

УДК 621.891:601.2

А.П. Кудрін, канд. техн. наук  
В.Ф. Лабунець, канд. техн. наук  
В.Г. Лазарєв

## ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТРУКТУРНОЇ ПРИСТОСОВУВАНОСТІ ТА СУМІСНОСТІ ТЕРТЯ ПОВЕРХОНЬ БІОЛОГІЧНИМИ МОДИФІКАТОРАМИ

НАУ, кафедра технологій відновлення авіаційної техніки, e-mail: labunets@ukr.net

*Подано результати досліджень щодо утворення захисних плівок на поверхнях тертя за допомогою мікробної біотехнології.*

### Загальна постановка проблеми та її зв'язок з науково-практичними задачами

Підвищення довговічності та зносостійкості деталей рухомих сполучень машин та їх робочих органів є одним із найбільш актуальних напрямів розвитку сучасного машинобудівництва.

У багатьох випадках вузли тертя машин та механізмів працюють під одночасним впливом зовнішніх факторів (швидкості пересування, навантаження, температури, складу середовища, вібрації, радіації та ін.), які зумовлюють розвиток нестабільних процесів тертя і призводять до небажаних явищ на робочих поверхнях. При цьому знижується зносостійкість і працездатність вузла в цілому.

В умовах нестабільного тертя може виникнути безпосереднє контактування тертьових поверхонь. Робота вузла тертя здебільшого залежатиме від здатності елементів поверхонь тертя пристосовуватись один до одного [1].

У цьому разі вирішального значення набуває структурна (фізична) пристосовуваність і сумісність поверхонь деталей у вузлах тертя.

Структурний стан робочої поверхні деталі буде визначатись не тільки хімічним складом і структурою матеріалів, але і фізико-хімічними властивостями середовища, умовами роботи, температурним режимом та ін. Різноманітність цих факторів, їх неоднозначний вплив на процеси тертя та зношування ускладнюють розробку універсальних методів захисту робочих поверхонь від зношування.

### Огляд публікацій і аналіз невирішених проблем

Питанням структурної пристосовуваності та сумісності, пов'язаним з процесами структурних змін у тонких поверхневих шарах, присвячені праці Н.А. Буше [1], Б.І. Костецького [2; 3], Л. І. Бершадського [4] та інших дослідників.

Процеси змінення структури в поверхневих шарах при терті були виділені в самостійний клас [5], а спроби утворення теоретичних основ викладені в праці [4].

Одним із найбільш важливих досягнень сучасної фізики наразі є встановлення того, що стан самоорганізації матерії у відкритих системах, до яких належить і трибосистема, є таким самим фундаментальним, як і самочинний перехід закритих систем у рівноважний стан з максимальною ентропією [6].

У процесі самоорганізації матеріали і системи подібно живим організмам протидіють зростанню ентропії, що відкриває нові резерви для науково-технічної революції. При цьому відкриваються можливості для реалізації ефектів самоорганізації в трибосистемах, що обмінюються з навколишнім середовищем речовиною, енергією і інформацією.

Стійкість явища структурної пристосовуваності зумовлена динамічною рівновагою і саморегулюванням процесів активації–пасивації та утворення екрануючої фази вторинних структур.

З погляду нерівноважної термодинаміки явище структурної пристосовуваності пов'язано з утворенням стійкої дисипативної структури потоку енергії та речовини, що спрямований у систему тертя і підтримується стаціонарними механічними впливами [2].

Перші дослідження, присвячені вивченню процесів самоорганізації під час тертя, були проведені ще в 1911 р. Це – аномальна пластичність шару Бейлбі.

У подальшому мали розвиток:

- дослідження шорсткості, що самовідтворюється незалежно від вихідної;
- формування і відтворення макрогеометрії поверхней, що зношуються;
- перерозподіл м'якої структурної складової антифрикційного матеріалу;
- виникнення вторинної гетерогенності композиційного матеріалу;
- утворення мікрогідродинамічних каньйонів;
- енергетична вигідність змішаного змащування відповідно до діаграми Герси–Шрібека;
- енергетична вигідність структури мастил при жорсткому навантаженні;

– періодичні прямі та зворотні мартенситні перетворення в поверхневих шарах сталей;

– виникнення металоорганічних трибополімерних плівок, метастабільних рідких кристалів [4];

– виникнення захисних вторинних структур, що екранують основний матеріал поверхонь тертя від безпосереднього контакту, зчеплення та інтенсивного руйнування [2].

