

УДК 621.891

Р.М. Джус

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

## РЕОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ АВІАЦІЙНИХ ТРІБОСИСТЕМ ПРИ ЗАСТОСУВАННІ ТЕХНОЛОГІЙ ТРІБОТЕХНІЧНОГО ВІДНОВЛЕННЯ

Експериментальним шляхом отримано підтвердження безносних властивостей металокерамічних покриттів авіаційних пар тертя, які вони отримують при застосуванні технологій тріботехнічного відновлення за рахунок особливостей своєї структури.

**металокерамічне покриття, мінеральні добавки до мастил, ревіталізанти, реологічні особливості трібосполучень, безносність**

### Вступ

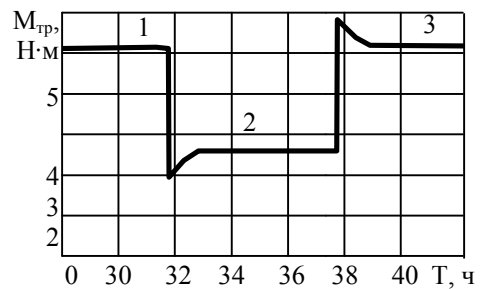
**Постановка проблеми та аналіз літератури.** Проблема надійності та довговічності конструкцій авіаційної техніки (АТ) залишається дуже актуальною у авіації всього світу. І вихід агрегатів АТ з ладу внаслідок фрикційного зносу деталей є однією з найпоширеніших. Однак у цей час тертя представляється не тільки руйнівним явищем природи. У певних умовах воно може стати творчим процесом, здатним до самоорганізації. Це дозволило розробити нові методи й способи відновлення трібосистем (ТС) машин і механізмів у процесі їхньої роботи. Останнім часом подібні безрозбірні технології ремонту й продовження ресурсу ТС за рахунок добавок мінерального походження до мастильних матеріалів (ревіталізаторів) одержали дуже широке розповсюдження.

Цей, досить новий, напрямок у техніці можна віднести до ресурсо- і енергозберігаючих технологій [1]. У процесі штатної експлуатації агрегату ревіталізанти утворюють на поверхнях тертя квазібезносне металокерамічне (МК) покриття, що захищає ТС від зношування й навіть частково відновлює зношений шар [2, 3]. Дослідження механізму тертя подібних покриттів виявили особливості їх реології. Ці особливості пояснюють унікальні властивості МК покриттів, що дозволяють їм розсіювати надлишкову механічну енергію, яка підводиться при терті [4, 5].

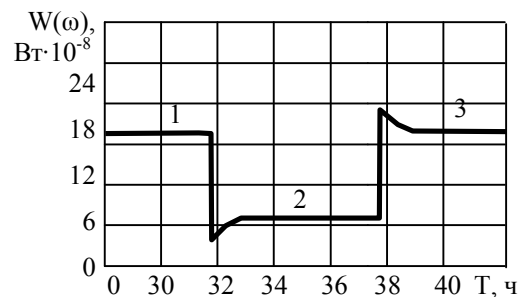
**Ціль та постановка завдання.** Зроблені раніше висновки про особливості будови, тертя й унікальних властивостей МК шару вимагають більше глибокого вивчення цього питання. Без наукового пояснення процесів, що відбуваються в ТС у присутності ревіталізаторів, неможливо застосування технологій тріботехнічного відновлення (ТТВ) у відповідальних і наукомістких галузях, таких, як авіація, космонавтика, атомна енергетика та ін. У зв'язку із цим були проведені експерименти по виявленню реакції МК покриттів на зміну зовнішніх факторів (контактного тиску при терті), а також дослідження стабільності їх особливих реологічних властивостей.

### Експериментальне підтвердження безносних властивостей і оцінка метастабільності МК покриттів

Експерименти будувалися за методикою, на встановленні, матеріалах і зразках, докладно викладених у [6]. Спочатку випробовувалася обрана пара тертя без МК покриття. Проводилося звичайне випробування на зносостійкість (на основному навантаженні, що відповідає  $\sigma_{\max}=1000\text{МПа}$ ). Після виходу пари тертя на режим сталого зношування й тривалої роботи на цьому режимі (не менш 30 годин) навантаження різко зменшувалося до  $\sigma_{\max}=600\text{МПа}$ . При цьому різко знижувався  $M_{\text{тр}}$  (рис. 1, а) і інтенсивність зношування (по величині спектральної потужності акустичної емісії (АЕ)  $W(\omega)$ ) (рис. 1, б).



