

УДК 621.891

О. І. ДУХОТА

*Національний авіаційний університет, Україна*

### **КОНЦЕПТУАЛЬНИЙ ПІДХІД ДО СТВОРЕННЯ ПОВЕРХНЕВО-МОДИФІКОВАНИХ ШАРІВ І ЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ ПІДВИЩЕНОЇ ЗНОСОСТІЙКОСТІ**

*На основі енергетичної моделі трибосистеми та уявлень про структурно-реологічні механізми дисипації енергії і зниження напруженості поверхневих шарів у динамічно-навантаженому фрикційному контакті, сформульовано ряд структурно-реологічних принципів забезпечення підвищеної зносостійкості елементів трибосистем за умов їх малих циклічних відносних переміщень. Розглянуто напрями практичної реалізації запропонованих принципів при створенні поверхнево-модифікованих шарів і захисних покриттів.*

**Ключові слова:** *зовнішнє тертя, трибологічні системи, поверхнева модифікація, захисні покриття, зносостійкість*

**Вступ та мета роботи.** Процеси зовнішнього тертя є закономірними робочими процесами функціонування машин і механізмів. Знос і пов'язані з фрикційною взаємодією руйнування деталей обмежують ресурс, створюють об'єктивні передумови виникнення несправностей та відмов і є однією із основних причин, що викликають втрату працездатності і обумовлюють необхідність ремонту машин. За різними оцінками від 80% до 90% виходу із ладу рухомих деталей вузлів і механізмів відбувається у наслідок зношування, а втрати високорозвинених країн, пов'язані із тертям та зношуванням, досягають 8% валового національного доходу [1]. Натепер існує велика різноманітність способів поверхневого зміцнюючого впливу та способів формування покриттів трибологічного призначення, які дозволяють суттєво підвищити довговічність деталей вузлів тертя [2]. В той же час не існує єдиного підходу щодо створення технологій інженерії поверхні, здатних забезпечити необхідний комплекс триботехнічних властивостей елементів трибомеханічних систем для великої різноманітності умов експлуатації і критеріїв їх граничного стану. На практиці вирішення завдань трибологічного забезпечення довговічності і надійності деталей і елементів конструкцій машин і механізмів здійснюється емпірично-пошуковим шляхом і потребує значних матеріальних витрат та витрат часу на проведення науково-дослідних робіт, стендових та експлуатаційних випробувань. Метою даної роботи було розробка концептуального підходу до створення для умов фрикційно-контактної взаємодії малорухомих вібраційно навантажених трибостражень поверхнево-модифікованих шарів і захисних покриттів підвищеної зносостійкості.

**Результати дослідження та їх обговорення.** Аналіз результатів експериментальних та теоретичних досліджень, присвячених вивченню процесів тертя та зношування, зокрема, дослідженню процесів фрикційно-контактної взаємодії і зношування при фретингу і фретинг-корозії, вказують на складний характер структурних і фізико-хімічних перетворень, що відбуваються в зоні фрикційного контакту і які відповідають як за механізм поверхневого руйнування матеріалів трибоспряжень, так і за їх зносостійкість. Джерелом енергії для розвитку зазначених процесів є механічна енергія, що підводиться до трибосистеми від дії сил тертя, та теплова енергія від температури зовнішнього нагріву.

У загальному енергетичному балансі трибосистеми підведена механічна енергія пропорційнальна роботі сил тертя і витрачається частково на генерацію тепла, а частково поглинається і накопичується поверхневим шаром матеріалу у вигляді прихованої внутрішньої енергії. Температура зовнішнього нагріву визначає початкову внутрішню енергію матеріалів контактної пари. Реакцією трибосистеми на сумарну підведену механічну і зовнішню теплову енергію є формування рівноважного для заданих температурно-силових умов контактної взаємодії структурно-фазового та напружено-деформованого стану поверхневого шару матеріалів і сталих після визначеного періоду напрацювання триботехнічних характеристик – сили тертя та інтенсивності зношування.