Згідно з працею [7], умови виникнення стійких дисипативних структур, що самоорганізуються, полягає в такому:

– система термодинамічно відкрита, тобто обмінюється енергією і речовиною з середовищем;

– динамічні рівняння системи нелінійні;

– відхилення від рівноваги перевищує критичні величини;

– мікроскопічні процеси відбуваються кооперативно (синергетично).

Різноманітність і багатогранність умов зовнішнього тертя припускає можливість виникнення широкого спектру станів самоорганізованих структур, що забезпечують зносостійкість, антифрикційність і фрикційність трибосистеми [8].

Для досягнення максимальної зносостійкості в рамках явища структурної пристосовуваності необхідно використовувати засоби зменшення активації поверхневих шарів (технологію зміцнення, високоміцні матеріали, спеціальні сплави), засоби, що зменшують роботу тертя (антифрикційні матеріали, оптимальні сполучення матеріалів, змащувальні середовища), засоби регулювання пасивації (модифікуючі присадки до змащувальних середовищ і керування температурою) [2].

Пряме проглядання плівок вторинних структур на просвіт, електронографічний аналіз свідчать про ліквідацію границь зерен, блоків, дислокацій, дефектів упакування, граничного подрібнення, фрагментування й орієнтації в напрямку тертя (мінімальний розмір кристалічних областей становить 2 – 5 нм).

Збереження граничного подрібненого стану нових структур забезпечується наявністю розчиненої фази (кисню).

Кисень і вода, з'єднані в мастилі, можуть діяти як протизношувальні присадки, вступаючи в реакцію з поверхнею твердого тіла та утворюючи на ній вторинну структуру.

У праці [9] показано, що аналогічним чином діє кисень при розчиненні його в мастилі, а здатність мастил до такого розчинення дуже висока і сягає у деяких мастил п'ятидесятикратного співвідношення об'єму поглиненого газу до об'єму мастила.

У процесі механічної активації в умовах змащування на контактуючих поверхнях виникають вторинні структури, що отримали назву полімерів тертя [10].

Механічна активація робочих поверхонь здійснюється за рахунок оголення неокиснених ділянок поверхні деталі, що вступають у взаємодію зі змащувальним середовищем. При цьому відбувається розпад органічних молекул і виникнення радикалів при розриві вуглецевих зв'язків.

Далі ці радикали поєднуються в нову високомолекулярну сполуку та конденсуються на поверхні твердого тіла.

Однак, як відмічено в праці [9], захисні плівки, що виникли при трибохімічних перетвореннях звичайних вуглеводнів, незалежно від їх структури і походження, малоефективні в сполученнях, що працюють в умовах високих контактних навантажень.

Їх застосування виправдане лише в слабконавантажених, низькошвидкісних парах тертя.

Для роботи важконавантажених пар тертя використовують вуглеводневі мастильні матеріали з модифікованою молекулярною структурою, що забезпечується застосуванням різного роду присадок, які містять сірку, хлор, фосфор, бор та ін. Для сірковмісних присадок механізм дії (за Форбсом і Рейдом) оснований на тому, що в результаті хімічної взаємодії присадок з металом розриваються зв'язки S-S і утворюються меркаптиди RS-Me, які мають протиспрацьовувальну дію.

Для фосфоровмісних присадок механізм дії полягає в хемосорбції, утворенні фосфорної кислоти та її солей.

У подальшому відбувається гідроліз цих солей, що сприяє формуванню на поверхнях тертя неорганічних фосфоровмісних продуктів, що мають високу змащувальну властивість.

Наявність ненасичених зв'язків у вуглеводневих молекулах призводить до утворення міжмолекулярних зв'язків і поперечного зшивання.

Виникають складні молекулярні структури з властивостями твердого тіла, що називаються полімерами тертя [10].

Уперше подібний аналіз утворення полімероподібних плівок на поверхнях твердих тіл був проведений Хермансом і Еганом [11]. Саме вони ввели термін «полімери тертя», щоб підкреслити можливість їх утворення виключно в умовах механічної активації поверхонь твердих тіл.

Останніми роками все більшого значення в багатьох сферах науки і техніки набувають біотехнології, зокрема, мікробна біотехнологія.

Історично міждисциплінарні дослідження в галузях матеріалознавства і мікробіології були здебільшого присвячені вивченню механізмів мікробної корозії.

На сьогодні більш ніж 50% всіх корозійних пошкоджень неорганічних матеріалів пов'язано з діяльністю мікроорганізмів [12; 13].

Дослідження бактеріостійкості матеріалів показали, що мікроорганізми здатні інтенсифікувати не тільки процеси деструкції, але й епітаксіальні процеси, що супроводжуються збільшенням маси і міцності.

Так, при тривалій дії культур *Rhodococcus Sensa Stricto* на керамічні зразки спостерігалось значне (до 30%) підвищення міцності матеріалу [13].

Сучасні дослідження показали, що угруповування мікроорганізмів на поверхні твердих тіл здатні утворювати складні гетерогенні структури – біоплівки.

Це біоценотичні утворення, схильні до самоорганізації. Вони можуть містити як один вид, так і багатовидову асоціацію мікроорганізмів.

Продукти життєдіяльності таких біосистем можуть бути корисними в матеріалознавстві, зокрема, у трибології [14].

Отже, мета дослідження – з'ясувати можливість застосування мікробної біотехнології в трибологічному аспекті; визначити перспективні напрями подальших досліджень.

### Матеріали та методи

Як досліджувані матеріали були відібрані два типи газотермічних детонаційних покриттів:

- металічний (Ni, Cr, Si, B);
- оксидна кераміка ( $Al_2O_3$ ).

На поверхні покриттів було нанесено лазерне гравіювання для використання даних покриттів у поліграфічному виробництві (рис. 1, а).

На знімку добре помітні пори та оплавлені частини матеріалу.

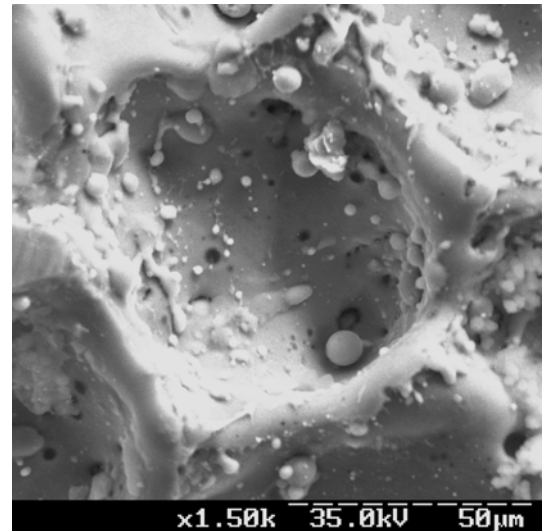
Такий вибір був зумовлений високою корозійною стійкістю матеріалів і розвиненим мікрорельєфом поверхні, який здатен був би утримувати продуковані мікроорганізмами речовини.

Модельними об'єктами в цьому експерименті були:

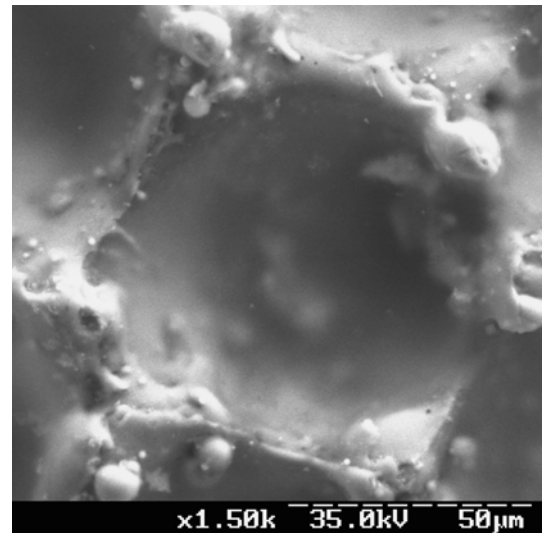
- *Thiobacillus Thioparus*, *Stenotrophomonas Maltophilia*;
- асоціація цих мікроорганізмів.

Усі зразки покриттів промивали в ацетоні та стерилізували в полум'ї газового пальника.

У тридобову культуру *Thiobacillus Thioparus*, вирощену на середовищі Бейерінка, вносили фрагменти зразків покриттів і культивували протягом 30 діб при температурі 28 °С.



а



б

Рис. 1. Лунка лазерного гравіювання: а – до експерименту; б – вкрита плівкою *Stenotrophomonas Maltophilia*

Для *Stenotrophomonas Maltophilia* готували суспензію концентрацією  $1 \cdot 10^5$  кл/мл і вносили в середовище Бейерінка, збагачене 1% мальтози. Фрагменти зразків покриттів культивували протягом 30 діб при температурі 28 °С.

Зразки експонували в асоційованій змішаній культурі *Thiobacillus Thioparus*  $1 \cdot 10^3$  кл/мл і *Stenotrophomonas Maltophilia*  $1 \cdot 10^5$  кл/мл.

Наявність і кількість бактерій контролювали методом глибинного висівання на агаризовані середовища МПА і ТСА.

Протягом експерименту відбирали проби для аналізу, здійснювали контроль рН.

Під час дослідження зразків застосовували оптичну мікроскопію, растрову електронну мікроскопію і рентгенівський мікроаналіз.

### Результати дослідження

На другу і третю добу експерименту на поверхні металічних зразків, що експонувались за наявності культури *Thiobacillus Thioparus*, виявлено кристалічні структури сферичної форми (рис. 2, 3), розміри утворень становили від 20 до 50 мкм.

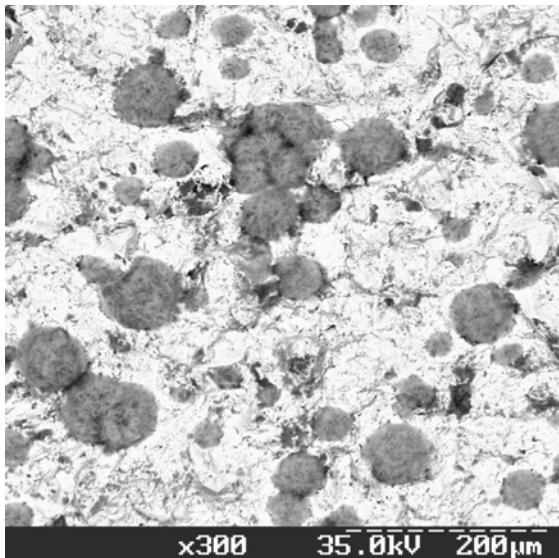


Рис. 2. Кулькоподібні утворення на поверхні матеріалу після інкубації

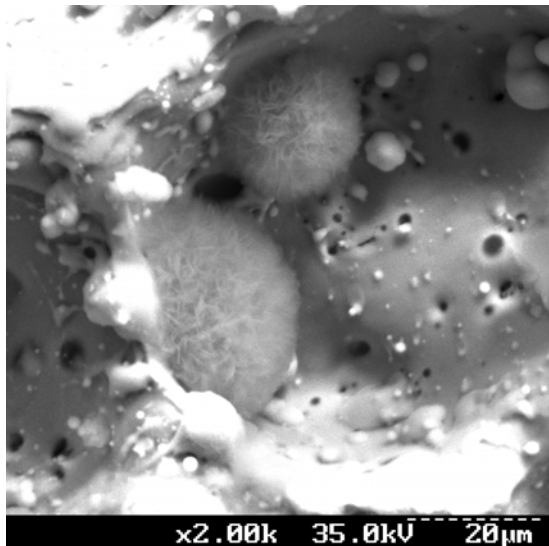


Рис. 3. Кулькоподібні кристалічні утворення в лунці лазерного гравіювання після інкубації

Такі структури спостерігалися на всій поверхні зразків часто – в лунках лазерного гравіювання. Аналіз цих кулькоподібних структур, проведений за допомогою рентгенівського спектрометра з дисперсією по енергії, показав такий склад: P – 27,14%, S – 0,89%, Cr – 6,06%, Fe – 52,59%, Ni – 13,32%.

Аналіз поверхні зразка до експерименту: Si – 2,37%, Cr – 24,32%, Fe – 5,09%, Ni – 68,21%.

Крім того, у складі поверхні зразків після експерименту спостерігали від 0,5 до 2 % сірки.

На п'яту добу інкубації кулькоподібні утворення зникли і більше не спостерігались. Їх зникнення супроводжувалося зміною рівня рН від початкового 7,5 до 6,0 на п'яту добу та 5,5 – на десяту добу експерименту.

На зразках обох типів, що експонувались за наявності культури *Stenotrophomonas Maltophilia* й асоційованої культури за участю *Stenotrophomonas Maltophilia* були виявлені гелеподібні плівки (рис. 1, б). Ці плівки легко видалялись з поверхні зразка.

Перед дослідженням хімічного складу плівки видаляли, зразки промивали етанолом, ацетоном і дистильованою водою.

Аналіз поверхні зразків, що 25 днів експонувались за наявності мікробної асоціації *Stenotrophomonas Maltophilia* та *Thiobacillus Thioparus*, показав що до складу поверхні входить 1,8% сірки.

На всіх етапах експерименту змін у хімічному складі контрольних зразків, що експонувались у стерильних середовищах, не спостерігалось.

**Напрями подальших досліджень** – провести лабораторні випробування зразків матеріалів із бактеріогенними модифікаціями в різних умовах контактної взаємодії.

### Висновок

Аналізуючи результати проведених досліджень, автори дійшли позитивного висновку щодо використання мікробної біотехнології в трибологічному матеріалознавстві та визначили напрями досліджень застосування продуктів життєдіяльності мікроорганізмів для модифікації робочих поверхонь вузла тертя.

Автори висловлюють щире подяку заступнику директора з наукової роботи Інституту мікробіології і вірусології НАН України Г.О. Іутинській і співробітникам відділу загальної ґрунтової мікробіології М.О. Протасовій, А.І. Піляшенко-Новохатному, І.П. Козловії за надану допомогу в проведенні досліджень.

### Література

1. Буше Н.А., Копытько В.В. Совместимость трущихся поверхностей. – М.: Наука, 1981. – 129 с.
2. Поверхностная прочность материалов при трении / Б.И. Костецкий, И.Г. Носовский, А.К. Караулов и др. – К.: Техніка, 1976. – 296 с.

3. *Костецкий Б.И., Натансон М.Э., Бершадский Л.И.* Механические процессы при граничном трении. – М.: Наука, 1972. – 169 с.
4. *Бершадский Л. И.* Основы теории структурной приспособляемости и переходных состояний трибосистемы и ее приложение к задачам повышения надежности зубчатых и червячных передач: Дис. д-ра техн. наук. – К.: УСХА, 1983. – 240 с.
5. *Алексеев Н.М., Буше Н.А.* Некоторые аспекты совместимости материалов при трении. III. Микропроцессы механической фрикционной приспособляемости // Трение и износ. – 1987. – Т. 8, №2. – С. 197 – 205.
6. *Гленсдорф П., Пригожин И.* Термодинамическая теория структуры устойчивости и флуктуаций. – М.: Мир, 1973. – 280 с.
7. *Костецкий Б. И.* Структурно-энергетические основы управления трением и износом в машинах. – К.: Знание, 1990. – 32 с.
8. *Костецкий Б. И.* Самоорганизация технических трибосистем // Надёжность и долговечность машин и сооружений. – К.: Наук. думка, 1989. – №15. – С. 46 – 52.
9. *Бакли Д.* Поверхностные явления при адгезии и фрикционном взаимодействии / Пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1986. – 360 с.
10. *Holm Ragnar.* Electric contacts: Theory and application. Fourth ed. – Berlin: Springer Verlag, 1967. – 320 p.
11. *Hermans H.W., Egan T.F.* The examination of electric contacts by the plastic replica method trans AIEE // Commun. Electron. – 1957. – Vol. 76, P. 1. – P. 756 – 762.
12. *Андреюк Е.И., Билай В.И., Коваль Э.З., Козлова И.А.* Микробная коррозия и её возбудители // К.: Наук. думка, 1980. – 288 с.
13. *Ившина И.Б., Рычкова М.И., Анциферов В.Н., Порозова С.Е.* Влияние актинобактерий рода *Rhodococcus Sensu Stricto* на свойства высокопористых полифазных керамических материалов // Микробиология и биотехнология XXI столетия: Материалы Междунар. конф. НАН Беларуси. – Минск.: Микробио, 2002. – С. 221 – 222.
14. *Микробная модификация поверхности материалов / А.П. Кудрин, В.Ф. Лабунец, В.Г. Лазарев и др. // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – X. – 2005. – №5/1 (17). – С. 68 – 75.*

Стаття надійшла до редакції 18.01.06.

Представлены результаты исследований по созданию защитных плёнок на поверхностях трения с помощью микробной биотехнологии.

Results of researches on creation protective films on friction surfaces with the help of microbial biotechnology are submitted.