а



б

Рис. 1. Зміна  $M_{\text{тр}}$  (а) і інтенсивності зношування за параметром  $W(\omega)$  (б) у звичайному ТС (без МК покриття) при зміні навантаження: 1, 3 –  $\sigma_{\max}=1000\text{МПа}$ ; 2 –  $\sigma_{\max}=600\text{МПа}$

Потім фіксувалася невелика ділянка вторинного прироблення, і після цього параметри тертя виходили на новий сталий режим, що відповідає даній величині навантаження. Після випробувань на цьому режимі протягом 3 - 5 годин, навантаження різко збільшувалося до первісного ( $\sigma_{\max}=1000\text{МПа}$ ). Параметри тертя, також після незначного перехідного періоду, знову встановлювалися на початковому значенні.

Потім цей же експеримент проводився на обраній парі тертя з нанесеним МК покриттям (рис. 2). Повторювалося її звичайне випробування на зносостійкість (на основному навантаженні, що відповідає  $\sigma_{\max}=1000\text{МПа}$ ). Після виходу пари тертя на режим «безносності» (по параметрах АЕ) і тривалої роботи на цьому режимі (не менш 30 годин) навантаження різко зменшувалося до  $\sigma_{\max}=600\text{МПа}$  (рис. 2, а).

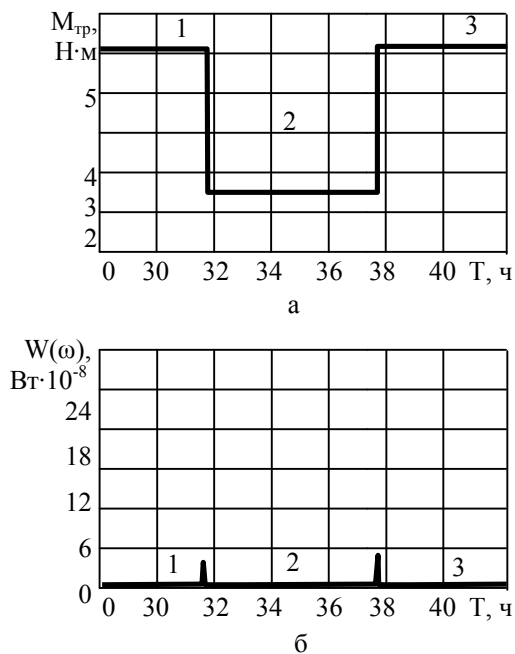


Рис. 2. Зміна  $M_{\text{тр}}$  (а) і інтенсивності зношування за параметром  $W(\omega)$  (б) у ТС із МК покриттям при зміні навантаження:

1, 3 –  $\sigma_{\max}=1000\text{МПа}$ ;  
2 –  $\sigma_{\max}=600\text{МПа}$

При цьому значення  $M_{\text{тр}}$  різко падало й залишалося на цьому рівні весь наступний час випробувань на цьому навантаженні. Перехідного процесу, що відповідає вторинному приробленню на новому режимі тертя, не спостерігалось. Параметр інтенсивності зношування (по величині  $W(\omega)$  при квантуванні за часом) (рис. 2, б), що знаходився до зміни навантаження на нульовій позначці, у момент зниження навантаження демонстрував незначний сплеск ( $\approx 6 \cdot 10^{-8}\text{Вт}$ ), що відповідає миттєвій величині зношування  $\approx 10^{-9}\text{г}$ , протягом не більше 3-5 секунд. Потім  $W(\omega)$  знову опускався на нульову відмітку, на якій і залишався увесь час роботи ТС на

цьому режимі. Після випробувань на цьому режимі протягом 3 - 5 годин, навантаження різко збільшувалося до початкового ( $\sigma_{\max}=1000\text{МПа}$ ). При цьому значення  $M_{\text{тр}}$  різко збільшувалося до первісного рівня й залишалося на цьому рівні весь наступний час випробувань на цьому навантаженні. Перехідного процесу, що відповідає вторинному приробленню на новому режимі тертя, не спостерігалось так само, як і при зниженні навантаження. Інтенсивність зношування, при цьому, знову збільшувалася. Цього разу до рівня  $\approx (8 \dots 10) \cdot 10^{-8}\text{Вт}$ , що відповідає миттєвій величині зношування  $\approx 1,5 \cdot 10^{-9}\text{г}$ . Цей перехідний процес тривав не більше 5 - 7 секунд.