Зв'язок між енергетичними параметрами трибосистеми і зносостійкістю визначається співвідношенням частки розсіюваної енергії, яка перетворюється в тепло і частки енергії, що поглинається і накопичується матеріалом у вигляді прихованої внутрішньої енергії. Теплові ефекти впливають на температуру фрикційного нагріву елементів трибосистеми, розвиток трибохімічних реакцій, формування структурно-фазового складу і властивостей поверхонь трибоконтакту. Накопичена матеріалом внутрішня енергія безпосередньо іде на розвиток процесів поверхневого руйнування і зношування. В умовах діючих динамічних контактних навантажень руйнування починається в місцях концентрації напружень після досягнення деякої критичної для даного матеріалу величини накопиченої внутрішньої енергії. Таким чином, з енергетичної точки зору підвищення зносостійкості трибосистеми може забезпечуватись:

- збільшенням частки розсіюваної і зменшенням частки накопичуваної матеріалами пари тертя внутрішньої енергії;
- підвищенням критичного рівня внутрішньої енергії, необхідного для розвитку актів руйнування матеріала (енергії руйнування);
- зниженням рівня підведеної механічної енергії.

Найбільш ефективні механізми розсіювання (дисипації) механічної енергії в трибосистемах пов'язують з механізмами розвитку трибохімічних реакцій і механізмами, що визначають розвиток дисипативних реологічних процесів та структурно-фазовими перетвореннями в зоні трибоконтакту [3, 4]. На такі трибоефекти, як акустична емісія, фотоемісія, люмінісценція, електронна емісія витрачається відносно невелика частка підведеної при терті механічної енергії [5]. Тому енергетичний баланс трибосистеми з деяким наближенням можна представити наступним рівнянням:

$$\theta_m = \theta_{xp} + \theta_p + \theta_c + \theta_n,$$

де  $\theta_m$  – підведена до трибосистеми механічна енергія;  $\theta_{xp}$  – енергія, що витрачається на трибохімічні реакції;  $\theta_p$  – енергія, що розсіюється елементами трибосистеми за рахунок дисипативних реологічних процесів;  $\theta_c$  – енергія, що витрачається на структурно-фазові перетворення;  $\theta_n$  – внутрішня енергія, накопичена матеріалом поверхневого шару.

Ефективність трибохімічних механізмів дисипації енергії визначається термодинамічними характеристиками і кінетикою розвитку реакцій хімічної взаємодії активованих центрів метала з навколишнім середовищем. Результатом цих реакцій є окиснення відокремлених від поверхні первинних продуктів зношування та утворення на поверхнях тертя пасивуючих оксидних плівок. Для більшості металів теплоти утворення оксидів (змінна ентальпії системи) і ізобарні потенціали реакцій окислення (вільна енергія Гіббса) характеризуються вкрай

від'ємними значеннями [6] і ідуть з поглинанням значної кількості тепла. Додаткову енергію можуть поглинати оксиди, що утворюються на поверхні тертя при їх пластичній течії [5] та при диспергуванні. Враховуючи високу твердість і міцність вторинних оксидних структур [7], можна очікувати, що втрата енергії на розвиток цих процесів буде значно вищою ніж для металів.

Реологічні механізми дисипації механічної енергії у фрикційному контакті пов'язують із проявом матеріалами контактної пари ефекта недосконалої пружності, який полягає у тимчасовій залежності діючих напружень від деформації. Така залежність, яку називають непружністю або в'язкопружністю, при динамічних навантаженнях викликає дисипацію підведеної механічної енергії.

У сучасній теорії реології в'язкопружного фрикційного контакту [3; 8; 9] виділяють два види реологічної дисипації: поверхневу, яка реалізуються безпосередньо в зоні фрикційного контакту в результаті імпульсної адгезійно-зсувної взаємодії мікроступів шорсткості поверхні і об'ємну, що розвивається в прилеглих до зон фактичного контакту приповерхневих об'ємах матеріала при розповсюдженні в них циклічних хвиль деформації.

