовувався ортосилікат магнію (форстерит) з хімічною формулою $2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$, що існує тільки в одній модифікації, тобто, як матеріал, він не має поліморфних перетворень. До ортосилікату магнію додавали леговані домішки з порошків хрому, цирконію, нікелю, титану, алюмінію, кремнію та карбону. Вихідну композицію кристалічних порошків складного хімічного складу для подальшого наплення одержували методом механо-хімічного синтезу (МХС). Використання якого дозволило отримати нанокомпозиційний конгломерат частинок основи мікронного розміру та нанорозмірних частинок легованих фаз. У здобутих таким чином порошковий конгломерат додавали у відповідній пропорції структурно вільний карбід магнію (MgC_2) і отриману механічну суміш перемішували до повного та рівномірного розподілу структурних складових.

Покриття на основі ортосилікату магнію формували детонаційно-газовим методом на зразках із високоміцної сталі типу 30ХГСА. У якості контртіла використовували сталь 65Г (HRC 62-65). Фізико-механічні властивості і закономірності тертя та зношування покриттів на основі ортосилікату досліджували за тор-

цевою схемою в режимі безперервного ковзання при постійному навантаженні 15,5 МПа. При цьому програмою досліджень передбачається порівняльний аналіз параметрів тертя розроблених покриттів із значеннями покриттів типу ВК15 та покриттів легованого ніхрому. Міцність зчеплення визначалася штифтовим методом [10], яка для покриттів на основі ортосилікату магнію становила понад 93 МПа при пористості близько 0,5 %, поруч з цим, після попереднього чистового шліфування їх початкова шорсткість відповідала $Ra\ 0,32\text{--}0,63$.

В якості критеріїв працездатності покриттів на основі ортосилікату магнію використовувалися як інтенсивність зношування та коефіцієнт тертя, так і стан робочих поверхонь.

При вивченні закономірностей тертя та зношування при поясненні взаємозв'язків технологія-структура та будова-властивості використовувався комплекс сучасних фізико-хімічних методів структурно-фазового аналізу, що здатні визначати розгляд поверхневих шарів на макро- та мікроскопічних рівнях. При цьому комплексна методика дослідження включала металографію (оптичний мікроскоп "Неофот-32" з приставкою); дюрметричний аналіз (твердометр М-40 фірми LECO); растрову електронну мікроскопію (скануючий електронний мікроскоп JSM-840); рентгеноструктурний фазовий аналізатор (дифрактометр ДРОН-УМ1).

Результати досліджень та їх обговорення. Основними факторами, від яких залежать закономірності, що визначають перебіг процесів тертя та зношування, є зовнішні впливи. Вони зумовлюють ступінь і градієнти пружно-пластичної деформації, температуру, рівень активування, ряд супутніх явищ і зрештою визначають провідний вид зношування.

Результати випробувань досліджуваних покриттів (рис. 1) представлені у вигляді графіків функціональних середніх значень інтенсивностей зношування та коефіцієнтів тертя, отриманих у полі монотонно зростаючих швидкостей ковзання при постійному навантаженні, що відповідає 15,5 МПа.

В робочому діапазоні досліджень значення контрольованих параметрів для покриттів на основі ортосилікату магнію порівняно з покриттями-свідками мінімальні та стабільні (відповідно криві 1 та 2), що зумовлює нормальне механохімічне зношування.

Фазовий склад покриттів відрізняється від складу порошку внаслідок фазових перетворень та окислення при взаємодії компонентів у високотемпературному потоці.

Мікрогеометрія робочої площі покриттів на основі силікатів у поєднанні з фізико-механічними властивостями поверхневої кулі визначає їх експлуатаційний стан. Результати досліджень показали, що у процесі припрацювання вихідний технологічний рельєф зникає, хімічний склад, структура поверхневого шару та його геометрія докорінно змінюються.