При цьому значення  $M_{\text{тр}}$  у випадку зі звичайною парою тертя (без МК покриття) при різкому зниженні навантаження падає менш значно ( $\approx$  до 4,3 Н·м), чим у випадку з парою тертя із МК покриттям ( $\approx$  до 3,3 Н·м).

Ці експерименти демонструють властивості МК покриття, отриманого за допомогою застосування ревіталізаторів, миттєво перебудовувати свою внутрішню структуру при зміні зовнішніх умов відповідно до принципу максимуму надійності. Характерного для звичайних пар тертя вторинного прироблення в МК покриття не спостерігається. При зміні режиму тертя в МК шарі спостерігається локальна миттєва динамічна перебудова структури цього покриття й режиму його роботи.

У відповідності зі зробленими раніше висновками [2 - 4], ці особливі вторинні структури (ВС), здатні повністю розсіювати механічну енергію, що підводиться при терті, без її нагромадження, у випадку зміни режиму тертя змінюють частоту макрозрушуючих переміщень, ізометричних проворотів своїх окремих глобулярних ансамблів і орієнтацію блоків з метою зберегти режим максимальної дисипації енергії, що підводиться ззовні.

Металофізичні дослідження поверхонь тертя, проведені в одній і тій же крапці зразків, знятих при  $\sigma_{\max}=1000\text{МПа}$  й при  $\sigma_{\max}=600\text{МПа}$  показали, що зі збільшенням навантаження частота макрозрушуючих процесів по всьому покриттю зменшується (рис. 3). Це помітно по збільшенню відстані між характерними смугами на поверхнях тертя [4].

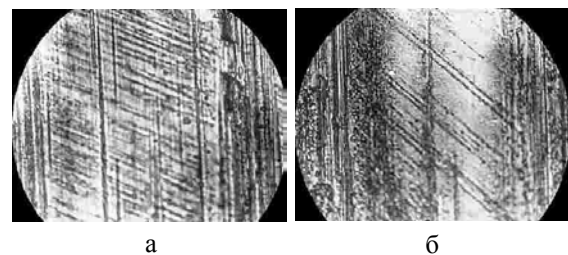


Рис. 3. Зовнішній вигляд поверхонь МК покриття при різкій зміні навантаження ( $\times 290$ ):

а –  $\sigma_{\max}=1000\text{МПа}$ ;  
б –  $\sigma_{\max}=600\text{МПа}$

Крім того, Фур'є-Аналіз розподілу елементів по електронно-графічному зображенню поверхні тертя (програма SIA 1.00), проведений у тих же крапках, показав, що при різкому зниженні навантаження відбувається також миттєва кардинальна перебудова структури МК покриття. Порівняння розмірів структурних ансамблів МК покриття на основі Фур'є-Аналізу показує, що при різкому зниженні навантаження окремі блоки структури різко укрупнюються і їхня орієнтація стосовно напрямку головних діючих напруг також змінюється стрибкоподібно (практично миттєво). При такій зміні зовнішніх умов релаксація надлишкової механічної енергії можлива за рахунок ковзання по цим, знову утвореним витягнутим, блокам МК покриття як у випадку зі звичайними ВС [4]. Тільки довгасті ансамблі МК покриття значно більше організовані. Їхня орієнтація по напрямку головних діючих напруг становить 100% у секторі 10°. Різке повернення на режим максимального навантаження викликає також миттєву перебудову структури покриття в напрямку первісної будови. Ці особливі властивості притаманні тільки структурі МК покриття й пояснюють його «квазібеззносні» характеристики. ВС звичайного ТС не проявляють істотної перебудови своєї поверхневої структури після різкої зміни зовнішнього навантаження.

Таким чином, отримане експериментальне підтвердження висновків про унікальні здатності металокерамічного покриття, зроблених на основі металофізичних і теоретичних досліджень його будови, властивостей і реологічних особливостей «роботи» при терті.