Процес адгезійно-зсувної дисипації моделюється поведінкою під навантаженням реологічного тіла Фойтта. З підвищенням контактного внутрішнього тертя збільшується як потужність дисипації енергії, так і амплітуда зсувних зусиль [9]. Очевидно, що за таких умов, для кожного поєднання матеріалів контактної пари і температурно-силових умов їх фрикційного навантаження, повинен існувати певний баланс енергетичних втрат і динамічних контактних напружень, які за інших рівних умов визначаються динамічною в'язкістю фрикційного контакту.

Об'ємну дисипацію визначають, як дисипативний релаксаційний процес, що охоплює прилеглі до зон фактичного контакту об'єми матеріала. Механізми такої дисипації в умовах динамічного навантаження пов'язують з механізмами об'ємного внутрішнього тертя [10], які одночасно є механізмами релаксації динамічних напружень.

Процес в'язкопружної об'ємної дисипації при дії періодичної зсувної сили в цьому випадку моделюється реологічною моделлю Максвела. За такої умови, чим більше об'ємне внутрішнє тертя (об'ємна дисипація) тим нижче рівень діючих в приповерхневих шарах матеріала динамічних напружень. Тобто, наявність в матеріалах контактної пари ефективних джерел дисипації енергії, які працюють за механізмами об'ємного внутрішнього тертя, є одним із важливих факторів як зниження внутрішньої енергії трибосистеми, що іде на розвиток активів руйнування, так і динамічної напруженості зон фрикційного контакту [8; 9].

До окремого виду реологічних дисипативних процесів можна віднести структурну релаксацію. Один із видів такої релаксації проявляється при структурно-фазових перетвореннях в результаті яких формуються максимуми внутрішнього тертя та відбирається значна частка підведеної до трибосистеми енергії.

Необхідно сказати, що в реальних умовах всі вище розглянуті види дисипативних процесів розвиваються одночасно. Тому формування дисипативно-релаксаційних властивостей і зносостійкості трибосистеми необхідно розглядати з позиції взаємного впливу трибохімічних, реологічних і структурно-фазових механізмів дисипації. В умовах динамічного контактного навантаження розвиток цих процесів, з одного боку, зменшує рівень нагромадженної внутрішньої енергії трибосистем, з іншого, відповідає за кінетику утворення і руйнування

захисних оксидних плівок та напружено-деформований стан поверхневих шарів в зоні фрикційного контакту.

На підставі енергетичної моделі трибосистеми та уявлень про структурно-реологічні механізми дисипації енергії у трибоконтакті можна сформулювати ряд принципів створення поверхнево-модифікованих шарів і захисних покриттів підвищеної зносостійкості, алгоритм розробки і напрямки реалізації яких зображено на рис.



Рисунок. Алгоритм концепції створення поверхнево-модифікованих шарів і захисних покриттів підвищеної зносостійкості

### 1. Принцип мінімізації підведеної до трибосистеми механічної енергії.

Цей принцип передбачає насамперед зменшення фрикційного навантаження елементів трибосистеми. Найбільш простим технологічним способом реалізації цього принципу є створення мастиломістких поверхонь, здатних утримувати мастильний матеріал в зоні фрикційного контакту і забезпечувати ефективну регенерацію граничних мастильних шарів.

Для трибосистем, що працюють в умовах тертя без мащення, як спосіб реалізації цього принципу може бути застосування у складі захисних покриттів компонентів, що володіють твердомастильними властивостями та компонентів які у результаті трибохімічних реакцій здатні утворювати оксидні плівки та плівки інших хімічних сполук з низьким опором зсуву.