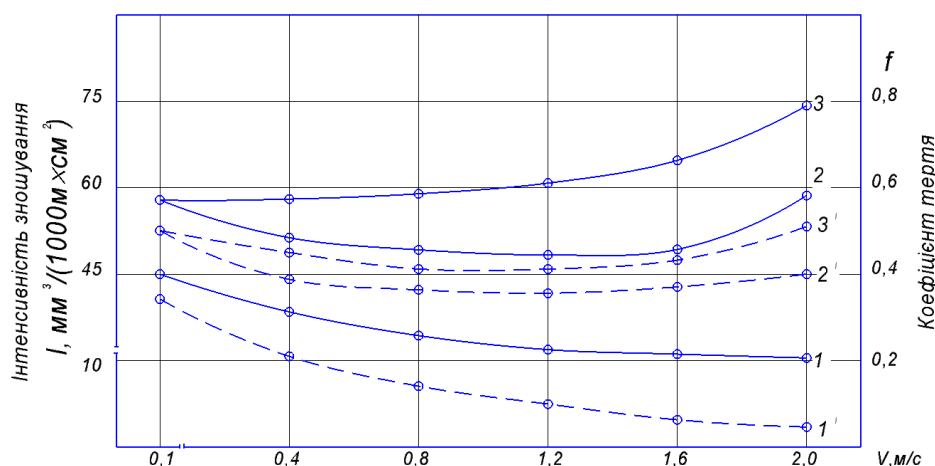
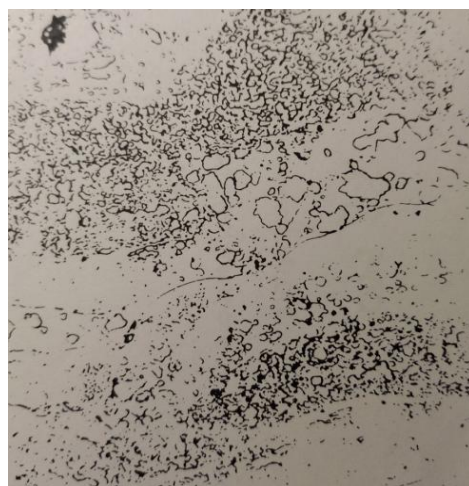


Рис. 1. Залежності інтенсивностей зношування (1, 2, 3) та коефіцієнтів тертя (1', 2', 3') від швидкості ковзання покриттів на основі ортосилікату магнію (1, 1'), ВК15(2, 2') і легованого ніхром (3, 3') при $P = \text{const} = 15,5 \text{ МПа}$



a



б

Рис. 2. Мікроструктура перерізу покриття, що напilenі композиційним порошком на основі ортосилікату магнію (*a* – $\times 120$; *б* – $\times 5000$)

Можливо визначити, що припрацювання є одним із проявів процесу самоорганізації, при якому квазірелаксація структури поверхні від рівноважного переходить до сталого стану. Одночасно формується нова якість поверхні, що характеризується утворенням врівноваженої шорсткості, яка є не тільки оптимальною для конкретних умов тертя, але й забезпечує стабільне зношування у всьому діапазоні випробувань. Таким чином, вихідна технологічна шорсткість перетворюється на оптимальну експлуатаційну шорсткість, яка для покриттів на основі силікату відповідає значенню R_a 2,5–1,5. При цьому, напильний шар відрізняється гетерогенною тонко дисперсною структурою, з квазіупорядкованим ламелеподібним видом та щільно прилягає до основи і копіює рельєф поверхні, в той же час, скупчення пльок, шлакових включень та інших

забруднень, як і дефектів у вигляді мікропорів і мікротріщин не виявлено.

З результатів мікро рентгеноструктурного аналізу (МРСА), виконаного на установці "Сamebax SX", встановлено, що досліджувані покриття мають багатокомпонентну дрібнозернисту сукупність, основа якої складається з однорідного гексагонального ортосилікату магнію і майже рівномірно визначеної істотної кількості тонкодисперсних включень карбідів, особливо карбіду кремнію (SiC) та тонкого конгломерату зміцнювальних сполук, якими є силіциди Cr_2Si_3 , CrSi_2 , Zr_3Si_2 , TiSi , TiSi_2 та і алюмініди TiAl_3 , TiAl , ZrAl_3 , CrAl_4 , а також інтерметалідні утворення типу ZrCr_2 , ZrV_2 , NiTi . Крім того, встановлено наявність високотемпературних сполук муліту Al_2SiO_4 , який, на наш погляд, утворюється з появою кристобаліту $\beta\text{-SiO}_2$ при

подальшому підвищенні температури, також виявлені частки β -тіталіту, що мали утворитись, як результат взаємодії твердих розчинів за реакцією: $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 = \text{Al}_2\text{TiO}_5$. Таким чином, встановлено гетеро фазну тонко дисперсну шарову структуру, яка має підвищені фізичні, термічні та хімічні властивості як за нормальних, так і за підвищених температур. Також досліджувану структуру складають невеликі фрагменти потрібних сполук перехідних металів у вигляді Cr_2SiC , TiAlC , TiZrC , SiZrC , крім того, на фоні твердих розчинів знайдено рефлекси, що відповідають алюмінату магнію (MgAl_2O_4), кристали якого мають структуру шпінелі і відповідають підвищеним термодинамічним властивостям [11].

Зазначені структурні складові покриттів на основі ортосилікату магнію утворюють тверді розчини, хімічні сполуки та механічні суміші та мають підвищену температурну стійкість, значну твердість і міцність, корозійну стійкість, що забезпечує їх високий опір зносу в умовах тертя, особливо при підвищених температурах.

Проблема якості покриттів нерозривно пов'язана з оцінкою відтворюваності та оптимізації технологічного процесу напилення. Зміна технологічних режимів призводить до зміни властивостей покриттів. Для отримання якісних покриттів шляхом оптимізації технологічного режиму напилення реалізовано обробку технологічних параметрів, серед яких гранулометричний склад, глибина завантаження, ступінь заповнення ствола, співвідношення робочих газів та дистанція напилення [12]. Таким чином, керуючи технологічним процесом формування досліджуваних покриттів, реалізовано не тільки необхідний хімічний склад, а й отримано при напиленні прогнозовану стабільну структуру, що визначає комплекс властивостей, які зумовлюють стабільність структурної пристосовуваності. При цьому досягнуті можливості отримання постійної якості, а саме варіювання міцнісних і пластичних характеристик у зразках однієї партії, що напилювались, стабільно складало близько 5–10 %.

Вивчення фізичних механізмів формування та еволюції структурно-фазових станів вторинних структур в умовах механохімічної активації є одним з важ-

ливих завдань управління поверхневою міцністю покриттів на основі ортосилікату магнію при регулюванні їх триботехнічних властивостей.

Для всебічної та достовірної інформації при дослідженні тонких поверхневих шарів, у яких протікають процеси структурно-термічної активації, додатково був застосований метод вторинно-іонної маспектроскопії (BIMC), який проаналізував зміну мікроструктури та встановив природу фаз, їх кристалічну структуру та параметри елементарних осередків, що необхідні для ідентифікації складу в межах областей їх однорідності.

Отримані результати дозволили узагальнити, що ініціація фізико-хімічних перетворень внаслідок пружно-пластичної деформації насамперед виявляється в процесі інверсії взаємодії з киснем повітря і, як результат – реформування вторинних поверхневих оксидних плівок шляхом додаткових утворень, що складаються в межах структури ортосилікатної композиції, і за стехіометричним складом представляють сутужний комплекс у вигляді оксидів Al_2O_3 , SiO_2 , ZrO_2 , TiO_2 , Cr_2O_3 , MgO , які, взаємодіючи, утворюють як тверді розчини типу $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$, $\text{ZrO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ про що свідчить збіг концентраційних максимумів (рис. 3), так і шпінельних фаз NiCrO_4 , MgAlO_4 , Zr_2SiO_4 , Al_2SiO_5 , Cr_2TiO_5 , крім того, ідентифіковано наявність двійних з'єднань типу TiO-ZrO_2 , MgO-TiO_2 , MgO-ZrO_2 , також невиключена імовірність присутності трійних сполук таких, як $\text{Mg-ZrO}_2\text{-TiO}_2$, $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$. Слід зазначити, що вторинні оксидні структури, що виявлені, визначаються значною міцністю, твердістю, термічною стабільністю і хімічною інертністю. При цьому процеси утворення та руйнування оксидних структур знаходяться в динамічній рівновазі і автоматично саморегулюються, що обумовлює прояв і стійкість явища структурного пристосування [13]. Проте, внаслідок статистичних закономірностей процеси розпаду ультрадисперсних вторинних структур на різних ділянках робочої поверхні в результаті контактної дискретності не збігаються по стадіям. Водночас є нагода вважати, що процес їх утворення має місце не на всій трибоповерхні, а лише на окремих нерівномірних фрагментах фактичної робочої площі, але їх адитивний розподіл є стійким структурно-тимчасовим станом.

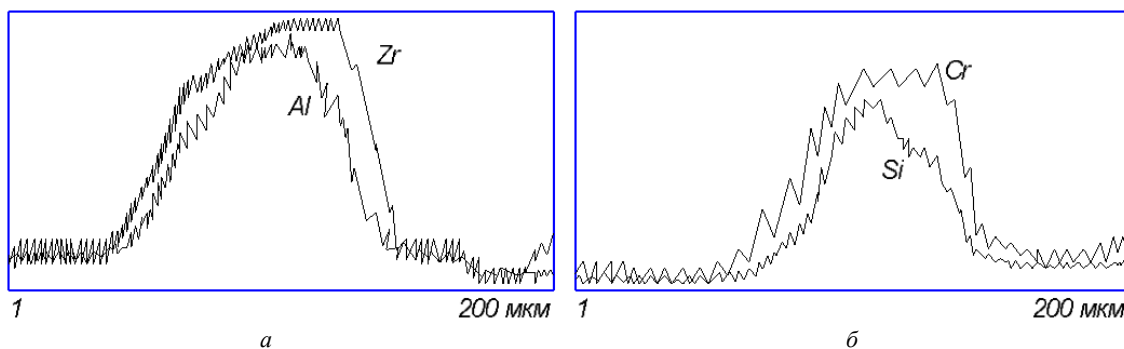


Рис. 3. Розподіл елементів у оксидній плівці на ділянці поверхні покриття на основі ортосилікату

З метою вивчення стану оксидного поверхневого шару, в якому протікають процеси активування при терті, був використаний електронографічний аналіз, виконаний на установці ЕРМ-100 (зйомка відображення при $U = 5$ кВ). На рис. 4 наведена електронограма від поверхні покриття на основі ортосилікату магнію, яка фіксує зміну тонкої структури, про що свідчить про наявність максимумів інтенсивностей на дифузійних ореолах. Досліджуваний тонко плівковий шар представляє ультрадисперсну орієнтовану структуру. При цьому мікротвердість поверхневого шару складає 21,0–23,0 ГПа (при початковій близько 16,0 ГПа). Таким чином, низькі і стабільні значення як коефіцієнтів тертя, так і інтенсивностей зношування покриттів забезпечуються утворенням цілісного динамічно стійкого конгломерату оксидних структур, що екранують адгезійно-молекулярну взаємодію при терті і мають дрібнодисперсну будову та в умовах локальних контактних тисків і температур утворюють щільні гетерогенні жароміцні і досить пластичні поверхневі структури без тріщин і сколів, які сприяють не тільки зниженню швидкості окислення та підвищенню жаростійкості, але і виконують роль твердих мастил при терті [14].



Рис. 4. Електронограма від поверхні контактної кулі покриття на основі ортосилікату при $V = 1,5$ м/с та $P = 15,5$ МПа

При підвищенні швидкості ковзання до 0,14 м/с питома робота зношування досягає приблизно 10^4 кДж/мм³, що відповідає необхідній і достатній умові термічного розпаду магнію карбіду і, як наслідок, на поверхні тертя з'являються фрагменти структурно-вільного α -графіту (рис. 5). Форма частинок графітової структури близька до лускатої, що складається з полідисперсних кристалітів, орієнтованих у напрямку тертя. Слід зазначити, що сильна сторона графіту, як антифрикційного матеріалу, в його слабкій взаємодії між шарами. Таким чином, припрацювання, у певному сенсі, можна розглядати як специфічний вид термічної обробки, що супроводжується графітизацією.



Рис. 5. Топографія поверхні при формуванні графітової плівки ($v = 0,17$ м/с)

В основі фізичного явища, що визначає механізм розкладання карбіду магнію, лежить процес структурного перетворення на твердій фазі, що розвивається в результаті теплового впливу. Основними факторами, які визначають граничні значення термодинамічних процесів графітизації, є, перш за все, рівень дисперсності структурних складових, питомий тиск, робоча температура, оточуюче середовище, наявність ініціюючих елементів (вуглець, кремній, нікель, алюміній), крім того, і вплив внутрішніх факторів, що зумовлені складом, структурою, наявністю дефектів та ін.

Елементарний акт високотемпературної реакції в одиничному об'ємі локального контакту, що супроводжується утворенням карбідного графіту, за рахунок екзотермічного ефекту, викликає наступний елементарний акт, зумовлюючи таким чином здатність до самопоширення.

Самозмашування покриттів на основі ортосилікату магнію залежить від утворення графітової плівки, динамічна рівновага якої підтримується за рахунок подальшого утворення графіту. При швидкостях випробувань більше 0,21 м/с фрикційна самозмашувальна поверхнева плівка графіту покриває вже більше половини площі тертя і, при цьому, являє собою шар з впорядкованої безлічі полідисперсних частинок графіту, саморівновага яких підтримується за рахунок їх активного утворення в результаті піролізу. При цьому, чим вище температура, тим у більшій кількості вуглець перетворюється на графітоутворюючу самозмашувальну плівку, і, чим триваліше взаємодіють площі контактних спряжень, тим більше утворюється графіту.

Таким чином, засобом регулювання зносу і забезпечення самозмашування покриттів на основі ортосилікату магнію є як застосування карбіду магнію, що через структуру впливає на процес адаптації при терті за рахунок модифікування поверхневих шарів карбідним графітом, так і спільне використання стійких поверхневих оксидних структур, які при кооперативній самоорганізації забезпечують адитивний комплекс жаро-

міцних поверхневих структур, що запобігають безпосередньому контакту поверхонь та ефективно знижують силу тертя, інтенсивність зносу і запобігають неприпустимим процесам руйнування.

З точки зору структурної термодинаміки систем упорядкованість поверхневих плівок, що само адаптуються, за рахунок зміни складу і структури, можна розглядати як адекватні елементарні фізико-хімічні процеси і механізми адаптації в процесі структурної пристосовуваності [15].

На рис. 1 також представлені результати випробувань покриттів типу ВК15 (криві 2, 2'), напилених вольфрамокобальтовим порошком. Покриття цього типу, як класичний зносостійкий матеріал, широко використовується для захисту від зносу значної номенклатури різних за конструкцією та призначенням відповідальних деталей. Як встановлено, при швидкостях ковзання більше 1,9 м/с на тенденцію зниження їх швидкості проти зносу надає температурний фактор, який в кінцевому рахунку виявляється вирішальним у розвитку деструкційних процесів при терті.

Для покриттів на основі ніхрому (рис. 1, криві 3, 3¹) легованого алюмінієм і бором, характерне монотонне підвищення інтенсивності зношування зі зростанням швидкості. Вивчення фазового складу показало наявність у композиції покриття як твердого розчину на основі нікелю, так і дисперсних сполук алюмінідів нікелю (NiAl , Ni_3Al), боридів хрому (Cr_2B , Cr_5B_3), а також присутність складних боридів типу (Cr , Ni). Пасивні можливості вторинних структур із збільшенням швидкості випробувань пригнічуються розвитком пластичної деформації і, як наслідок, динамічна рівновага зсувається у бік підвищення енергії активації, і вид зносу якісно змінюється. За даними металографічного аналізу їх поверхні тертя при швидкостях 1,8 м/с мають безладні локальні виривання, подрипини, характерні для початкового розвитку процесів схоплювання.

