С.А. Плешкунов

Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

СТРУКТУРНО-ЕНЕРГЕТИЧНА МОДЕЛЬ ПРИСКОРЕНОЇ ОЦІНКИ ПОКАЗНИКІВ КОНТАКТНОЇ УТОМНОЇ МІЦНОСТІ МАТЕРІАЛІВ

У статті представлені результати моделювання роботи поверхневого шару зразків зі сталі 20Х3МВФ, зміцнених традиційним цементуванням та новим іонно-плазмовим азотуванням по технології АВІНІТ N (АТ “ФЕД”, м. Харків, Україна). Розроблено модель поведінки цих трибоспрямижень при прискорених експериментальних випробуваннях на контактну втомну міцність, проведених автором. Аналіз структурно-енергетичного балансу енергії поверхневого шару в умовах контактної взаємодії дозволив сформулювати критерії втомної міцності матеріалів: питома енергія руйнування за один цикл навантаження.

Ключові слова: втомна міцність, зміцнення поверхонь тертя цементациєю, енергетичний баланс матеріалу, зміцнення поверхонь тертя азотуванням, іонно-плазмові азотування, імпульсне навантаження, технологія зміцнення АВІНІТ N.

Вступ

Постановка проблеми. Довговічність більшості агрегатів в авіабудуванні, як і взагалі в машинобудуванні, напряму пов’язана з контактною міцністю поверхонь деталей, з яких виготовлені пари тертя цих агрегатів. І для її прогнозування та подовження дуже важливу роль відіграють експериментальні дослідження, які дозволяють безпосередньо порівняти та визначити переваги тих чи інших способів конструктивних, технологічних, хіміко-технологічних та багатьох інших способів збільшення контактної міцності поверхонь тертя конструкційних матеріалів. Але розроблені за результатами таких навіть багатьох довготривалих експериментів моделі поверхневого руйнування часто не можуть бути поширені на інші схеми контактної взаємодії, інші умови роботи чи інші конструкційні матеріали. Тому виникає необхідність у розробці більш загальних теоретичних моделей, заснованих на фундаментальних законах термодинаміки, фізики міцності, механіки деформованого твердого тіла та інших.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У даний час дослідженню кінетики пошкоджуваності та руйнування твердих тіл присвячено багато робіт [1–3].

Досягнення в області втомної міцності широко узагальнені в роботі [2]. Зараз у літературі велике місце відводиться оглядовим публікаціям, створенню різноманітних класифікацій та критеріїв оцінки триботехнічних характеристик матеріалів, насамперед на методики проведення порівняльних випробувань на втомну зносостійкість [2; 4; 5]. Втомне зношування в даних роботах характеризується існуванням скритого латентного періоду, впродовж якого відсутнє видиме руйнування матеріалу поверхнево-

го шару, але відбувається поступове накопичування дефектів [4–6]. При досягненні певної концентрації мікропошкоджень настає фаза швидкого руйнування, коли “втомлений” матеріал поверхневого шару диспергується (перетворюється) у вигляді часток зносу [7].

В.В. Федоров вперше показав, що щільність внутрішньої енергії є одностайною інтегральною характеристикою термодинамічного стану матеріалу поверхневого шару [8]. При цьому основну роль у пошкоджуваності відводилася прихованій енергії пластичної деформації, на наявність якої вперше указав Хорт ще у 1906 році, як зазначив Ібатулін І.Д. [2].

Основною проблемою енергетичної теорії руйнування, що оперує подібними параметрами пошкоджуваності, є те, що вони за своєю природою не спостерігаємі [8–11]. Сучасний розвиток неруйнівних методів контролю, а саме методу акустичної емісії (АЕ), дозволив контролювати процеси як мало, так і багатоциклової втоми на усіх етапах розвитку [12–15]. Це і дало практичні основи для розробки методики прискореної оцінки показників втомної пошкоджуваності.

Для ефективної діагностики технічного стану трибосистем (ТС) в процесі лабораторних випробувань і експлуатації необхідно використовувати показники, що дозволяють визначати швидкість накопичення пошкоджень і перехід до різних механізмів руйнування, у тому числі і до втомних пошкоджень. Показниками, що визначають швидкість зношування, є різного роду енергетичні критерії, оскільки вони відображають дисипацію (зміну) енергії при терті [16]. В розвитку даного напрямку в останній час велика увага приділяється прискореним методам оцінки зносостійкості [16].