**2. Принцип забезпечення високої дисипативної і релаксаційної здатності елементів трибопари.** При реалізації цього принципу необхідно врахувати, що різні матеріали за різних температурно-силових режимів фрикційної взаємодії можуть проявляти різний рівень внутрішнього тертя, а отже і різну здатність

до розсіювання підведеної механічної енергії і релаксації динамічних напружень. Матеріали з високим внутрішнім тертям в умовах дії динамічних контактних навантажень, як правило, мають більш високу зносостійкість [11; 12]. Разом з цим не всі механізми внутрішнього тертя можна розглядати як фактор реологічного забезпечення зносостійкості. Так, найбільша інтенсивність дисипації механічної енергії (тепловиділення) забезпечується механізмом мікропластичного внутрішнього тертя. Водночас, через розмноження і незворотне переміщення дислокацій в процесі циклічної мікропластичної деформації в зонах фрикційного контакту будуть накопичуватися втомні пошкодження. Тобто, з реологічної точки зору висока зносостійкість може досягатись, коли матеріал поєднує високу релаксаційну здатність, яка забезпечується зворотніми непошкоджувальними механізмами внутрішнього тертя, з достатнім запасом мікропластичності. У випадку зворотності діючих механізмів дисипації, до яких відносяться більшість механізмів гістерезисного і релаксаційного внутрішнього тертя, в більш віддалених від зон фактичного контакту об'ємах матеріалу не відбувається нагромадження деформацій, а енергія коливань ефективно розсіюється, перетворюючись в тепло. Наявність в матеріалі запасу мікропластичності буде забезпечувати релаксацію динамічних напружень у найбільш навантажених зонах фрикційного контакту в режимі стабільної або слабкозгасаючої релаксаційної здатності.

З практичної точки зору для підвищення зносостійкості трибосистеми цей принцип може бути застосований при виборі матеріалів захисних покриттів з підвищеною дисипативною і релаксаційною здатністю.

**3. Принцип поєднання високої дисипативно-релаксаційної здатності і енергії руйнування елементів трибопари.** Аналіз вище поданого рівняння енергетичного балансу трибосистеми показує, що зносостійкий матеріал одночасно повинен мати і високу дисипативно-релаксаційну здатність і високий критичний рівень енергії руйнування. Не розсіяна в процесі зовнішнього тертя механічна енергія накопичується в поверхневому шарі матеріалу і при досягненні критичної для даного матеріалу величини накопиченої внутрішньої енергії починається розвиток актів поверхневого руйнування. Найбільш ефективно цей принцип можна реалізувати в композиційних структурах на металевій основі, зміцненій високо модульними твердими фазами тугоплавких сполук перехідних металів. Такі сполуки мають високу енергоємність і здатні при механічних навантаженнях поглинати значну енергію [4; 13], що в поєднанні з пластичністю і релаксаційною здатністю металевої матриці буде збільшувати критичну енергію руйнування і одночасно забезпечувати ефективне розсіювання підвищеної механічної енергії. Створення композиційних структур підвищеної зносостійкості, зокрема методами електроіскрового легування і газотермічного напилення, на сьогодні розглядається як один із перспективних напрямків триботехнічного матеріалознавства.

**4. Принцип забезпечення оптимальності напружено-деформованого стану поверхневих шарів композиційних структур.** Цей принцип хоча безпосередньо і не ґрунтується на структурно-реологічних механізмах керування зносостійкістю, але доповнює їх в частині зниження загальної навантаженості фрикційного контакту.

Одна із проблем ефективного використання функціональних можливостей композиційних структур для вирішення триботехнічних задач пов'язана з тим, що внаслідок різних значень фізико-механічних характеристик таких, як модуль пружності, теплоємність, теплопровідність, коефіцієнт лінійного розширення у

перехідній зоні між матрицею та включеннями зміцнюючої фази можуть виникати значні додаткові напруження. Величина і розподіл таких напружень піддаються регулюванню і при правильному виборі співвідношення властивостей та об'ємної концентрації складових композита можуть бути мінімізовані [14].

