

характеристик проводиться на основі рівняння витрати газу через всі елементи турбіни при їхній спільній роботі з використанням необхідних для розрахунку параметрів потоку:

$$m_i \frac{P_{\Gamma_i}^* \sigma_{ca_i} \bar{G}_{ca_i}}{\sqrt{\frac{2k_i}{k_i+1} R_i T_{ca_i}^*}} F_{ca_i} q(\lambda_{ca_i}) = m_i \frac{P_{w_{2i}}^* \sigma_{pk_i} \bar{G}_{pk_i}}{\sqrt{\frac{2k_i}{k_i+1} R_i T_{w_{2i}}^*}} F_{pk_i} q(\lambda_{pk_i});$$

$$m_i \frac{P_{w_{1i}}^* \sigma_{pk_i} \bar{G}_{pk_i}}{\sqrt{\frac{2k_i}{k_i+1} R_i T_{w_{2i}}^*}} F_{pk_i} q(\lambda_{pk_i}) = m_{i+1} \frac{P_{\Gamma_{i+1}}^* \sigma_{ca_{i+1}} \bar{G}_{ca_{i+1}}}{\sqrt{\frac{2k_{i+1}}{k_{i+1}+1} R_{i+1} T_{ca_{i+1}}^*}} F_{ca_{i+1}} q(\lambda_{ca_{i+1}}),$$

де  $m_i$  – постійні коефіцієнти;  $P_{\Gamma_i}^*$  – повний тиск в абсолютному русі;  $\sigma_{ca}, \sigma_{pk}$  – коефіцієнти збереження повного тиску;  $P_w^*$  – повні тиски у відносному русі;  $\bar{G}_{ca}, \bar{G}_{pk}$  – відношення витрати на вході в турбіну до витрати в даному перетині;  $F_{ca}, F_{pk}$  – площі прохідних перетинів;  $q(\lambda_{ca}), q(\lambda_{pk})$  – відносні густини струму;  $T_{ca_i}^*, T_{w_{2i}}^*$  – повні температури газу в абсолютному і відносному рухах.

Таким чином, сучасні методики діагностування, що використовують явні математичні моделі, повинні враховувати як експлуатаційні фактори так і фонові несправності елементів проточної частини газотурбінного двигуна.

#### Список літератури

1. Иванов Н.А., Купчик Г.Я. Характеристики авиационных газотурбинных двигателей: Учеб. пособие. – К.: КИИГА, 1987. – 84 с.
2. Хейфец М.И. Обработка результатов испытаний: Алгоритмы, номограммы, таблицы. – М.: Машиностроение, 1988. – 168 с.
3. Чистяков П.Г. Точность систем автоматического регулирования ЖРД и ТРД. – М.: Машиностроение, 1977. – 160 с.

Стаття надійшла до редакції 14.09.01.

656 052-960.171 + К 863.07  
УДК 621.981+621.762

В.В. Щепетов, С.Ю. Євсюков, В.Ю. Громенко

#### ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ МОЖЛИВОСТІ ПОКРИТТІВ ПРИ ПІДВИЩЕННІ ДОВГОВІЧНОСТІ ДЕТАЛЕЙ АВІАЦІЙНОЇ ТЕХНІКИ

*Показано, що прямі та обернені поліморфні перетворення обумовлюють стан наклепу, що супроводжується зміною поверхневої міцності.*

Авіаційна техніка як об'єкт експлуатації є складним інженерним комплексом, працездатність якого залежить від безвідмовності функціонування рухомих з'єднань, що складаються з різних за призначенням і конструкцією триботехнічних пар. За всією різноманітністю конструктивних форм та функціональних особливостей вимоги зносостійкості є спільним параметром, що визначає їхню безвідмовність та експлуатаційну довговічність.

Згідно з сучасними досягненнями науки триботехнічні показники, що характеризують контактну взаємодію в умовах зносу, визначаються не стільки об'ємно-структурними властивостями, скільки станом поверхневих шарів [1]. У загальному комплексі методів, що направлені на подовження ресурсу деталей авіаційної техніки, важливе значення має поверхневе зміцнення.

