УДК 621.822.6:620.194

О. І. ДУХОТА

Національний авіаційний університет, Україна

ЕВОЛЮЦІЙНА МОДЕЛЬ ТРИБОСИСТЕМИ ТА ЗАГАЛЬНІ ПРИНЦИПИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ МАТЕРІАЛІВ В УМОВАХ ВИСОКОТКМПЕРАТУРНОГО ФРЕТИНГА

Розглянуто особливості розвитку трибологічних процесів і зношування матеріалів в умовах високотемпературного фретинга. Подано еволюційну модель трибо системи, яка відображає зміну їх стану на різних стадіях розвитку високотемпературного фретинга. Визначені принципи забезпечення високотемпературної фретингостійкості матеріалів.

Ключові слова: *високотемпературний фретинг, трибологічні процеси, закономірності зношування, модель трибосистеми, зносостійкість.*

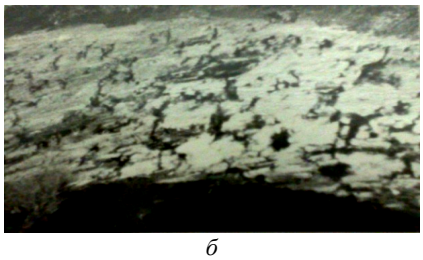
Вступ. У загальній проблематиці забезпечення надійності авіаційних трибосистем велике значення надається підвищенню зносостійкості контактних поверхонь деталей гарячої частини газотурбінних двигунів. Як свідчить аналіз зношування таких деталей відбувається переважно в результаті розвитку процесів високотемпературного фретинга.

Натепер, стосовно до всієї різноманітності жароміцних матеріалів та великої кількості діючих на трибосистеми зовнішніх чинників достатньо повного уявлення про механізм і перебіг процесів зношування в умовах високотемпературного фретинга не склалось. Фактор впливу температури на процеси тертя та зношування при цьому розглядається з позиції інтенсифікації деформаційних та дифузійних процесів, структурно-термічної активації реакцій триокиснення, адгезійної взаємодії, ефектів структурної і субструктурної релаксації, алотропічних, структурних та фазових перетворень поверхневих шарів матеріалу в зоні трибоконтакту [1–4]. Провідну роль у забезпеченні зносостійкості матеріалів при підвищених температурах відіграють процеси, розвиток яких визначає утворення і стійкість оксидних плівок на поверхнях контакту. Вважається, що за певних температур і умов віброконтактного навантаження вторинні оксидні плівки, які утворюються в результаті термічного- і трибоактивованого окислення, виконують роль екрануючого, захисного шару, який запобігає схопленню, знижує тертя і рівень динамічних навантажень в зонах фрикційного контакту. Триботехнічні властивості і захисна здатність оксидних плівок визначається як самою їх природою, так і несучою здатністю когерентно зв’язаного з оксидною плівкою підшарку матеріалу основи [1]. Очевидно, що за таких умов для визначення принципів забезпечення зносостійкості матеріалів в умовах високотемпературного фретинга фізичну модель трибосистеми необхідно розглядати з позиції взаємного впливу температури та процесів фрикційно-контактної взаємодії на трансформацію структури, властивостей і механізмів розвитку поверхневого руйнування матеріалів. Температурна залежність величини зносу, при цьому, буде визначатись як вихідними властивостями матеріалів контактної пари, так і набутими властивостями поверхневих шарів в результаті дії на трибосистему деформаційних, термічних і окиснювальних процесів.

Модель еволюції стану трибоситеми в умовах високотемпературного фретинга та її аналіз: з урахуванням дискретності поверхонь контакту структуру

цес охоплює площу свіжеутворених елементарних поверхонь контакту і контролюється механізмами звичайних хімічних реакцій. Одночасно об'єми метала, прилеглі до зон фактичного контакту, зазнають передеформування від контактного циклічного навантаження. При накопиченні критичної щільності дефектів структури поверхневі шари металу набувають аномально високу дифузійну і реакційну активність, що пов'язують з ефектом структурно-механічної активації [7; 8]. Суттєву роль в формуванні на поверхні трибоконтакту оксидних плівок відіграють також процеси термічної активації від фрикційного нагріву і зовнішньої робочої температури трибовузла. При цьому, як доведено результатами прямих експериментальних досліджень [9], при поєднанні механізмів структурно- механічної і термічної активації спостерігається багаторазове підвищення дифузійної активності металів, а за певних умов виникають ефекти наддифузії.