### **5. Принцип інтенсифікації механізмів структурної дисипації.**

Цей принцип ґрунтується на тому, що метастабільні структури, такі як, наприклад, пересичені тверді розчини металічних сплавів, отримані при гартуванні або за великої швидкості кристалізації, будучи в термодинамічному нестійкому стані, здатні ефективно розсіювати енергію тертя за механізмом структурної релаксації. Важливим фактом підтримання стабільності триботехнічних характеристик, при цьому, буде забезпечення таких умов, щоб процеси структурної релаксації мали зворотній характер або протікати в режимі слабо протікаючої структурної релаксації.

**Висновки.** Таким чином, на основі енергетичної моделі трибосистеми і аналізу структурно-реологічних механізмів дисипації енергії розроблено концепцію створення поверхнево-модифікованих шарів і захисних покриттів підвищеної зносостійкості. Для умов зношування при фретингу і фретинг-корозії запропоновано структурно-реологічні принципи керування зносостійкістю поверхневих шарів.

### **Список літератури**

1. Закалов О.В. Триботехніка і підвищення надійності машин / О.В. Закалов. – Тернопіль: ТДТУ – 2000. – 354 с.
2. Ющенко К.А. Інженерія поверхні: підручник / К.А. Ющенко, Ю.С. Борисов, В.Д. Кузнецов, В.М. Корж. – К.: Наук. Думка. – 2007. – 557 с.
3. Шевеля В. В. Трибохімія і реологія зносостійкості / В. В. Шевеля, В. П. Олександренко. – Хмельницький: ХНУ, 2006. – 278с.
4. Попов В. С. Связь между износостойкостью и энергией разрушения упрочняющей фазы сплавов // ФХММ. – 171. – №1. – С. 41–47.
5. Тейбор Д. Трение как диссипативный процесс // Трение и износ. – 1994. – Т. 15. – №2. – С. 296–315.
6. Окисление металлов. Т. 1. Теоретические основы: под. ред. Ж. Бенра. Перевод с франц. – М.: Металлургия, 1968. – 499с.
7. Костецкий Б. И. Поверхностная прочность материалов при трении / Б. И. Костецкий, И. Г. Носовский, Л. И. Бершадский. – К.: Техника, 1976. – 296с.
8. Шевеля В. В. Структурно-реологические механизмы снижения динамической напряженности и деформационного упрочнения фрикционного контакта / В. В. Шевеля, А. Терек, В. П. Олександренко, М. Швед., Ю. С. Сокол // Проблеми трибології. – 2010. - №1. – С. 6–16.
9. Шевеля В. В. Реологія в'язкоупругого фікційного контакту / В. В. Шевеля, А. Терек // Проблеми трибології. – 2010. – №4. – С. 6–16.
10. Постников В. С. Внутреннее трение в металлах. – М.: Металлургия, 1969. – 332с.
11. Шевеля В. В. Внутреннее трение как фактор износостойкой износостойкости трибосистемы / В. В. Шевеля, П. В. Назаренко, А.П.Гладченко, И. В. Шевеля // Трение и износ. – 1990. – Т. 11, №6. – С. 976–986.
12. Голего Н. Л. Фреттинг-коррозия металлов / Н. Л. Голего, А. Я. Аляб'ев, В. В. Шевеля. – К.: Техника, 1974. – 236 с.
13. Гаврилюк В. П. Трибология литейных сплавов / В. П. Гаврилюк, Е. А. Марковский, В. И. Тихонович. – К.: Типография журнала ДП “Редакция журнала “Охрана труда”, 2007. – 428с.
14. Кіндрачук М. В. Напружено-деформований стан композиційного матеріалу, навантаженого силами тертя та температурою / М. В. Кіндрачук, А. О. Корніснко, С. Ф. Федорук, О. В. Тісов // Проблеми трибології. – 2006. – №1. – С. 153–157.

Стаття надійшла до редакції 27.02.2017

O. I. DUKHOTA

## THE CONCEPTUAL APPROACH TO THE CREATION OF THE SURFACE-MODIFIED LAYERS AND PROTECTIVE COATINGS OF THE INCREASED WEAR RESISTANCE

Based on the energy model of the tribosystem and the ideas about the structure- rheological mechanisms of energy dissipation and the reduction of the tension of the surface layers in a dynamically loaded frictional contact there have been formulated a number of tribology principles of the increased durability of elements of tribosystems in small cyclic relative displacements. The directions of practical implementation of the proposed principles in the development of surface-modified layers and protective coatings were considered as well.