Дослідження поверхневих шарів, в яких протікають процеси трибоактивування, що впливають на інтенсивність окиснення та скріплювання, проводилися за допомогою сучасних методів фізичного аналізу [2].

Як відомо, зовнішній вплив, що обумовлює надлишкову енергію активації, зумовлює деструкцію матеріалів деталей, що взаємодіють, однак процес не є миттєвим. Скріплюванню передує розвиток на різних масштабних рівнях структурних недосконалостей у вигляді дислокаційних ансамблів, мікропор, тріщин як в напружених тонкоплівкових вторинних структурах, так і в контактних поверхнях, що в подальшому призводить до їх руйнування, обумовленого пластичною деформацією.

При цьому контактну зону, в якій протікають процеси структурно-термічної активації, прийнято розподіляти на декілька структурних рівней [3], які взаємодіють при терті в різних ієрархічних шарах: приповерхневий, що відображає мікроскопічний рівень і виявляє себе в формуванні дисипативних вторинних структур різної природи, та поверхневий, відображаючий явища на макрорівні і визначаючий поведінку безпосередньо в умовах пружнопластичної деформації, руйнування та утворення частинок зносу. Очевидно, різноманітні форми пошкоджуваності визначаються переважно процесами, які проходять на макрорівні, що дозволяє розглядати зношення поверхневого шару як основний процес, що визначає зносостійкість. Важливого значення при цьому набуває еволюція мікроструктури, що обумовлює структурні та фазові зміни, а отже, і визначає властивості.

Фізична природа критичних точок (температур), при яких відбувається зміння структури внаслідок фазових перетворень, досліджувалася неодноразово. Однак дотепер не запропонована модель, яка б задовільно описувала на атомному рівні утворення і розпад  $\gamma - \text{Fe}$ . Відповідно до сучасних уявлень фазові перетворення розділяють за концентраційною ознакою на дифузійні та бездифузійні, а за характером перебудови кристалічних ґрат при утворенні нових фаз – на зсувні та флуктуаційні. Однак уявлення, що склалися, потребують деяких уточнень.

Кооперативний характер атомних зміщень є фундаментальною особливістю перебудови ґрат при фазових перетвореннях в твердому стані. Механізм фазових перетворень викликає зміни, причина яких обумовлена тим, що простір, який займає атом одного й того ж елемента в різних фазах, що задіяні в перетвореннях, різний. Так, атомні об'єми  $\alpha$ -,  $\gamma$ - і  $\varepsilon$ -фаз становлять відповідно  $V_\alpha = 1.22 \cdot 10^{-2}$ ,  $V_\gamma = 1.21 \cdot 10^{-2}$  і  $V_\varepsilon = 1.15 \cdot 10^{-2} \text{ Н}\cdot\text{м}^{-3}$ , що викликає зміни питомого об'єму при  $\alpha \leftrightarrow \gamma \sim 1\%$ , а при  $\alpha \leftrightarrow \varepsilon \leftrightarrow \gamma \sim 6\%$ . Відмінність атомних об'ємів, що задіяні в перетворенні фаз, наявність когерентного зв'язку обумовлює викривлення кристалічних ґрат, розмиття рефлексів  $\alpha$ -,  $\gamma$ - і  $\varepsilon$ -фаз.

Отже, наслідком перебудови при переході з однієї кристалічної модифікації в іншу при певних термодинамічних параметрах, які виникають при терті, є зміни об'ємів, що викликає місцеві концентрації напружень в зоні сполучення існуючої та заново утвореної фаз, тобто характерна особливість фазових переходів (першого рода) – стрибкоподібне зміння питомого об'єму. Розширення кожного елементарного об'єму в момент перетворення зустрічає опір прилеглих структур і в результаті механічної взаємодії утворюваних нових кристалічних форм ( $\alpha$ -Fe) з оточуючою матрицею ( $\gamma$ -Fe) викликає пружну, а потім і пластичну деформацію. Структурні наслідки при деформації від зовнішньої сили та фазовому перетворенні подібні і супроводжуються значним збільшенням щільності дислокацій і зменшенням розмірів блоків до  $10^{-5} - 10^{-6}$  см. Таким чином, фазові перетворення супроводжуються об'ємними перерозподілами, які обумовлюють локальну деформацію і є однією з причин зміння поверхневої міцності покриттів в умовах експлуатації.