Таким чином, розроблені на основі ортосилікату магнію детонаційні покриття, здатні до самозмащування, характеризуються високими антифрикційними властивостями і за експлуатаційними можливостями мають перспективу використання при отриманні конкурентних систем триботехнічного призначення. Проведені дослідження також підтверджують доцільність продовження їх випробувань для використання з метою підвищення антифрикційності за рахунок самозмащування пар тертя в реальних умовах експлуатації, але вже зараз можна відзначити, що їх використання дозволить підвищити експлуатаційну надійність і робочий ресурс виробів та знизити ремонтні витрати при відновленні. Найбільш доцільно застосування досліджуваних покриттів для підвищення надійності експлуатації вузлів тертя при зміцненні та відновленні, наприклад, для рухомих пар механізмів управління, шарнірів напрямних поверхонь, кулачків, опор ковзання, пар із зворотно-поступальним переміщенням, підшипників, направляючих ковзання, важільних дета-

лей, високошвидкісних і важко навантажених вузлів, в яких застосування традиційних мастил небажано.

Слід зазначити, що розроблений композиційний порошок на основі ортосилікату магнію для формування самозмащувальних покриттів може застосовуватися для будь-яких технологічних методів, що використовують порошкові матеріали.

Представлена робота продовжує цикл досліджень із розробки перспективних покриттів для мінімізації коефіцієнтів тертя та інтенсивностей зношування за рахунок використання матеріалів, що містять сполуки магнію.

Висновки

1. Розроблені і досліджені детонаційні покриття на основі сполук магнію, які характеризуються стабільними і мінімальними значеннями коефіцієнтів тертя і інтенсивностей зношування в умовах випробувань при швидкості ковзання до 4,0 м/с і навантаженні 12,5 МПа, мають параметри тертя значно нижчі за отакі для покриттів-свідків майже у 2,5–7,0 разів.

2. Створення порошкової суміші на основі ортосилікату магнію здійснювали методом механо-хімічного синтезу (МХС), що дало можливість отримати наноконпозиційний конгломерат часток основи мікронного розміру та нанорозмірних легованих фаз з наступним додаванням до порошкової композиції структурно вільного карбіду магнію.

3. Відпрацьовано оптимальний режим детонаційно-газового напилення композиційних нанопорошків, при цьому вдалося удосконалити технологічний процес детонаційно-газового напилення композиційних порошків на основі ортосилікату магнію. При цьому вдалося відтворити не тільки планований хімічний склад, а й отримати разом з тим прогнозовану структуру, яка модернізує поверхню тертя та мінімізує триботехнічні властивості. Водночас підкреслено, що варіювання міцних і пластичних властивостей в зразках однієї партії стабільне і складає 5–10 %.

4. Визначено фізичний механізм та основні фактори, що визначають рівень термодинамічної графітизації. Вивчено характер та закономірності, які зумовлюють схильність покриттів до пасивації. Зазначено, що її реалізація здійснюється як за рахунок твердофазних трибохімічних реакцій, так і дифузійних процесів при формуванні квазішаристих полідисперсних поверхневих плівок, які мають самозмащувальну здатність, та синтезовані на основі карбідного α -графіту і тонкодисперсних оксидних сполук.

5. Розроблені самозмащувальні покриття на основі ортосилікату магнію розширяють досягнення сучасного триботехнічного матеріалознавства. При цьому, досліджувальні самозмащувальні покриття можуть застосовуватись як для зміцнення, так і для якісного відновлення зношених деталей будь-якими технологічними методами, що використовують порошкові матеріали.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що вони не мають жодного конфлікту інтересів щодо цього дослідження, включаючи фінансові, особисті, авторські або будь-якого іншого характеру, які могли б вплинути на дослідження та його результати, представлені в цій статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні даної роботи.

References

- [1] M. Hoking et al., "Metalevi ta keramichni pokryttja: otrymannja, vlastyvoli, zastosuvannja," M.: Svit, 2000.
- [2] N. M. Fialko, V. V. Shchepetov, S. D. Kharchenko, "Nanostructural gasscomposite lubricant coating," *Journal of KNU*, No. 6. pp. 51–59, 2022. doi: <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2022-106-4-6-12>.
- [3] A. Kovalejro, D. Hossona, "Nanostrukturni pokryttja," M.: Tehnosveru, 2011.
- [4] V. P. Babak, N. M. Fialko, V. V. Shchepetov, S. D. Kharchenko, S. S. Bys, "Self-lubricating glass composite nanocoatings," *Materials Science (Physicochemical mechanics of materials)*, No. 6. pp. 33–39, 2023. doi: <https://doi.org/10.1007/s11003-023-00740-z>
- [5] Tribology Composite. Springer, Heidelberg, 2016. ISBN: 978-3-642-3381-6.
- [6] Wear of composite. DeGruyter, Berlin, 2018. ISBN: 978-3-11-03529863.
- [7] Tribologyforengineers. Woodhead \ Elsevier. Cambridge. 2017. ISBN: 843346159.
- [8] B. P. Babak, N. M. Fialko, V. V. Shchepetov, S. Bellucci, "Detonation self-lubricating antifriction glass composition," *Journal of nanomaterials*, No. 2, pp. 82–88, 2022. doi: <https://doi.org/10.1155/2022/1493066>.
- [9] B. I. Kostetsky, "Surface strength of materials under friction," K.: Nauk. Dumka, 1996.
- [10] L. Singh, V. Chawla, J. Grewall, "A Review on Detonation Gun Sprayed Coatings," *Journal of Materials and Engineering*, vol. 11, No. 3. pp. 243–265, 2012. doi: <https://doi.org/10.4236/jmmce.2012.113019>.
- [11] V. V. Fedorov, "Thermodynamic aspects of strength and destruction of solids," T.: Publisher: Fan, 2009.
- [12] V. P. Babak, V. V. Shchepetov, V. I. Mimenko, S. D. Nedayborshch, "Mathematical design of forming of detonation coatings," *technological systems*, No. 2, pp. 82–88, 2016. <http://technological-systems.com/index.php/Home/article/view/34>.
- [13] L. I. Bershadsky, Structural Thermodynamics of Tribosystems, Kiev: Znannya, 1990. 30 p.
- [14] Wear of Advanced Materials, Wiley. 2018, ISBN: 978-1-84821-352-4.
- [15] V. V. Dragobetsky, O. O. Shapoval, M. V. Zagirnyak, et al., "Controlled Effects of Plastic Deformation," Kharkiv: Madrid Printing House, 2017. 244 p. https://www.kdu.edu.ua/new/PHD_vid/KEPDZVMT.pdf.

Anti-friction coating with self-lubricating action based on magnesium oxide

Vitalii Shchepetov¹ • Nataliia Fialko¹ • Serhii Bys² • Constantine Zvorykin³

¹ Institute of Engineering Thermophysics of National Academy of Science, Kyiv, Ukraine

² Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi, Ukraine

³ E. O. Paton Institute of Materials Science and Welding, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine

Abstract. The urgent problems of modern materials science include the problem of increasing the durability and operational reliability of moving joints of machine parts. At the same time, the use of complex oxide compounds, in particular, magnesium oxide as a material for friction units is of considerable interest. In addition, it is important to develop compositions that can act as solid lubricating oils under friction conditions.

The objective of the work is to determine the patterns of friction and wear of a composite coating based on oxide compounds of magnesium with structurally free magnesium carbide and to study their structural-phase composition and influence on the formation and self-organization of surface structures.

Magnesium orthosilicate was used as a material for spraying, to which alloyed impurities from chromium, nickel, titanium, aluminum powders, etc. were added. The initial composition for spraying was obtained by the method of mechanical-chemical synthesis. The physical and mechanical properties and patterns of friction and wear of the coatings were studied using the end-face scheme in the continuous sliding mode under constant load. The complex methodology included metallography, durometric analysis, scanning electron microscopy and phase X-ray structural analysis.

Highly effective coatings based on magnesium orthosilicate, characterized by improved antifriction properties, were developed. The optimal mode of detonation-gas spraying of the proposed coatings was determined. The nature and patterns that determine the tendency of the coatings to passivation were studied.

The results of the studies of the friction and wear patterns of the proposed detonation coating and their structural-phase composition and features of self-organization of surface structures expand the understanding of modern tribological materials science.

Keywords: detonation coating, wear intensity, structural-phase composition, graphitization.