**Keywords:** external friction, tribological systems, surface modification, protective coatings, wear resistance

### References

1. Zakalov O.V. Trybotekhnika i pidvyshchennya nadiynosti mashyn / O.V. Zakalov. – Ter-nopil': TDTU – 2000. – 354 s.
2. Yushchenko K.A. Inzheneriya poverkhni: pidruchnyk / K.A. Yushchenko, Yu.S. Borysov, V.D. Kuznetsov, V.M. Korzh. – K.: Nauk. Dumka. – 2007. – 557 s.
3. Shevelja V. V. Trybokhimiya i reolohiya znosostykhosti / V. V. Shevelja, V. P. Oleksa-ndrenko. – Khmel'nyts'kyy: KhNU, 2006. – 278s.
4. Popov V. S. Svjaz' mezhdru iznosostojkost'ju i jenergiej razrushenija uprochnjajushhej fazy splavov // FHMM. – 171. – №1. – S. 41– 47.
5. Tejbor D. Trenie kak disipativnyj proces // Trenie i iznos. – 1994. – T. 15. – №2. – S. 296 – 315.
6. Okislenie metallov. T. 1. Teoreticheskie osnovy: pod. red. Zh. Benra. Perevod s franc. – M.: Metallurgija, 1968. – 499s.
7. Kosteckij B. I. Poverhnostnaja prochnost' materialov pri trenii / B. I. Kostec-kij, I. G. Nosovskij, L. I. Bershadskij. – K.: Tehnika, 1976. – 296s.
8. Shevelja V. V. Strukturno-reologicheskie mehanizmy snizhenija dinamicheskoy naprjazhennosti i deformacionnogo uprochnenija frikcionnogo kontakta / V. V. Shevelja., A. Terek., V. P. Oleksandrenko., M. Shved., Ju. S. Sokol // Problemi tribologiji. – 2010. - №1. – S. 6 – 16.
9. Shevelja V. V. Reolohiya vyazkoupruhoho fyktsyonnoho kontakta / V. V. Shevelja, A. Terek // Problemy trybolohiji. – 2010. – #4. – S. 6 – 16.
10. Postnikov V. S. Vnutrennee trenie v metallah. – M.: Metallurgija, 1969. – 332s.
11. Shevelja V. V. Vnutrennee trenie kak faktor iznosostojkoj iznosostojkosti tribosistemy / V. V. Shevelja., P. V. Nazarenko., A.P.Gladchenko., I. V. Shevelja // Trenie i iznos. – 1990. – T. 11, №6. – S. 976 – 986.
12. Golego N. L. Fretting-korroziya metallov / N. L. Golego, A. Ja. Aljab'ev, V. V. Shevelja. – K.: Tehnika, 1974. – 236 s.
13. Gavriljuk V. P. Tribologija litejnyh splavov / V. P. Gavriljuk, E. A. Markov-skij, V. I. Tihonovich. – K.: Tipografija zhurnala DP "Redakcija zhurnala "Ohrana tru-da", 2007. – 428s.
14. Kindrachuk M. V. Napruzhenno-deformovanny stan kompozytsijnogo materialu, navantazhenoho sylamy tertya ta temperaturoyu / M. V. Kindrachuk, A. O. Korniyenko, S. F. Fedoruk, O. V. Tisov // Problemy trybolohiji. – 2006. – #1. – S. 153 – 157.

**Духота Олександр Іванович** – канд. техн. наук, старший науковий співробітник, доцент кафедри технологій відновлення авіаційної техніки, Національний авіаційний університет, пр. Космонавта Комарова, 1, м. Київ, Україна, 03680, тел.: +38 044 406 76 70, E-mail: nila\_d@ukr.net.