На основі експериментальних результатів, виходячи з можливих варіантів взаємодії температурного та механічного полів із субструктурою поверхневого шару, можна в загальному випадку розглядати як один з найбільш вирогідних процесів, що впливають на структурні

зміни при терті, поліморфне перетворення, яке за своєю природою суттєво сприяє підвищенню щільності недосконалостей кристалічної будови.

З поліморфізмом пов'язане різке підсилення дифузії, що вперше було виявлене на матеріалі  $\beta$ -Zr в роботі [4]. Багатьма дослідниками відмічено, що при терті під впливом пружнопластичної деформації і підвищенні температури в місцях контакту дифузійні процеси інтенсифікуються. При цьому коефіцієнт дифузії збільшується на декілька порядків. В результаті фазового наклепу на ділянках фактичного контакту, який можна розглядати як джерело додаткової теплової енергії, виникає велика та нерівноважна концентрація дислокаційних атомів і вакансій, що викликає аномальне посилення дифузійних процесів, при цьому протікання поліморфних перетворень прискорює і сприяє дифузії практично всіх елементів, що знаходяться в контактній зоні, і фіксується за оцінкою структурного стану та ступенем насиченості елементами, що дифундують в поверхневий шар.

Безумовний інтерес викликають питання практичного використання явищ поліморфних переходів для керування процесами тертя та зношування, їх вплив на розширення області структурної пристосовуваності. В цьому відношенні структурні фазові переходи являють собою велику і ще не завершену область випробувань, в результаті яких перевага надається адекватним моделям, що дозволяють досліджувати якісну сторону питання, а не кількісним розрахункам, які ґрунтуються на конкретних фактах.

Покриття ВК-15 являють собою класичну структуру антифрикційного матеріалу. Багато матеріалів використовується з подібною структурою, однак оптимальну щодо зносостійкості композицію карбід вольфраму створює з кобальтом.

Випробування триботехнічних характеристик покриттів типу ВК показали їхню високу працездатність до температур, близьких до  $500^{\circ}\text{C}$ . Подальше підвищення температури викликає інтенсивне розм'якшення кобальтової зв'язки, окиснення карбіда вольфраму і різке зростання енергії термічної активації. При цьому активного розвитку набуває процес зношування, що призводить до пошкоджуваності.

Покриття ВК за фазовим складом відповідають бінарній системі, основні компоненти якої при оптимальному напиленні являють собою монокарбід вольфраму і кобальт.

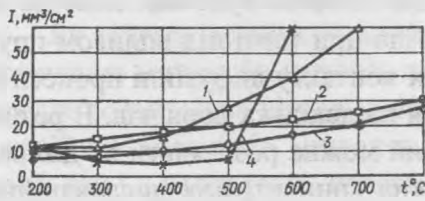
Кобальт до температури  $420^{\circ}\text{C}$  має грати гексагональні щільно упаковані ( $\alpha$ -Co). При підвищенні температури внаслідок модифікування утворюються гранецентровані кубічні грати, що відповідає  $\beta$ -Co. В роботі [5] відмічається різке посилення активаційних процесів та перехід від нормального механічного зносу до скріплювання після поліморфних перетворень  $\alpha$ -Co і  $\beta$ -Co при відповідному змінненні гексагональних щільно упакованих грат на гранецентровані кубічні. Теоретичне обґрунтування та експериментальне підтвердження цього факту, що відображує правомірність дислокаційно-вакансійної моделі, викладені в роботах [1; 3; 5].

Однак на основі теорії легування гранична температура експлуатації покриттів типу ВК може бути підвищена за рахунок введення легуючих елементів, які затримують поліморфні перетворення кобальту через те, що при високотемпературному терті покриттів ВК, розвитку деструктивних активуючих процесів сприяє поліморфне перетворення кобальту, який використовується як матеріал зв'язки.