Таким чином, можна сказати, що в умовах високотемпературного фретинга кінетика процесу формування захисного оксидного прошарку буде визначатись не стільки схильністю металу до термічного окислення, скільки набутою в процесі структурно-термічної активації його хімічною і дифузійною активністю. Закономірно очікувати, що з підвищенням температури константи процесів дифузії і константи рівноваги хімічних реакцій взаємодії металів з киснем будуть змішуватись в бік пришвидшення процесів утворення і розповсюдження на поверхнях трибоконтакту фронту оксидних плівок. Як наочний доказовий приклад такого впливу температури на формування оксидних плівок на рис. 3 наведені знімки поверхні доріжок тертя зразків титанового сплава ВТ8 які піддавались фретингу за однакових умов віброконтактного навантаження і різних температурах зовнішнього нагріву.



а *б*

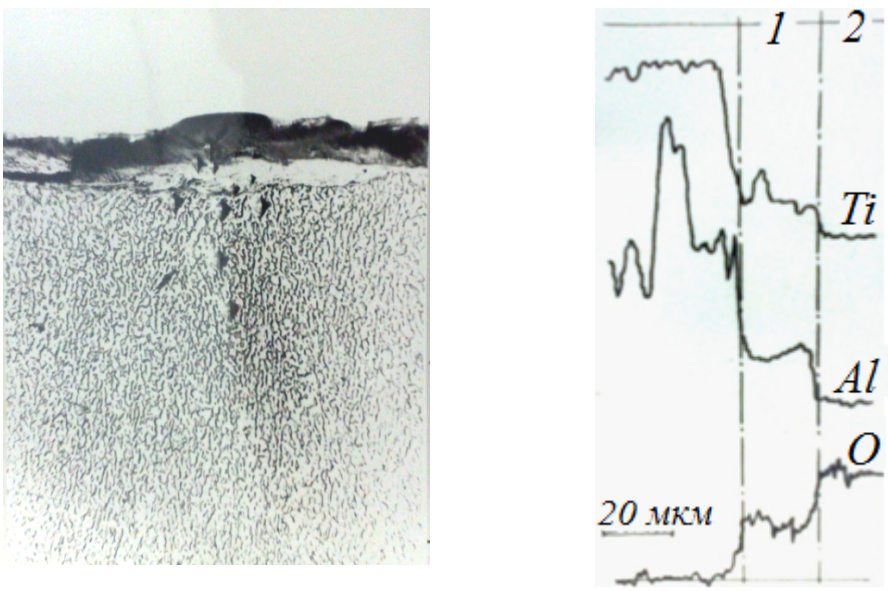
в

Рис. 3. Топографії контактної поверхні зразків сплаву ВТ8 після випробування на фретинг-зношування при температурах 473 К (*а*), 673 К (*б*) і 773К (*в*): P = 19,6МПа; A = 125 мкм; υ = 25 Гц; N = 5×105 цикл. Пари однойменні.

Представлені знімки наглядно свідчать, що на відміну від поверхні, сформованої при температурі 473 К, поверхня трибоконтакту, сформована при температурах 673К і 773 К, покрита практично суцільним шаром оксидної плівки. Результати металографічного і мікрорентгеноспектрального аналізу показали, що структура оксидних плівок, які формуються в процесі фретинга на поверхні ти-

танових сплавів в робочому діапазоні температур характеризується двофазною двошаровою морфологічною будовою з двома послідовно розташованими на поверхні металу шарами оксидних фаз і практично відсутньою перехідною дифузійною зоною твердого розчину кисню в матеріалі основи (рис. 4, *а*, *б*).

Із аналізу розподілу елементів в зоні трибоконтакта можна стверджувати, що в процесі формування оксидної плівки приймають участь в основному титан, кисень, і частково алюміній. Оцінка за інтенсивністю Kα- випромінювання концентраційних співвідношень елементів в оксидних фазах і їх мікротвердості дозволяють припустити, що зовнішній оксидний шар представляє собою оксид титану, близький за складом до TiO_2, а внутрішній до TiO. Послідовне розташування в оксидній плівці вищого оксида над нижчим, паралельність оксидних шарів поверхні поділу фаз свідчить, що фронт реакцій окислення розташований у внутрішній її частині. В цьому випадку ріст оксидної плівки відбувається шляхом утворення одного шару над іншим в результаті дифузії іонів титана до зовнішнього фазової границі [10]. При звичайному термічному нагріві бінарних сплавів системи Ti-Al, яка є основою всіх жароміцних титанових сплавів, помітне окислення спостерігається тільки при температурах, вищих за 873 К. Аналогічна картина інтенсивного формування в процесі фретинга оксидних плівок при температурах, значно нижчих температур термічного окислення, спостерігається на інших матеріалах.



а *б*

Рис. 4. Мікроструктура (*а*; ×210) і результати мікрорентгеноспектрального аналізу розподілу елементів (інтенсивність *Kα* рентгенівського випромінювання) в поверхневому шарі сплава ВТ3-1 (*б*) після випробування на фретинг-зношування:
P = 19,6МПа; A = 125 мкм; υ=25Гц; N = 5×105 цикл. T = 673К. Пари однойменні.

Необхідно відзначити, що фретинг-процес відноситься до найбільш енергогенеруючих фрикційних процесів і розглядається як потужний ініціатор розвитку трибохімічних реакцій і поверхневого окиснення металів [11; 12]. За звичайних атмосферних умов ці процеси розвиваються,переважно за механізмами електрохімічної корозії. За таких умов можливість одночасного існування на конта-

ктних поверхнях великої кількості анодних і катодних дільниць, стахостичний характер їх виникнення і місць розташування, а також одночасне поєднання корозійного і втомного механізмів руйнування утруднюють розповсюдження фронту окиснення та формування суцільного шару пасивуючої оксидної плівки. Додатковий внесок в дискретний характер формування оксидної плівки може вносити також ефект водневого окрихчування, який буде сприяти пришвидшенню динаміки процесів диспергування і зношування як самої оксидної плівки, так і приповерхневих об'ємів метала. На можливість збагачення за умов електрохімічній корозії оксидної плівки воднем і пов'язане з цим пониження здатності плівки до деформування вказується у роботі Д. Крюгера [13]. Розвиток явища фрикційного наводнення і його негативний вплив на зносостійкість в умовах фретинг-корозії експериментально доведено результатами досліджень, отриманих в роботі [14].

В цілому, перші три стадії розвитку фретинг-процесу і еволюції стану трибосистеми можна охарактеризувати як період припрацювання і формування рівноважної для даних умов фрикційної взаємодії морфології поверхні, структурно-фазового складу зовнішнього шару вторинних оксидних плівок і структури приповерхневого шару металу. Очевидно, що такий процес необхідно розглядати як стахостичний кінетичний процес з різним рівнем трансформації структури в межах окремо взятих елементарних плям фактичного контакту. Площа поверхні покрита оксидними плівками, їх товщина, склад, властивості і властивості трансформованих структурно-змінних об'ємів приповерхневого шару метала будуть визначатись як природою матеріалів контактної пари, так і температурно-силовими умовами фретинга.

Четверту стадію з урахуванням можливих механізмів трансформації структури і зміни стану трибосистеми можна назвати стадією розвитку нормального зношування або стадією недопустимого патологічного руйнування. Першому випадку відповідають такі параметри структури трибосистеми, за яких за даних температурно-силових умов фретинга існує динамічна рівновага між руйнуванням і відновленням захисного шару вторинних оксидних плівок, що виключає будь-які види руйнування нижче розташованих шарів основного металу [8]. Механізм зношування поверхонь на елементарному контакті, в даному разі, визначається двома принципово різними і такими, що одночасно відбуваються в часі процесами:

– субмікроскопічного локального тонкошарового зношування вторинних оксидних плівок як результат їх адгезійно-механічного руйнування і абразивного стирання в процесі фрикційній взаємодії суміжних окиснених поверхностей;

– мікроскопічного об'ємного зношування як результат поступового накопичення між оксидною плівкою і прилеглим шаром металу комплекса структурних невідповідностей, що створює критичну концентрацію напружень і призводить до виникнення і розвитку тріщин з наступним руйнуванням і відокремленням оксидної плівки по границі поділу фаз. Такий процес розвивається за механізмом, аналогічним механізму утомного фрикційного зношування, відомого як зношування відшаруванням [15] і носить явно виражений циклічний характер.

Внаслідок дискретності контакту, неоднорідності структурно-геометричних параметрів оксидної плівки та неоднорідності напружено-деформованого стану приповерхневих об'ємів матеріала, на різних ділянках поверхні одночасно будуть відбуваються різні фази процесу руйнування і відновлення плівки захисного оксидного шару. Закономірно, що за таких умов з підвищенням температури

тривалість циклу між руйнуванням і відновленням оксидної плівки на кожному елементарному контакті буде скорочуватись, що повинно сприяти зменшенню інтенсивності зношування. При цьому стійкість поверхневих оксидних плівок до руйнування і ефективність їх захисної дії в умовах циклічної зміни контактних навантажень тісно пов'язана з динамікою процесів перебудови структури і релаксаційними властивостями метала основи [2; 16], які з ростом температури можуть суттєво змінюватись і впливати на загальний рівень зносостійкості трибосистеми. Інакше кажучи, необхідною умовою реалізації ефекту мінімізації зносу за рахунок структурно-термічної активації процесів окиснення буде не тільки здатність матеріалів трибосистеми формувати на поверхні трибоконтакту стійкі до зношування оксидні плівки, але і їх здатність підтримувати необхідний для заданих температурно-силових умов контактної взаємодії рівень міцності і релаксаційної здатності. Якщо така умова порушується, зокрема, у наслідок термічного знеміцнення і втрати приповерхневими шарами металу по відношенню до захисної оксидної плівки «ефекту підтримки» [2] (втрата несучої здатності), або при втраті матеріалом основи здатності до релаксації динамічних напружень у результаті розвитку в приповерхневих об'ємах металу структурно-фазових перетворень, деформаційних та інших процесів які блокують ефективні джерела розсіювання в матеріалі підведеної механічної енергії (втрата релаксаційної здатності), розвиток фретинг-процесу і зміна стану трибосистеми буде відбуватись за схемою недопустимого патологічного руйнування поверхонь трибоконтакта:

- руйнування оксидної плівки на плямах фактичного контакту → утворення між ювенільними поверхнями металу міжметалевих зв'язків → утворення локальних вузлів схоплення → руйнування вузлів схоплення → утворення локальних глибинних пошкоджень поверхонь контакту.

Таким чином, на основі представленої моделі еволюції стану трибосистеми (рис. 2) можна сформулювати наступні загальні принципи забезпечення зносостійкості матеріалів в умовах високотемпературного фретинга:

1. Принцип адаптації і саморегулювання структури трибосистеми. Цей принцип передбачає, по-перше, підбір хімічних компонентів матеріалів трибопари здатних в результаті структурно-термічної активації створювати в зоні трибоконтакта захисні оксидні плівки. По-друге, для реалізації умов нормального зношування кінетичні параметри дифузійних процесів і трибохімічних реакцій окиснення повинні забезпечити таке співвідношення інтенсивності руйнування і відновлення оксидних плівок, за якого на контактних поверхнях трибоелементів зберігалась мінімально-достатня для заданих температурно-силових умов фретинга їх площа. Таку умову можна записати співвідношенням [8]:

$$\int_{\zeta}^{\tau} \left(V_y - V_p\right) \cdot d\tau \rangle S_{кр}$$

де: *Vy* і *Vp* – відповідно швидкість утворення і швидкість руйнування (зношування) оксидних плівок при заданих температурно-силових умовах фретинга; $S_{кр}$ – критична площа контактної поверхні, покритої оксидними плівками, нижче якої втрачається ефективність їх захисної дії.

2. Принцип мінімальності зовнішнього тертя і максимальної власної зносостійкості вторинних оксидних структур. Цей принцип передбачає здатність матеріалів контактної пари при фрикційному окисненні основного компо-

нента чи селективному окисненні легуючих елементів утворювати вторинні оксидні фази з підвищеною у порівнянні з основною зносостійкістю і одночасно з більш низьким коефіцієнтом тертя. В цьому плані ефективним можуть бути матеріали, здатні утворювати оксидні фази схильні до вияву твердомастильних властивостей [17], а також матеріали, що здатні формувати в процесі фрикційної взаємодії структури з позитивним по глибині поверхневого шару градієнтом механічних властивостей.

3. Принцип стійкості вторинних оксидних структур до крихкого руйнування. Цей принцип стосується області температур, де оксиди більшості металів, навіть у вигляді тонкоплівочних об'єктів, є крихкими твердими тілами і здатні добре протистояти тільки навантаженням стиснення. У зв'язку з цим, однією із умов забезпечення стійкості до руйнування оксидних плівок за таких температур буде наявність певного запасу пластичності. Цим умовам в найбільшій мірі можуть відповідати некристалічні склоподібні аморфні плівки. Вважається, що такі плівки навіть за звичайних температур можуть витримувати значну пластичну деформацію і здатні швидко відновлюватись після руйнування [13]. На можливість утворення ультрадисперсних аморфізованих структур у верхніх шарах зон фактичного контакта в процесі фретинг-корозії металів указується в роботі [11]. Підвищенню ефекта аморфізації оксидних плівок можуть сприяти введення в матеріал основи спеціальних склоутворюючих елементів таких як, наприклад, Cr, лазерне гартування з метою отримання аморфних металічних поверхонь, на яких умови утворення аморфних оксидних плівок більш сприятливі, ніж на кристалічних [13].

4. Принцип мінімальності напружень в системі метал-оксид. При формуванні на поверхні металів в процесі окиснення чи трибоокиснення оксидних плівок крім напружень від контактних навантажень додатково можуть виникати значні напруження, пов'язані з напруженнями росту оксидних фаз, термічними напруженнями і напруженнями від дії зовнішніх об'ємних сил. Такі напруження будуть сприяти утворенню додаткових центрів руйнування і відповідно пришвидшенню зношування. У зв'язку з цим, необхідною умовою досягнення високого рівня зносостійкості трибосистеми є забезпечення мінімально можливого рівня додаткових напружень в системі метал-оксид. Однією з умов зменшення напружень росту, виникнення яких в більшості випадків пов'язують з різницею питомих об'ємів оксида і метала, буде умова, яка визначається критерієм Пилл-нига-Бедворта [18]:

$$K = \frac{M'p}{Mp'} \approx 1$$

де M і M' – маса в грам еквівалентах відповідно метала і оксида; ρ і ρ' – щільність відповідно метала і оксида.

Критерій K показує відношення об'єму еквівалента отриманого оксида $\left|\frac{M}{p'}\right|$ до відповідного об'єму метала $\left|\frac{M}{p}\right|$ і називають коефіцієнтом прирощення об'єму.

Термічні напруження виникають із-за різниці коефіцієнтів термічного розширення метала і оксидних фаз, а також в наслідок перебудови кристалічних граток метала чи оксида при алотропічних перетвореннях, які супроводжуються

стисненням чи розширенням матеріала. Тому умовою мінімізації термічних напружень буде максимальна близькість коефіцієнтів термічного розширення метала та оксидної фази і відсутність у них в діапазоні робочих температур алотропічних перетворень.

У разі виникнення напружень від дії зовнішніх об'ємних сил суттєве значення має знак і характер навантаження. При дії статичних навантажень напруження розтягу можуть частково компенсувати напруження росту при коефіцієнті прирощення об'єму $K>1$, а стискуючі при $K<1$. Найбільш несприятливим з огляду напружено-деформованого стану системи метал-оксид циклом навантаження будуть цикли розтягу-стиску.

5. Принцип температурної рівноміцності і релаксаційної здатності матеріала основи. Цей принцип передбачає, що для забезпечення цілісності і тривкості на поверхнях контакту захисного оксидного шару матеріал основи кожного елемента трибопари в робочому діапазоні температур повинен зберігати достатньо високий рівень міцності, не допускати суттєвих контактних деформацій від повзучості, виявляти високу здатність до релаксації динамічних напружень. Умову збереження цілісності оксидної плівки за критерієм рівноміцності можна визначити як критично допустиму для даної системи метал-оксид і температурно-силових умов фретинга деформацію матеріала основи Δкр, яку витримує когерентно зв'язана з металом оксидна плівка без руйнування. Таку умову можна записати співвідношенням:

$$\Delta = f(P_{\text{кр}}; \Pi; \sigma^{\text{т}}; K^{\text{п}}) < \Delta_{\text{кр}},$$

де: $P_{кр}$ – діючі контактні навантаження; Π – параметр, який враховує вплив шорсткості поверхні на контактну деформацію; $\sigma^{\text{т}}$ – напруження текучості матеріала за даної температури; $K^{\text{п}}$ – параметр, який враховує контактну деформацію від повзучості.

Очевидно, що за інших рівних умов температура досягнення критичної деформації $\Delta_{кр}$ буде тим більшою, чим більшою за даної температури буде жароміцність матеріалу основи, менша товщина і більша пластичність оксидної плівки. Релаксаційні властивості матеріалів залежать від кількості і ефективності джерел, здатних розсіювати підведену механічну енергію, перетворюючи її в тепло. В кристалічних твердих тілах джерелами розсіювання механічної енергії є елементи легкого переміщення такі як дислокації, границі зерен, блоків, двійників, доменів. Їх блокування, наприклад, блокування дислокацій атомами домішок при динамічному деформаційному старінні, знижує здатність матеріала до релаксації пікових напружень. При цьому різко зростає динамічна напруженість поверхонь трибоконтакта, в поверхневому шарі виникають надмірно високі напруження релаксація яких можлива лише за рахунок утворення крихких (релаксаційних) тріщин або вузлів схоплення [12]. Останній вид релаксації виникає коли температурно-силові умови фрикційної взаємодії не забезпечують швидку регенерацію захисної оксидної плівки і розглядається як одна з різновидностей структурної релаксації, що розвивається на границі поділу твердих фаз [8; 12].

6. Принцип структурної стабільності. Цей принцип передбачає, відсутність, а у разі неможливості уникнення, незначну швидкоплинність будь-яких процесів перебудови структури, які можуть негативно вплинути на властивості матеріала основи і оксидної фази і викликати пришвидшення їх руйнування. Наприклад, до таких процесів можна віднести коагуляцію під дією високих темпе-

ратур і циклічних навантажень γ' – фази у нікелевих дисперснотвердіючих жароміцних сплавах, з чим пов'язують втрату їх жароміцності і зносостійкості при підвищених температурах [19; 20]. Аналогічний ефект у цих сплавах викликає також зменшення в приповерхневому шарі кількості зміцнюючої γ' – фази в наслідок дифузії легуючих елементів Cr; Al; Ti із Ni основи до поверхні з переходом їх в окалину складного складу [1; 21]. Порушення принципу структурної стабільності, що негативно впливає на зносостійкість, може викликати також наявність у складі матеріала основи компонентів здатних в результаті реакції твердофазної взаємодії утворювати крихкі інтерметалічні сполуки, або при окисненні утворювати рихлі маломіцні оксиди, такі як, наприклад, WO_3 [18].

Висновки. В цілому, подана модель еволюції стану трибосистеми відображає реальний перебіг процесів трансформації структури і механізмів поверхневого руйнування, що відбуваються в трибосистемах за умов високотемпературного фретинга. Визначені на основі поданої моделі принципи забезпечення зносостійкості дають можливість науково-обгрунтовано вибирати склад і формувати структуру матеріалів з необхідним для заданих температурно-силових умов роботи трибовузлів комплексом фізико-хімічних і механічних властивостей.

Список літератури

1. Шевеля В. В. Фреттинг-коррозия конструкционных материалов при повышенных температурах / В. В. Шевеля, А. В. Карасьов // Трение и износ. – 1982. – Т.3 – №2. – С. 256–263.

2. Шевеля В. В. Фреттинг-усталость металлов / В. В. Шевеля, Г. С. Калда. – Хмельницкий: Поділля, 1998. – 299с.

3. Hurriks P. L. The Mechanism of Fretting and the Influence of Temperature // And Lubric and Tribol. – 1975. – Vol. 27. – №6. – p. 209–214; 1976. – Vol. 28. – №1. – P. 9–17.

4. Богуслаев А. А. Контактное взаимодействие сопряженных деталей ГТД / В. А. Богуслаев, Л. И. Ивщенко, А. Я. Качан, В. Ф. Мозговой. – Запорожье: Изд-во ОАО «Мотор Сич», 2009. – 328с.

5. Ишлинский А. Ю. Проблемы изнашивания твердых тел в аспекте механики / А. Ю. Ишлинский, И. В. Крагельский, И. М. Алексеев и др. – Трение и износ. – 1986. – Т. VII. – №4. – С. 581–592.

6. Боуден Ф. П. Трение и смазка твердых тел / Ф. П. Боуден, Д. Тейбор. – М.: Машиностроение, 1968. – 543с.

7. Костецкий Б. И. Механо-химические процессы при граничном трении / Б. И. Костецкий, М. Э. Натонсан, Л. И. Бершадский. – М.: Наука, 1972. – 171с.

8. Костецкий Б. И. Поверхностная прочность материалов при трении / Б. И. Костецкий, И. Г. Носовский, Л. И. Бершадский. – К.: Техника, 1976. – 296с.

9. Дончук П. П. Исследование переноса металла в процессе схватывания при сухом трении скольжения / П. П. Дончук , Е. А. Марковський, Б. И. Костецкий // В. сб.: «Повышение долговечности материалов». – К.: из-во Института проблем литья АН УССР, 1969.

10. Войтович Р. Ф. Высокотемпературное окисление титана и его сплавов / Р. Ф. Войтович, Э. И. Головко. – К.: Наукова думка,1984. – 256с.

11. Голего Н. Л. Фреттинг-коррозия металлов / Н. Л. Голего, А. Я. Алябъев, В. В. Шевеля. – К.: Техника, 1974. – 272 с.

12. Шевеля В. В. Трибохимия и реология износостойкости / В. В. Шевевля, В. П. Олександренко. – Хмельницький: ХНУ, 2006. – 278с.

13. Крюгер Д. Коррозия и обработка поверхности / Всб.: Обработка поверхности и надежность материалов: Пер.с англ. / Под. ред. Дж. Бурне., Ф. Вайса. – М.: Мир. – 1984. – С.81-93.

14. Алябъев А. Я. Наводораживание и его влияние на изнашивание титановых сплавов при фреттинг-коррозии / А. Я. Алябъев, А. И. Духота., И.А.Зеленков., В. Г. Костюченко., В. Г. Черепин. – В сб.: Проблемы трения и изнашивания. – Вып.21. – 1982. – С. 89–93.

15. Suh N. P. The Delamination Teory of Wear // Wear. – 1973. – Vol. 25. – №1. – P.111– 124.

16. 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.

17. Ковальов Е. П. Твердосмазочные покрытия для машин и механизмов, работающих в экстремальных условиях / Е. П. Ковальов., М. Б. Игнатьев., А. П. Семенов., Н. И. Смирнов., Н. Е. Неволин., В. Ф. Фоминский // Трение и износ. – 2004. – Т. 25, №3. – С. 316 – 336.

18. Окисление металлов. Т. 1. Теоретические основы: под. ред. Ж. Бенра. Перевод с франц. – М.: Металлургия, 1968. – 499с.

19. Химушин Ф. Ф. Жарапрочные стали и сплавы.–М.:Изд-во «Металлургия», 1969.–752 с.

20. Пейчев Г. И. Износостойкие сплавы для контактных поверхностей деталей ГТД / Г. И. Пейчев, А. К. Шурин, Л. И. Ивщенко и др. // Весник двигателестроения. – 2006. – №2. – С. 188–192.

21. Шевеля В. В. Підвищення фретингостійкості робочих лопаток турбін ГТД / В. В. Шевеля., г. С. Калда., О. І. Духота., В. Б. Сідоров // Сборник трудов 2-й Международной конф. «Динамика роторных систем». – Камянецк-Подольский. – 1998. – С. 129 – 132.

Стаття надійшла до редакції 25.11.2015

O. I. DUKHOTA

TRYBOSYSTEM EVOLUTIONARY MODEL AND GENERAL PRINCIPLES OF MATERIALS WEAR RESISTANCE IN HIGH TEMPERATURE FRETTING CONDITIONS

The features of tribological processes and deterioration of materials under high temperature fretting. The trybosystem evolutionary model, thatreflects the change in their status at various stages of development of high temperature fretting is shown. Principles of providing of high temperature fretting materials resistance are determined.

Keywords: high temperature fretting, tribological processes, trybosystem evolutionary model, wear dependencies, wear resistance.

Духота Олександр Іванович – канд. техн. наук, доцент кафедри технологій виробництва та відновлення авіаційної техніки Національного авіаційного університету, пр. Космонавта Комарова, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +38 044 406 76 70