Питання про збереження унікальних реологічних властивостей покриттів, одержаних при використанні ревіталізаторів, не випадковий. Властивість метастабільності (тобто мінливості реологічних властивостей) ВС, що з'являються при терті, було помічено й досліджене давно [7]. Тому логічно було припустити, що такий особливий і складні ВС, як МК шар, теж втрачають свої унікальні властивості, що проявляються при терті, із плином тривалого часу після припинення роботи ТС. У зв'язку із цим, був спланований експеримент, що дозволив дослідити це питання. В експерименті брали участь три партії роликів. Одні були із МК покриттям, нанесеним безпосередньо перед експериментом, другі з покриттям, нанесеним за 10 днів перед цим, а треті – з покриттям, нанесеним на їхню поверхню за місяць до проведення цього експерименту й не брали участь у терті з тих пор. На етапі сталого «беззносного» тертя ( $M_{тр} = \text{const}$ ,  $T = \text{const}$ ) масло з мастильної ванни відсмоктувалося. Подальший експеримент тривав до задиру при змащуванні роликів маслом, що залишилося на їхніх робочих поверхнях у результаті змочування. При цьому фіксувалася зміна

моменту тертя, температури зразка й час до настання задиру (рис. 4). Порівняння часу від моменту відбору масла до моменту настання задиру на зразках у всіх трьох випадках дозволило судити про метастабільність МК покриття.

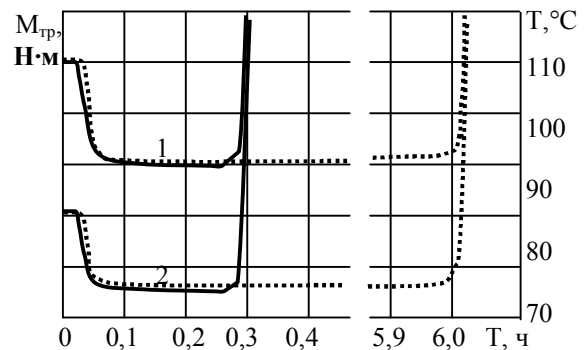


Рис. 4. Стійкість до задиру МК покриття:  
 — TC із МК покриттям після більш ніж 30-денного простою: 1 –  $M_{тр}$ , Н·м; 2 –  $T$ , °С;  
 ..... TC із МК покриттям після не більш ніж 10-денного простою: 1 –  $M_{тр}$ , Н·м; 2 –  $T$ , °С

Результатом випробувань зразків із МК покриттям, нанесеним на їхню поверхню за місяць до проведення цього експерименту і які не брали участь у терті з тих пір, став швидкий задр зразків після відбору масла (18-20 хвилин). Час до задиру зразків із МК покриттям, що було нанесено на поверхню за 10 днів до експерименту дорівнювало часу до задиру зразків з покриттям, нанесеним безпосередньо перед цим. Воно склало 6 годин. Таким чином, у межах десятиденного «віку» метастабільних властивостей покриття не проявляє. Низька стійкість до задиру МК покриття, що давно не «працювало», свідчить про певну метастабільність цієї структури.

Стійкість покриття до циклічних навантажень обумовлена знаходженням певної частини цієї речовини на міжфазних границях силілів і інших армуючих часток в аморфній фазі [4]. Тому таке метастабільне поведіння покриття після тривалого простою викликано процесами надлишкової кристалізації аморфного при терті металосилікату на границях між окремими частками армуючої фази, що виникають безпосередньо при утворенні покриття й знижують їхню рухливість.

Цей процес термодинамічно обґрунтований у роботах [8 – 10].

Було припущено, що механохімічна активація при порівняно невисоких контактних напругах (не більше 500 МПа) може відновити вихідний стан і, відповідно, реологічні властивості МК шару в контактній області. Для перевірки цієї гіпотези зразки з нанесеним на них покриттям після 30-денного простою активувалися подібним чином на протязі 20 хв. При цьому швидкість навантаження до напруги

500Мпа не перевищувала 100Мпа/хв. Наступні повторні випробування цих зразків показали відновлення експлуатаційних властивостей покриття до вихідних. Час до задиру при цьому відповідало експерименту зі «свіжим» МК покриттям (близько 6 годин).

Низька стійкість до задиру МК покриття, що давно не «працювало» й можливість відновлення його експлуатаційних властивостей дозволяє давати певні технологічні рекомендації як по способу обробки агрегатів ревіталізаторами, так і по експлуатації їх після застосування цих технологій. З огляду на реальні умови експлуатації більшості моделей ТС, властивість метастабільності МК покриття не можна вважати дуже серйозним недоліком подібних технологій. А зроблені, з урахуванням цієї властивості, рекомендації із застосування ревіталізаторів не можна визнати суперечним звичайним інструкціям для експлуатації більшості видів техніки. Полегшений режим роботи агрегату після пуску необхідний і для звичайних ТС (без МК шару), що пояснюється процесами вторинного приробляння «класичних» ВС.

На жаль, висока вартість і тривалість подібних експериментів не дозволили точно визначити час збереження МК покриттям своїх безносних властивостей при перерві в роботі ТС. Не ставлячи це метою даної роботи, подібні дослідження обов'язково будуть продовжені в майбутньому.

### Висновки

Таким чином, проведені дослідження дозволили підтвердити унікальні особливості МК покриттів, що утворюються в ТС АТ при використанні ревіталізаторів.

Установлено здатність цих покриттів миттєво реагувати на зміну зовнішніх факторів тертя з метою збереження максимуму надійності ТС, що дозволяє МК шару здійснювати процес розсіювання механічної енергії, що підводиться при терті без зношування основного матеріалу ТС.

Все це дозволяє рекомендувати використання технологій трібовідновлення для продовження ресурсу й безрозбірного ремонту вузлів тертя як авіаційної техніки, так і будь-яких інших ТС, у яких можливе застосування ревіталізаторів.

### Список літератури

1. Энергетика бессервисных систем / И.А. Кравец, В.В. Щепетов, С.Л. Максимов, Я.Н. Гладкий // Проблемы трибологии. – 2002. – №2. – С. 12-14.
2. Опис. изобр. к пат. РФ: RU 2135638 C1, 6 С 23 С 26/00, С 10 М 125/00. Способ образования защитного покрытия, избирательно компенсирующего износ поверхностей трения и контакта деталей машин. Никитин И.В. 26.11.98. – 10 с.
3. Опис до пат. на винахід: UA 24442 А, С 23 С 26/00, С 10 М 125/40. Спосіб безрозбірного відновлення тертьових сполучень. Агафонов А.К. (RU), Аратський П.Б. (RU), Бахматов С.І. (RU), Гамідов Е.А. (RU), Нікітін І.В. (RU), Слободянюк А.А. 17.07.98. – 10 с.
4. Стадниченко В.Н., Стадниченко Н.Г., Джус Р.Н., Трошин О.Н. Об образовании и функционировании МК покрытия, полученного с помощью ревитализантов // Вестник науки и техники – Х.: ХДНТ и НТУ “ХПИ”. – 2004. – Вып. 1(16). – С. 18-27.
5. Аратский П.Б., Капсаров А.Г. Сравнительные исследования влияния присадок к смазочным маслам на показатели трения и износа узлов ДВС // Двигателестроение. – 1999. – №2. – С. 30-31.
6. Джус Р.М., Стадниченко В.М., Стадниченко М.Г. Пристрій для беззупинної реєстрації динаміки зміни геометрії зразків при випробуваннях на тертя і знос // Вісник НТУ “ХПИ”. Зб. наук. пр. Темат. вип.: Динаміка і міцність машин. – Х.: НТУ “ХПИ”. – 2003. – Т.1, №12. – С. 58-64.
7. Костецкий Б.И. Трение, смазка и износ в машинах. – К.: Техника, 1970. – 263 с.
8. Машков Ю.К., Мамаев О.А., Суриков В.И. Структурно-энергетическая самоорганизация в процессах синтеза и трения композитов на основе политетрафторэтилена // Трение и износ. – 2002. – Т.23, №6. – С. 661-666.
9. Машков Ю.К. Влияние температуры на структуру и триботехнические свойства наполненного политетрафторэтилена // Трение и износ. – 1997. – Т.18, №1. – С. 108-113.
10. Охлопкова А.А., Виноградов А.В. Полимерные композиционные материалы триботехнического назначения на основе политетрафторэтилена и ультрадисперсных керамик // Трение и износ. – 2002. – Т.23, №6. – С. 653-660.

Надійшла до редколегії 4.04.2007

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.А. Войтов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.