Як легувальні домішки, що підвищують температуру поліморфного перетворення кобальту, на основі експериментальних досліджень було обрано молібден та кремній в кількостях відповідно 32% Mo і 15% Si. Твердофазна реакція взаємодії компонентів здійснювалася термодифузійним методом з подальшим розмелом до порошкових фракцій і утворенням їх змішуванням механічної суміші.

Важливими характеристиками детонаційних покриттів, що напилені порошками карбіду вольфраму і легovanого кобальту, виявилися дрібнокристалічна будова, яка обумовлена швидким охолодженням зі швидкістю приблизно  $10^5$  град/с, та відносна фазова однорідність, про що свідчить практично постійна мікротвердість (приблизно 16 000 МПа).

Структурно напилені механічною сумішшю порошків карбіду вольфраму і легованого кобальту покриття складаються значною мірою з монокарбіду вольфраму  $\alpha$ -WC, твердого



Залежність інтенсивності зношування від температури покриттів: 1 – на основі Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 2 – типу ВК з легованою кобальтовою зв'язкою; 3 – на основі нікелю; 4 – типу ВК-15

розчину Mo і Si в  $\alpha$ -Co, а також деякої частини інтерметалідів Mo<sub>5</sub>CO<sub>7</sub>, Co<sub>2</sub>Si, незначної кількості напівкарбіду вольфраму типу W<sub>2</sub>C. Дані випробувань, що визначають функціональну залежність інтенсивності зношування від температури поблизу поверхні тертя детонаційних покриттів, що досліджувалися, наведені на рисунку.

Найменші значення інтенсивності зношуваності при даних умовах випробувань мають покриття на основі нікелю і карбіду вольфраму з легованим кобальтом.

В умовах підвищених температур та через високоенергетичний вплив на активованих поверхнях тертя покриттів відбувається твердофазна взаємодія, що реалізує кілька груп реакцій пасивації, наслідком яких є утворення гетерофазних оксидних плівок і перебудова поверхневих шарів, що відповідає більш стійкому структурному стану.

Отже, результати експериментальних досліджень свідчать, що механізм змінення структурно-фазового складу поверхневих шарів при терті значно різноманітніше і складніше, ніж прийнято вважати, і є визначальним фактором, що забезпечує їх експлуатаційні можливості в екстремальних умовах.

#### Список літератури

1. *Поверхностная прочность материалов при трении* /Б.И. Костецкий, И.Г. Носовский, А.К. Караулов и др. –К.: Техніка, 1986. – 296 с.
2. *Черепин В.Т., Васильев М.А. Методы и приборы для анализа поверхностей материалов.* – К.: Наук. думка, 1982. – 398 с.
3. *Физика износостойкости поверхности металлов* // Под ред. В.И. Владимирова. –Л.: ФТИ, 1988. – 230 с.
4. *Гринфельд М.А. Фазовые переходы первого рода в нелинейноупругих материалах*// Механика твердого тела. – АН СССР. – 1982. – № 1. – С. 99–109.
5. *Носовский И.Г., Исаев Э.В. Влияние типа решетки, температуры и скорости скольжения на процесс схватывания*// Проблемы трения и изнашивания. – К.: Техніка, 1973. – № 6. – С. 73–78.

Стаття надійшла до редакції 06.07.01.

ББК 053.41 20-042.2 - 016  
УДК 629.735.03

В.В. Панін, М.В. Купчик

#### АНАЛІТИЧНЕ ВІДОБРАЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПРЕСОРІВ АВІАЦІЙНИХ ТУРБОГВИНТОВИХ ДВИГУНІВ

*Наведено методику визначення характеристик компресора авіаційного турбогвинтового двигуна при математичному моделюванні його дросельних та висотно-швидкісних характеристик. Методика розроблена на прикладі компресора двигуна типу АИ-24.*

Процес розрахунку робочого процесу авіаційних двигунів неможливий без використання характеристик його основних елементів і зокрема компресора. Характеристиками компресора називають залежності ступеня підвищення тиску  $\pi_c^*$  і коефіцієнта корисної дії  $\eta_c^*$  від параметра витрати повітря [1; 2]. Як такий параметр частіше за інші використовують зведену до умов стандартної атмосфери витрату повітря: