

# Триботехнічні самозмащувальні детонаційні покриття на основі цирконію

В. В. Щепетов<sup>1</sup> • Н. М. Фіалко<sup>1</sup> • С. С. Бись<sup>2</sup> • К. О. Зворикін<sup>3</sup>

Received: 2 October 2024 / Revised: 25 November 2024 / Accepted: 10 December 2024

**Анотація.** Стаття присвячена актуальній проблемі розроблення і дослідження властивостей високоефективних антифрикційних покриттів, застосування яких забезпечує самозмащування за рахунок утворення твердих мастил.

Мета роботи пов'язана з вивченням структурно-фазового складу та дослідженням триботехнічних властивостей детонаційних покриттів системи Zr-Ti-V-Cr-Si-C-MgC<sub>2</sub> за умов навантаження у полі швидкостей ковзання.

Представлено узагальнені результати теоретичних і прикладних досліджень щодо цілей даної роботи. Встановлено оптимальний структурно-фазовий склад досліджуваних покриттів. Відпрацьовано технологію отримання порошкової суміші та вдосконалено технологічний процес формування покриттів на основі цирконію. За результатами виконаних досліджень відзначається, що для умов, які розглядаються, засобом саморегулювання процесу зношування є як наявність тонкого шару графіту, так і утворення дисперсних вторинних структур. Їх спільна дія забезпечує модифікування поверхні тертя та екранізує неприпустимі процеси тужавлення. Результати досліджень показали також, що розроблені покриття демонструють високі та стабільні антифрикційні властивості у всьому навантажувально-швидкісному діапазоні випробувань.

Пропоновані інноваційні покриття на основі цирконію можуть широко застосовуватися для відновлення чи зміцнення деталей будь-якими технологічними методами, що використовують порошкові матеріали. Найбільш ефективно застосування цих покриттів відповідає ситуаціям, в яких використання традиційних мастил небажано.

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

## Вступ

На тлі загальних досягнень матеріалознавчої науки питання зносостійкості матеріалів виділяються складністю і багатоплановістю. Вони безпосередньо пов'язані з явищем тертя, яке стосується важливої проблеми сучасної техніки – зносу деталей та конструкцій машин. Знос, що є універсальним феноменом деградації матеріалів, як відомо, суттєво погіршує технічні можливості та скорочує терміни експлуатації технічних

конструкцій. Збереження експлуатаційних характеристик, що обмежуються тертям і зношуванням як окремих вузлів, так і технічних систем в цілому, може бути забезпечено засобами інженерії поверхонь.

В останні роки провідну роль в забезпеченні антифрикційності відіграють методи структурної інженерії, що використовують самозмащування за рахунок застосування твердих мастил [1], [2]. Покриття, що містять такі мастила, є одними з найбільш перспективних інноваційних матеріалів, висока якість яких особливо важлива за умов, коли традиційні рідкі мастила малоефективні [3], [4]. Їх використовують у різних галузях техніки, зокрема, для змащування прецизійних механізмів, запобігання заїдання різьбових з'єднань тощо [5], [6].

Розробка самозмащувальних покриттів відповідає сучасним пріоритетам триботехнічного матеріалознавства, спрямованим на підвищення стійкості до зносу та на розробку науково-прикладних рішень з метою вдосконалення ефективності їх застосування [7], [8].

✉ К. О. Зворикін  
constantine.oleg@gmail.com

<sup>1</sup> Інститут технічної теплофізики НАНУ, Київ, Україна

<sup>2</sup> Хмельницький національний університет, Хмельницький, Україна

<sup>3</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

**Мета роботи** пов'язана з вивченням структурно-фазового складу та дослідженням триботехнічних властивостей детонаційних покриттів системи Zr-Ti-V-Cr-Si-C-MgC<sub>2</sub> за умов навантаження у полі швидкостей ковзання.

### Матеріали та методи досліджень

Порошкову композицію для напилення на основі цирконію, легованого титаном, ванадієм, хромом, кремнієм і вуглецем, отримували за технологією механо-хімічного синтезу (МХС) у лабораторному атритері типу "ИЕС-1-0,5". В отриману таким чином суміш у відповідній пропорції додавали структурно вільний карбід магнію і перемішували до рівномірного розподілу. Покриття для дослідження фізико-хімічних закономірностей тертя та зношування формувались детонаційно-газовим методом з дистанції 160 мм при використанні киснево-ацетиленової суміші на підготовлені зразки із сталі типу 30ХГСНА. Детонаційно-газові покриття, як відомо, мають найкращі експлуатаційні властивості серед газотермічних покриттів, близьких за структурно-фазовим складом [9].

Вивчення особливостей поверхонь тертя, в яких протікають процеси активації, що впливають на інтенсивність трибохімічних реакцій, здійснювалось на основі комплексної методики фізико-хімічного аналізу, включаючи металографію (оптичний мікроскоп "Неофот-32"), дюротричний аналіз (твердомір М-400 фірми LECO), растрову електронну мікроскопію (скануючий електронний мікроскоп JSM-840) та рентгеноструктурний фазовий аналіз (дифрактометр ДРОН-УМ1).

Триботехнічні властивості покриттів оцінювались при терті модельних зразків за торцевою схемою в умовах розподіленого контакту. Випробування про-

водились у режимі безперервного ковзання при постійному навантаженні 12,5 МПа; товщина покриттів після доведення становила 0,70–0,75 мм; міцність зчеплення визначалась методом штифта та для покриттів на основі цирконію досягала 92 МПа при пористості близько 0,5 %; після попереднього чистового шліфування їх початкова шорсткість становила  $Ra = 0,32\text{--}0,63$ .

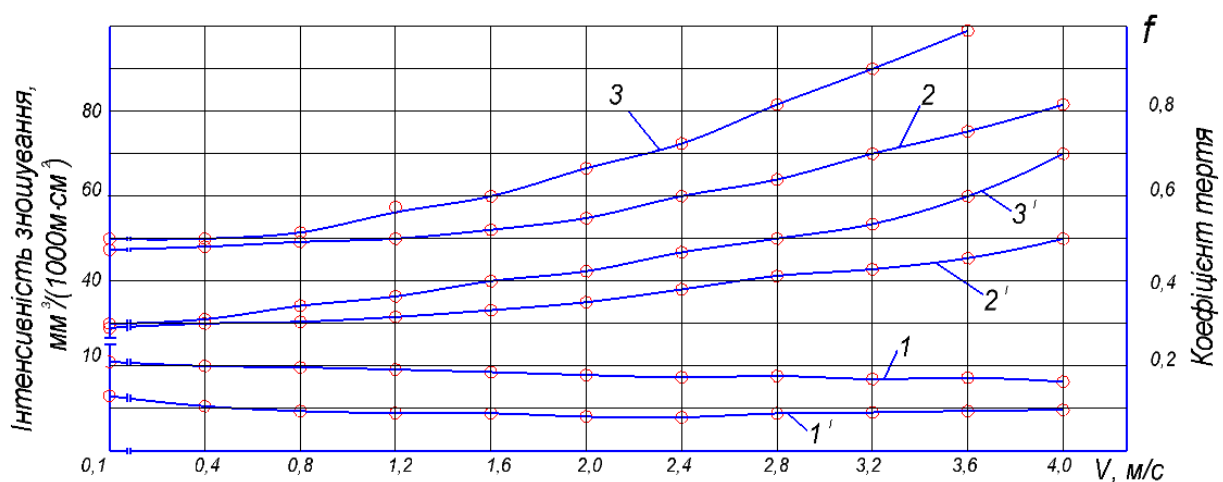
При триботехнічних випробуваннях детонаційних покриттів на основі цирконію за аналогічних умов досліджувались покриття типу ВК15 і покриття, напилені легованим порошком на основі ніхрому.

### Результати досліджень

Протікання процесів тертя та зношування визначається, головним чином, зовнішніми факторами, які зумовлюють ступінь та градієнти пружнопластичної деформації, температуру, рівень активації та низку другорядних явищ, від адитивного впливу яких в кінцевому рахунку залежить провідний вид зношування.

Результати випробувань досліджуваних покриттів (рис. 1) представлено у вигляді графіків осереднених функціональних залежностей значень інтенсивностей зношування та коефіцієнтів тертя, отриманих у полі монотонно зростаючих швидкостей ковзання при постійному навантаженні, що дорівнює 12,5 МПа. Аналіз показує, що для покриттів на основі цирконію значення контрольованих параметрів, а саме, інтенсивностей зношування (крива 1) та коефіцієнтів тертя (крива 1'), порівняно з покриттями-свідками найменші і стабільні, що відповідає нормальному механо-хімічному зношуванню.

Мікрогеометрія робочої площини покриттів у поєднанні з фізико-механічними властивостями поверхневого шару визначає їх експлуатаційний стан.



**Рис. 1.** Залежність інтенсивностей зношування (1, 2, 3) та коефіцієнтів тертя (1', 2', 3') від швидкості ковзання покриттів: 1, 1' – системи Zr-Ti-V-Cr-Si-C-MgC<sub>2</sub>; 2, 2' – ВК15 (WC-Co); 3, 3' – на основі ніхрому (Ni-Cr-Al-B) при  $P_{\text{const}} = (12,5 \text{ МПа})$

Результати досліджень поверхонь тертя покриттів на основі цирконію показали, що у процесі припрацювання вихідний технологічний рельєф зникає, хімічний склад, структура поверхневого шару та його геометрія докорінно змінюються. Слід відзначити, що припрацювання є одним із проявів процесу самоорганізації, при якому квазірелаксація структури від рівноважного переходить до сталого стану. При цьому формується нова якість поверхні, яка визначається провідним видом зношування і характеризується утворенням рівноважної шорсткості, яка є не тільки оптимальною для конкретних умов тертя, але і забезпечує мінімальне зношування. Таким чином вихідна технологічна шорсткість стає оптимальною. Для покриттів на основі цирконію характеристика нерівностей відповідає  $Ra$  2,5–1,5. Напилений шар має квазіупорядкований ламелеподібний вигляд, щільно прилягає до основи та копіює рельєф. При цьому скупчення плівок оксидів, шлакових включень та інших забруднень і дефектів у вигляді мікропор і мікротріщин не виявлено.

Проблема якості покриттів нерозривно пов'язана з оптимізацією технологічного процесу та його відтворюваністю. При отриманні якісних покриттів виконано дослідження та оптимізацію параметрів технологічного процесу і, насамперед, гранулометричного складу, глибини завантаження, ступеню заповнення ствола, співвідношення робочих газів і дистанції напилення [10]. Отже, керуючи технологічним процесом формування покриттів з цирконієм, реалізовано не тільки бажаний хімічний склад, але й отримано прогнозовану структуру при напиленні, що забезпечує оптимізацію комплексу властивостей, відповідальних за стабільність структурної пристосованості. При цьому варіювання міцносних і пластичних властивостей в зразках однієї партії, що напилювалась, складало 5–10 %.

Характер взаємодії компонентів покриття визначали за програмою "Lanscan". При цьому було встановлено, що спектри розподілу Zr, Ti та V по лінії сканування корелюють з фазами кремнію та вуглецю. Це підтверджує їхню взаємодію з отриманням відповідних карбідів та силіцидів, а також визначає можливість утворення як твердих розчинів, так і потрібних сполук.

Отже, отримані результати досліджень, доповнені даними рентгеноструктурного аналізу, дозволяють зробити висновок, що вихідні покриття є дисперсним конгломератом з орієнтовно рівномірним розподілом частинок силіцидів  $ZrSi$ ,  $Zr_2Si$ ,  $VSi_2$ ,  $V_5Si_3$ ,  $TiSi$ ,  $TiSi_2$ ,  $CrSi$ ,  $CrSi_2$  та значних колоній карбідів  $ZrC$ ,  $V_2C$ ,  $TiC$  і потрібних сполук перехідних металів з вуглецем типу  $CrSiC$ ,  $ZrSiC$ . Також імовірна наявність карбосиліциду титану ( $TiSiC$ ); визначено присутність у менших кількостях інтерметалідних утворень типу  $CrTi_2$ ,  $ZrCr_2$  у дрібнозернистій матриці твердих розчинів на основі  $TiZr$ ,  $Zr$  та  $V$  в  $Zr$ .

В умовах структурної активації при навантаженні тертям пасивуюча здатність реалізовується за рахунок вторинних структур поверхневих плівок, що за стехіометричною будовою є складним комплексом оксидів, в першу чергу  $SiO$ ,  $V_2O_5$ , які характеризуються підвищеною щільністю та адгезійною міцністю, а також за рахунок високоякісних оксидних сполук, що утворюються  $Cr$ ,  $Zr$  та  $Mg$ . Крім того, взаємодіючи між собою, вони утворюють як тверді розчини типу  $ZrO_2 - SiO_2$ ,  $Cr_2O_3 - SiO_2$  (рис. 2), так і шпінельні фази  $ZrSiO_4$ ,  $CrTiO_5$ . При цьому ідентифіковано наявність двійних з'єднань на зразок  $TiO - ZrO_2$ ,  $MgO - TiO_2$ ,  $MgO - ZrO_2$ . Не виключена ймовірність наявності потрібних сполук, а саме  $MgO - ZrO_2 - TiO_2$ ,  $MgO - CrO_3 - TiO_2$ . Низькі та стабільні значення як коефіцієнтів тертя, так і інтенсивності зношування покриттів на основі цирконію забезпечуються утворенням цілісного динамічно стійкого конгломерату оксидних структур. Останні екранують адгезійно-молекулярну взаємодію при терті і мають дрібнодисперсну будову та в умовах контактних тисків під впливом температур утворюють щільні гетерогенні жароміцні і досить пластичні поверхневі структури без тріщин і сколів, які сприяють не тільки зниженню швидкостей окислення та підвищенню жаростійкості, але і виконують роль твердих мастил. На рис. 3 надано електронограму поверхні контактного шару. Дифузійні ореоли з текстурованими максимумами свідчать, що структура характеризується спрямованою орієнтацією у полі тертя [11]. На думку авторів, закономірності її утворення пов'язані з процесами аморфізації і ме-

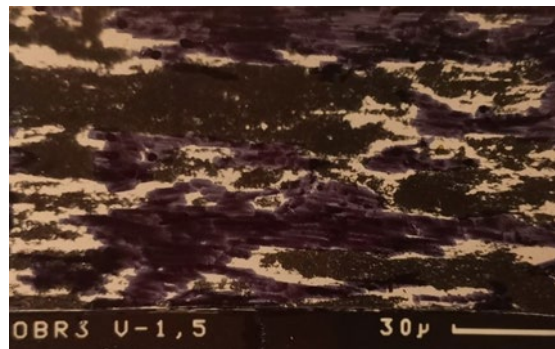
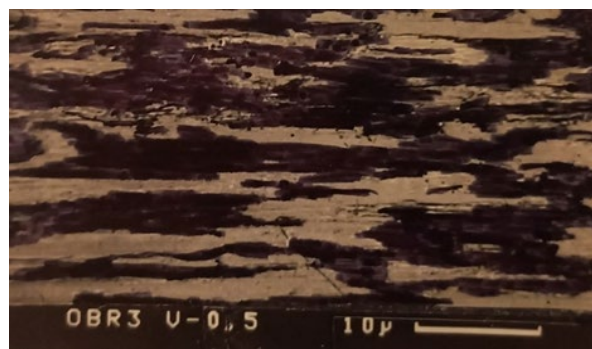


Рис. 2. Знімок мікроструктури перерізу покриттів, що напилені композиційними порошками на основі цирконію

хано-хімічного легування. Їх резонансна взаємодія зумовлює диспергування, розмелювання дисперсоїду з частками оксидів, силіцидів та перетворення їх під впливом температур і тиску в орієнтовану високодисперсну структуру, мікротвердість якої складає 18,0–20,0 ГПа (при початковій  $\sim 13,0$  ГПа). Підкреслимо, що співвідношення оксидних компонентів, які складають поверхневі структури, внаслідок статистичних закономірностей змінюються, однак їх загальний порядок (динаміка утворення та руйнування) залишаються постійними.

Самозмашування композиції на основі цирконію залежить також від утворення графітової плівки. Кількісна енергетична величина питомої роботи зношування в ситуації припрацювання (при  $V = 0,15$  м/с) досягає  $10^4$  кДж/мм<sup>3</sup>, що відповідає необхідним і достатнім умовам для термічного розкладу структурно вільного карбїду магнію [12], [13]. Форма часток графітової поверхневої структури, що утворилась за рахунок карбїдного графіту, близька до лускової і складається з орієнтованих полідисперсних кристалітів, що мають до чотирьох плоских ґраток атомів. Відстань між площинами із значною мірою ймовірності становить приблизно 0,6 нм.

Топографія поверхонь тертя, що вкриті графітовою плівкою представлена на рис. 3. Плівка графіту практично займає всю робочу поверхню, що сприяє збільшенню площі фактичного контакту, зменшенню питомого навантаження за рахунок заповнення та згладжування поверхневих мікронерівностей, мікротріщин, зумовлює закріплення часток графіту у мікровпадинах контактних сполучень. Останнє забезпечує зниження та стабілізацію коефіцієнтів тертя, крім того, позитивно впливає на рівень температури, вирівнювання та зменшення значення деформацій [14], [15].



**Рис. 3.** Електроннограма від поверхні покриття на основі цирконію при  $V = 1,5$  м/с ( $P = 12,5$  МПа)

Представлені результати випробувань розроблених покриттів на основі цирконію відповідають підвищеним триботехнічним характеристикам і в першу чергу за рахунок застосування в їх складі карбїду магнію, який забезпечує при терті утворення карбїдного графіту. Слід зазначити, що важливим засобом регулювання зносу та гарантування оптимальної антифрикційності є наявність карбїду магнію. Він впливає на рівень самоорганізації за рахунок модифікованих поверхневих шарів на основі карбїдного графіту, які у кооперативній самопогодженості з оксидними структурами забезпечують стійкий прояв антифрикційних властивостей.

За аналогічних умов випробувань досліджено також покриття ВК15 (рис. 1, крива 2), що найбільш широко використовуються як триботехнічний матеріал для захисту від зносу значної номенклатури різних за конструкцією та призначенням відповідальних деталей. Однак при швидкостях ковзання більше 1,7 м/с має місце зниження стійкості покриттів типу ВК15 до зносу, яке зумовлюється температурним фактором, що і обмежує його експлуатаційні можливості.

Для покриттів на основі ніхрому (рис. 1, крива 3), легованого алюмінієм і бором, починаючи зі швидкості ковзання 0,4 м/с, характерним є монотонне підвищення інтенсивності зношування. Структура цих покриттів представлена твердим розчином на основі нікелю та дисперсною сумішшю зміцнювальних фаз алюмінідів нікелю, боридів хрому, складних боридних сполук. Мікротвердість покриттів становила близько 10,6 ГПа. Захисні функції вторинних структур, що представляють гетерофазні оксидні тонкоплівкові об'єкти, зі збільшенням швидкості ковзання пригнічуються розвитком пластичної деформації.

Покриття на основі цирконію, що містять карбїд магнію і не мають у складі дорогих і дефіцитних компонентів, відповідають вимогам екологічної безпеки і за експлуатаційними можливостями мають перспективу широкого використання у конкурентоспроможному обладнанні триботехнічного призначення.

Найбільш ефективним є застосування досліджуваних покриттів на основі цирконію для підвищення якості експлуатації вузлів тертя при зміцненні та відновленні рухомих пар механізмів управління, шарнірів напрямних поверхонь, кулачків, опор ковзання, важільних деталей, високошвидкісних і важко навантажених вузлів, в яких застосування традиційних мастил небажано.

Досліджувані покриття на основі цирконію можуть застосовуватися для відновлення чи зміцнення зношених деталей будь-якими технологічними методами, що використовують порошкові матеріали.

Представлена робота продовжує цикл досліджень щодо створення перспективних покриттів, призначених для зниження коефіцієнтів тертя і підвищення зносостійкості поверхонь трибосполучень [16], [17]. Подальші дослідження покриттів на основі цирконію, що

розроблені на базі вітчизняних сировинних ресурсів, направлені на розкриття можливостей їх використання в екстремальних умовах тертя з ціллю вирішення практичних задач покращення їхніх експлуатаційних властивостей у виробках.

## Висновки

1. На основі теоретичних та експериментальних досліджень встановлено оптимальний структурно-фазовий склад покриттів системи Zr-Ti-V-Cr-Si-C-MgC<sub>2</sub>, виявлено особливості формування складно легованих оксидних структур з урахуванням як властивостей легуючих елементів, так і утворених ними поверхневих шарів першої лінії, що забезпечують модифікацію робочих поверхонь та екранують від небажаних процесів пластичної деформації.

2. За даними механо-хімічного синтезу відпрацьовано технологію отримання порошкової суміші для напилення, що містить структурно вільний карбід магнію, оптимізовано станові залежності триботехнічних та експлуатаційних факторів, встановлено раціональні

параметри детонаційно-газового напилення покриттів на основі цирконію. Удосконалено технологічний процес формування композиційних покриттів на основі цирконію; при цьому не тільки відтворено бажаний хімічний склад, але й отримана прогнозована структура.

3. Розглянуто фізичний механізм та визначено головні фактори, відповідальні за рівень термодинамічної графітизації. Вивчено характер та закономірності, що зумовлюють схильність покриттів до пасивації. Відмічено, що вона реалізується за рахунок трибохімічних процесів формування квазішаруватих полів дисперсних поверхневих шарів на основі карбідного графіту та тонкодисперсних оксидних фаз компонентів, які входять до складу покриття на основі цирконію.

4. Розроблені самозмащувальні композиційні покриття із підвищеними триботехнічними властивостями за рахунок застосування структурно вільних сполук магнію розширюють базу даних сучасного триботехнічного матеріалознавства. Самозмащувальні композиції на основі цирконію можуть застосовуватися як для зміцнення, так і для якісного відновлення зношених трибоелементів будь-якими технологічними методами, що використовують порошкові матеріали.

## References

- [1] A. Mayur, K. Makhesana and M. Patel, "Performance assessment of CaF<sub>2</sub> Solid lubricant assisted minimum quantity lubrication in turning", in *Procedsa Manufacturing*, 2019, 33, pp. 43-50, doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.04.007>
- [2] I. Justin Antonyraj, D. Lenin, Singaravelu, "Tribological characterization of various solid lubricants based copper-free brake friction materials. A comprehensive study", in *Materials Today: Proceedings*, 2020, vol. 27, part 3, pp. 2650–2656, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.11.088>.
- [3] H. M. Wang, Y. L. Yu and S. Q. Li, "Microstructure and tribological properties of laser clad CaF<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> self-lubrication wear-resistant ceramic matrix composite coating", in *Scripta Materialia*, 2002, vol. 47, issue 1, pp.57–61, doi: [https://doi.org/10.1016/S1359-6462\(02\)00086-6](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(02)00086-6)
- [4] E. A. Frolov, S. I. Kravchenko and O. V. Bondar, "On the issue of improving the operational characteristics of construction machines, equipment and technological equipment," *Collection of scientific works (construction engineering, construction), PoltNTU*, 2016, No. 1 (1), pp. 176–182. (October 14, 2024). Available: <https://reposit.nupp.edu.ua/handle/PoltNTU/2594>
- [5] S. M. Mustafayev, A. V. Sharifova and A. A. Guliev, "Research on the development of copper-graphite composition with increased graphite content," in *Progressive technologies and systems of mechanical engineering*, Issue 1, 2 (45), 2013, pp.187–191. (October 14, 2024). Available: <https://ea.donntu.edu.ua/handle/123456789/20004>
- [6] J. Paulo Davim, "Tribology for Engineers: A Practical Guide", in Elsevier Science, 2011, p.328, (October 15, 2024) Available: [https://books.google.com.ua/books?id=85RWAgAAQBAJ&pg=PA31&hl=ru&source=gbs\\_selected\\_pages&cad=1#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.ua/books?id=85RWAgAAQBAJ&pg=PA31&hl=ru&source=gbs_selected_pages&cad=1#v=onepage&q&f=false)
- [7] J. Paulo Davim, "Wear of Composite Materials", in Berlin, Boston: De Gruyter, 2018, doi: <https://doi.org/10.1515/9783110352986>
- [8] J. Paulo Davim Ed., "Tribology of Nanocomposites", in book series *Materials Forming, Machining and Tribology*, 2013, doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-33882-3>.
- [9] V. V. Shchepetov, O. V. Kharchenko and S. D. Kharchenko, "Wear-resistant protective coating," in Kyiv: Naukova Dumka, 2023, doi: <https://doi.org/10.15407/978-966-00-1812-9>.
- [10] V. P. Babak, V. V. Shchepetov, S. D. Kharchenko and S. D. Nedaiborshch, "Mathematical modeling of the formation of detonation coatings", *Technological systems*, No. 2, pp. 82–88, 2016 (Accessed October 16, 2024). Available: <http://technological-systems.com/index.php/Home/issue/view/18/showToc>.
- [11] V. P. Babak, N. M. Fialko, V. V. Shchepetov, S. D. Kharchenko, Y. M. Hladkyi and S. S. Bys, "Self-lubricating glass composite nanocoatings," *Physicochemical Mechanics of Materials*, Vol. 59, No. 1. pp. 37–43, 2023, (Accessed October 15, 2024). Available: <http://pcmm.ipm.lviv.ua/pcmm-2023-1u.pdf>.
- [12] B. I. Kostetsky et al., *Surface strength of materials under friction*, Kyiv: Tehnika, 1976.

- [13] V. P. Babak, V. V. Shchepetov and S. D. Harchenko, “Antifriction Nanocomposite Coatings that Contain Magnesium Carbide,” In *J. Journal of Friction and Wear*, Vol. 40(6), pp. 593–598, 2020, doi: <https://doi.org/10.3103/S1068366619060035> .
- [14] R. G. Mnatsakanov, O. A. Mikosianchyk, O. E. Yakobchuk and B. D. Khalmuradov, “Lubricating Properties of Boundary Films in Tribosystems under Critical Operation Conditions,” in *Journal of Manufacture and Reliability*, Vol. 50(3), pp. 229–235, 2021, doi: <https://doi.org/10.3103/s1052618821030110>.
- [15] V. P. Babak, V. V. Shchepetov, T. T. Suprun and E. Yu. Bilchuk, “Wear resistance of coatings during annihilation of endogenous extreme defects under friction conditions”, in *Technological systems*, No. 3, pp. 15–20, 2017. Available: <http://technological-systems.com/index.php/Home/article/view/53/58#>
- [16] V. P. Babak, V. V. Shchepetov, S. D. Kharchenko, S. P. Kruchinin and Stefano Bellucci, “Detonation Self-Lubricating Antifriction Glass Composition,” *Journal of Nanomaterials*, Sep. 2022, doi: <https://doi.org/10.1155/2022/1493066>.

## Tribological self-lubricating detonation coatings based on zirconium

V. V. Shchepetov<sup>1</sup> • N. M. Fialko<sup>1</sup> • S. S. Bis<sup>2</sup> • C. O. Zvorykin<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine. Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup> Khmelnytsky National University, Khmelnytsky, Ukraine

<sup>3</sup> Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine

**Abstract.** The article is devoted to the current problem of development and study of properties of highly effective antifriction coatings, the use of which provides self-lubrication due to the formation of solid lubricating oils.

The purpose of the work is related to the study of the structural-phase composition and study of tribological properties of detonation coatings of the Zr-Ti-V-Cr-Si-C-MgC<sub>2</sub> system under load conditions in the sliding velocity field.

The generalized results of theoretical and applied research according to the objectives of this work are presented. The optimum structural and phase composition of the coatings under study has been established. The technology for obtaining a powder mixture has been developed and the technological process for forming zirconium-based coatings has been improved. According to the results of the studies, it is noted that for the conditions under consideration, both the presence of a thin graphite layer and the formation of dispersed secondary structures are a means of self-regulation of the wear process. Their combined action provides modification of the friction surface and shields unacceptable seizure processes. The results of the studies have shown that the developed coatings demonstrate high and stable antifriction properties in the entire load-speed range of tests.

The proposed innovative zirconium-based coatings can be widely used to restore or strengthen parts by any methods using powder materials. The most effective application of these coatings corresponds to situations in which the use of traditional lubricating oils is undesirable.

**Keywords** detonation coating, wear intensity, structural and phase composition, graphitization, tribological properties.