Одним з напрямків такого підходу є структурно-енергетичне моделювання, яке може дозволити

оцінити внесок енергетичних складових втомного руйнування та розробити шляхи прискорення експериментальних досліджень для порівняльної оцінки втомної міцності конструкційних матеріалів.

Актуальність роботи обумовлена розробкою на ДП “Антонов” дослідних зразків приводів генераторів для літаків сімейства Ан-148/158/178 зі збільшеним міжремонтним ресурсом. Це привело до необхідності зміни класичного методу зміцнення зубів шестерень цементациєю на новий, більш досконалий метод зміцнення – іоноплазмове азотування [1; 3–5; 7–9]. Було проведено багато експериментальних досліджень для порівняння контактної втомної міцності при цих способах зміцнення. Спочатку було проведено довготривалі порівняльні експерименти [17]. Класичні експериментальні випробування потребують дуже довгого терміну, який неможливо провести у стислі строки. Тому було розроблено методику прискореної оцінки та проведено експерименти згідно неї [18], виконано великий обсяг мікроструктурних та фазових досліджень цих поверхонь [19] та порівняльний аналіз параметрів зносостійкості [20]. Методика прискореної оцінки показала дуже гарні результати. Все це обумовлює та дає основу для розробки теоретичної моделі прискореної оцінки контактної взаємодії подібних трибосистем (ТС).

Метою роботи є розробка структурно-енергетичної моделі прискореної оцінки показників контактної утомної міцності матеріалів для проведення випробувань конструкційних матеріалів при терті кочення з проковзуванням.

Виклад основного матеріалу

Отримані в результаті експериментальних досліджень дані свідчать про перспективність енергетичного підходу до прогнозування втомної довговічності конструкційних матеріалів при переводі їх у збуджений стан в результаті імпульсного навантаження. На основі проведеного аналізу визначено, що саме імпульсне навантаження до максимально можливих величин може бути фактором скорочення часу випробувань [17–20].

При імпульсному навантаженні перехід в збуджений стан відбувається під зовнішнім впливом (силовим, потоковим і т.д.) з інтенсивністю, вище деякої критичної. Це означає, що переходу передують накопичення якихось елементарних збуджень, концентрація яких досягає критичного значення. При знятті зовнішнього впливу збуджений стан релаксує – надлишкова локальна латентна енергія перетворюється на теплову (більше 80%) та, що особливо важливо, накопичується у вигляді мікропошкоджень вже на цьому етапі випробувань.

Таким чином можна визначити збуджений стан як деяку багатомасштабну дисипативну структуру, яка утворюється під дією енергетичних впливів

зовні, має кінетичні і механічні властивості, відмінні від квазірівноважних, і релаксуючу досить швидко після зняття зовнішніх впливів.

На рис. 1 приведена схема структурної побудови поверхневого шару сталевго зразка при терті, який зазнає імпульсного навантаження при переведенні трибосистеми в збуджений стан. У відповідності з даними роботи [21], найбільш навантаженими є шари 2 і 3, в обсязі яких зароджуються мікротріщини, що призводять до виразкових руйнувань. Тому структурна побудова поверхневого шару досліджуваних матеріалів є визначальним в їх контактній витривалості (втомній міцності). Відомо [22–24], що процеси втоми в матеріалі поверхневого шару при механічному зношуванні розвиваються в локальній області, розміри якої визначаються конкретними умовами тертя. Поза цією областю структура матеріалу має іншу сутність. Тому розміри активуваної зони можуть бути визначені експериментально, методами структурного аналізу матеріалу поверхневого шару по глибині після його навантаження (переведення в активний стан). Прагнення матеріалу до досягнення рівноважного стану включає різні механізми пасивації, що зменшують внутрішню енергію ТС.

Одним з таких механізмів є накопичення пошкоджуваності (рис. 1) [18].

Рис. 1. Схема мікроструктурної організації поверхневого шару матеріалів трибосистеми за умов тертя з великими контактними навантаженнями:

- 1 – шар перенесення (вторинні структури);
- 2 – дрібноосередкова фрагментована структура;
- 3 – структура з нерівновісними осередками

Джерело: розроблено автором за даними [18, с. 123].

Для поверхневого шару 1 – утворення вторинних структур. Для підповерхневого шару 2, 3 – перебудова в напрямку збільшення міцності. Одним з негативних механізмів є накопичення пошкоджень в цих шарах, яке зменшує величину внутрішніх напружень. При втомному зношуванні формуються дві області накопичення пошкоджуваності: перша зосереджена в тонкому поверхневому шарі 1, який накопичує дефекти і руйнується в режимі малоциклової втоми, а друга, поширюючись на велику глибину в шар 2 і відповідає за кінетику розвитку контактної фрикційної втоми, яка протікає в багатоцик-

ловому режимі [25].

Шари 1 і 2 несуть відповідальність як за накопичення енергії і руйнування, так і за дисипацію роботи сил тертя, тобто вносять істотний внесок в коефіцієнт тертя.

Тому для моделювання енергетичного стану поверхневого шару конструкційних матеріалів в умовах імпульсного навантаження використовували структурно-енергетичний підхід [26].

1. Структурно-енергетична модель контактної втоми металів з урахуванням швидкості зовнішнього впливу (імпульсного навантаження)

Відомо [2–8], що контактна міцність, в загальному випадку, може бути підвищена шляхом зниження механічних і термічних впливів на контактуючі поверхні внаслідок їх деформації і тертя.

1.1. Оцінка енергетичного балансу матеріалу в умовах імпульсного навантаження

Виділимо на поверхні ділянку площею S . Тоді, при глибині H (рис. 1), ефективний об'єм матеріалу $V_{\text{м еф}}$, що бере участь у контактній взаємодії, буде дорівнювати $V_{\text{м еф}} = SH$. В цьому об'ємі в умовах контактної взаємодії відбуваються структурні зміни (деградація матеріалу, накопичення дефектів) зі швидкістю контактної взаємодії v_i .

Ефективний об'єм матеріалу $V_{\text{м еф}}$ після критичної кількості циклів взаємодії може зруйнуватися та перетворитися у продукт зносу (пітінг).

Очевидно, що деструкція та наступне руйнування вказаного об'єму матеріалу $V_{\text{м кр}}$ буде відбуватися у відповідності з мірою пошкоджуваності $z(t)$ поверхневого шару конструкційного матеріалу, яка залежить від балансу підведеної та накопиченої в цьому об'ємі енергії [7–8].

Виходячи з цього, накопичена енергія за один цикл контактного навантаження $E_{\text{вн1}}$ може бути визначена, як 20% від $E_{\text{нидв1}}$, тобто $0,2 E_{\text{нидв1}}$.

$$z(t) = \frac{E_{\text{вн}} v_i}{E_{\text{руй}} v_{\text{кр}}} n_{\text{кр}} f(n) = \frac{E_{\text{вн}} v_i}{W_{\text{кр}}^*} n_{\text{кр}} f(n), \quad (1)$$

де $E_{\text{вн}}$ – енергія, що накопичується при однократному впливі;

$E_{\text{руй}}$ – енергія, що накопичилася матеріалом до моменту його руйнування;

$v_{\text{кр}}$ – критична швидкість зовнішнього впливу, якої достатньо для руйнування матеріалу у шарах 1, 2, 3 (рис. 1) поверхневого шару в $V_{\text{м еф}}$;

$n_{\text{кр}}$ – критична кількість циклів контактної взаємодії на момент руйнування поверхневого шару;

$f(n)$ – функція, що описує кінетику розвитку

пошкоджень;

n – кількість циклів контактної взаємодії при терті;

$W_{\text{кр}}^*$ – критична щільність потоку енергії (потужності), осереднена у об'ємі $V_{\text{м еф}}$, МДж/м^3 .

Величина енергії $W_{\text{кр}}^*$ по суті й визначає утомну міцність поверхневого шару матеріалу [26]. У даних роботах відмічається, що функція, яка описує кінетику розвитку пошкоджень $f(n)$ істотним чином залежить від швидкості зовнішнього впливу v_i . З точки зору застосування методу АЕ, міра пошкоджуваності z еквівалентна інтегральній величині потужності АЕ $W_{\text{кр}}^*$ у відносних одиницях [12–15].

У відповідності зі структурно-енергетичною теорією утомної міцності, сформульованою В. В. Федоровим в умовах контактної взаємодії паралельно відбуваються два процеси: накопичення енергії у поверхневому шарі $E_{\text{вн}}$ та її розсіювання (дисипація) [2; 4–6].

Більша частина енергії (більше 80%) перетворюється на тепло, а інша частина накопичується у поверхневому шарі $E_{\text{вн}}$. Виходячи з цього, накопичена енергія за один цикл контактного навантаження $E_{\text{вн1}}$ може бути визначена, як 20% від енергії, що накопичується при однократному впливі $E_{\text{нидв1}}$: $E_{\text{вн1}} = 0,2 E_{\text{нидв1}}$.

Величина цієї енергії є постійною для кожного матеріалу і може бути представлена виразом:

$$E_{\text{вн}} = E_0 + E_{\text{руй}} = \text{const}_M, \quad (2)$$

де E_0 – початкова енергія руйнування, яка накопичується в поверхні за час імпульсного навантаження (10 с, 50 циклів):

$$E_0 E_0 = E_{\text{нидв1}} n_{\text{имн}} = 50 E_{\text{нидв1}}, \quad (3)$$

де $E_{\text{руй}}$ – енергія, що накопичилася матеріалом до моменту його руйнування.

Величина даної $E_{\text{вн}}$ енергії визначається структурним станом поверхневого шару та є коефіцієнтом дисипації зовнішньої підведеної до матеріалу енергії.

З урахуванням можливості визначення критичної кількості циклів контактної взаємодії на момент руйнування поверхневого шару з урахуванням функції, що описує кінетику розвитку пошкоджень $n_{\text{кр}} f(n)$ за допомогою методу акустичної емісії [12–15], запропоновано оцінювати втомну міцність питомою енергією руйнування за один цикл навантаження:

$$\bar{E}_{\text{пит}} = \frac{E_{\text{макс}} - E_{\text{вн}}}{n_{\text{кр}}}, \quad (4)$$

де $\bar{E}_{\text{пит}}$ – питома енергія руйнування за один цикл навантаження;

$E_{\text{макс}}$ – максимальна питома енергія, при якій матеріал починає руйнуватися, $E_{\text{макс}} = \text{const} = 10^{11} \text{ Дж} / \text{м}^3$ (для матеріалів з близькими фізико-механічними властивостями) [1], або, іншими словами, енергія активації руйнування матеріалу [1–3].

Для порівняльної оцінки утомної міцності конструкційних матеріалів (КМ) достатньо використання відношення $E_{\text{вн}} / n_{\text{кр}}$. У цьому виразі $E_{\text{вн}}$ визначається розрахунковим методом, а $n_{\text{кр}}$ – експериментальним шляхом за допомогою методу АЕ. Фізична сутність даного відношення при порівняльній оцінці різних матеріалів полягає у кількості енергії, яку матеріал може сприйняти за один цикл без руйнування. При порівнянні треба визначати це відношення для $n_{\text{кр}}$ менш міцного матеріалу (найменше $n_{\text{кр}}$ з усіх матеріалів, які порівнюються).

Аналіз рівнянь (2–3) дає розуміння про можливість прискорення порівняльних випробувань на контактну утомну міцність. Перший шлях: проведення випробувань на максимально можливому навантаженні. Другий шлях – збільшення E_0 за рахунок збільшення швидкості зовнішнього впливу (швидкість імпульсного навантаження).

Таким чином, основним етапом прискорених випробувань є імпульсне навантаження до максимальних величин навантажень $\sigma_{\text{макс}}$. Імпульсне навантаження захоплює шар в кілька десятків мікрон – в залежності від рельєфу поверхні і контактних напружень. У цьому шарі розсіюється основна частка роботи сил тертя. Зараз це питання вивчено ще недостатньо, але можна виділити чотири основні канали дисипації (в міру зростання товщини шару) [2; 27]: розриви адгезійних зв'язків між поверхнями; релаксація пружних напружень від взаємодіючих нерівностей поверхонь (тобто перехід пружних напружень в довгохвильові фонони); перетворення енергії механічного впливу в теплову ($\approx 80\%$); релаксація напружень в результаті пластичних деформацій по дислокаційної механізму.

Загальні потоки енергії через поверхневі шари досить великі. Згідно формули В.І. Владимирова, кількість енергії, яка проходить через поверхневі шари при терті [28]:

$$\frac{N}{V_{\text{м.еф}}} = \frac{\sigma V_{\text{тер}}}{H}, \quad (5)$$

де N – потужність, що підведена до ТС;

$V_{\text{м.еф}}$ – ефективний об'єм взаємодії;

σ – контактне напруження від абсолютного навантаження при терті;

$V_{\text{тер}}$ – лінійна швидкість взаємного переміщення зразків;

H – товщина шару, у якому відбувається взаємодія.

Частина енергії, що залишається в трибосистемі (з урахуванням її особливостей) нормується коефіцієнтом тертя μ :

$$\frac{N}{V_{\text{м.еф}}} = E_{\text{вн1}} = \mu \frac{\sigma V_{\text{тер}}}{H}. \quad (6)$$

Якщо в нашому випадку прийняти товщину шару для азотованих і цементованих зразків рівним $H \approx 0,2 \text{ мм}$, а напруження при терті $\sigma \approx 1400 \text{ МПа}$, то при швидкості зсуву $V_{\text{тер}} \approx 0,65 \text{ м/с}$ при контактній взаємодії на кожному циклі та вимірюваного коефіцієнту тертя $\mu \approx 0,04$ [18], питома потужність енергії, що підводиться до ефективного об'єму ТС за один цикл буде близько $E_{\text{відб1}} \approx 4,8 \cdot 10^6 \text{ Дж/м}^3$. Загальна підведена енергія залежить від кількості циклів до руйнування. Ця кількість залежить від частоти обертання валу машини тертя, тому:

$$E_{\text{відб}} = E_{\text{відб1}} n_{\text{кр}} = \mu \frac{\sigma V_{\text{тер}}}{H} n_{\text{кр}}. \quad (7)$$

Якщо навіть невелика частка цієї енергії перейде в приховану (латентну), яку накопичила структура поверхневого шару, то матеріал переходить в збуджений стан, що дозволяє прискорити досягнення критичного рівня величини внутрішньої накопиченої енергії та переходу до руйнування [2].

З урахуванням структурно-енергетичного підходу до руйнування в умовах контактної взаємодії конструкційних матеріалів, руйнування обумовлено конкуренцією двох взаємопов'язаних, але протилежних тенденцій: зростання щільності пошкоджуваності і зниження (вивільнення) цієї енергії за рахунок релаксації. І при досягненні критичної щільності прихованої енергії відбувається руйнування. Таким чином, в результаті моделювання було сформульовано умови проведення прискорених випробувань для порівняльної оцінки показників утомної пошкоджуваності матеріалів, зміцнених цементациєю та іонно-плазмовим азотуванням за технологією AVINIT N.

Оскільки в межах роботи планувалося оцінювати утомну контактну міцність зразків, зміцнених цементациєю та іонно-плазмовим азотуванням, то це буде впливати на величину коефіцієнта дисипації $E_{\text{вн}} = \text{const}_M$.

Для розглянутих умов імпульсних контактних впливів такий стан може привести до наступних ефектів.

1) На зразках, зміцнених азотуванням, збільшення ступеня і швидкості деформації створюють умови переходу структури з кристалічного в аморфний стан [21; 23–24].

2) У випадку ж з цементацією відбувається зміцнення з одночасним накопиченням енергії на межі розділу зерен, що в подальшому призводять до зростання мікротріщин [29].

Ці висновки є підставою для проведення прискорених випробувань заявлених трибосистем на контактну втому з очікуваною перевагою зміцнення азотуванням за технологією AVINIT N.

1.2. Аналіз енергетичного та структурного стану матеріалу в процесі імпульсного навантаження

Математичний аналіз динаміки зміни за часом енергетичного балансу мікроструктури поверхневого шару в ефективному об'ємі взаємодії $V_{\text{м еф}}$ під час імпульсного навантаження може бути виконаний з використанням рівняння Фокера-Планка-Колмогорова (ФПК) [30]. Це рівняння найбільш повно описує випадкові зміни в елементах мікроструктури x_i у випадках “енергетичного накачування” (силового впливу).

Умови побудови моделі. Нехай динаміка енергетичного стану мікроструктури описується звичайним диференціальним рівнянням виду

$$\frac{dx_i}{dt} + f_{(E)i}(x_1, x_2, \dots, x_n, t_{\text{имп}}) = E_{\text{вн}i}, \quad (8)$$

де $f_{(E)i}$ – енергетична характеристика мікроструктури;

$i = 1, 2, \dots, n$;

$x_1, x_2, \dots, x_n$ – енергетичні стани елементів мікроструктури, які можуть змінюватися від початкового стану z_0 до стадії повної деструкції $z_{\text{кр}}$.

$t_{\text{имп}}$ – час імпульсного навантаження;

$E_{\text{вн}i}$ – внутрішня енергія i -го структурного елементу.

Енергетична характеристика мікроструктури $f_{(E)i}$ залежить від величини $E_{\text{вн}i}$ – частини енергії, яка підводиться за кожен цикл навантаження за час імпульсного навантаження $t_{\text{имп}}$.

Загальний енергетичний стан поверхневого шару зміниться за час імпульсного навантаження $t_{\text{имп}}$ за рахунок зміни в кожному з елементів мікроструктури, яка залежить від фактичної обробки, зміцнення чи модифікації поверхні. У нашому випадку цементація або іонно-плазмове азотування.

Початкові значення енергетичного стану мікроструктурних елементів $x_{1(0)}, x_{2(0)}, \dots, x_{n(0)}$ вважаємо випадковими та їх розподіл характеризується щільністю імовірності енергетичного стану:

$$P(x_1, x_2, \dots, x_n) = P_0(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (9)$$

яка за умовами нормування рівняння ФПК задовольняє умові:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \dots \int_{-\infty}^{+\infty} P_0 dx_1 dx_2 \dots dx_n = 1. \quad (10)$$

Рівняння ФПК дозволяє встановити зв'язок часу імпульсного навантаження $t_{\text{имп}}$ з поточною щільністю імовірності $P(x_1, x_1, \dots, x_n, t)$ та з характеристикою мікроструктури $E_{\text{вн}i}$:

$$\begin{aligned} \frac{d \ln P}{dt} - \sum_{i=1}^n E_{\text{вн}i} \frac{d \ln P}{dx_i} - \\ - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n E_{\text{вн}i} \left(\frac{\partial^2 \ln P}{\partial x_i^2} + \frac{\partial \ln P}{\partial x_i} \right) = \sum_{i=1}^n \frac{\partial E_{\text{вн}i}}{\partial x_i}. \end{aligned} \quad (11)$$

При певних умовах за час $t_{\text{имп}}$ ця величина послідовно досягне по всім елементам мікроструктури x_i величини $E_{\text{руйн}}$.

І рівняння динаміки зміни енергії в ефективному об'ємі поверхневого шару (рис. 1) можна записати у наступному вигляді:

$$\begin{cases} \frac{\partial \ln P(E_{\text{вн}i})}{dt} - \frac{f(E_{\text{вн}i})}{\partial E_{\text{вн}}} = \frac{\partial f(E_{\text{вн}i})}{\partial E_{\text{вн}}}, \\ \frac{dE_{\text{вн}i}}{dt} + f(E_{\text{вн}i}) = 0. \end{cases} \quad (12)$$

У випадку руйнування, енергія перетворюється в енергію деструкції.

Якщо розподіл $P(E_{\text{вн}})$ не змінюється в часі, то перший член системи (12) дорівнює нулю і тоді:

$$\frac{\partial}{\partial E_{\text{вн}}} [\ln f(E_{\text{вн}i}) + \ln P(E_{\text{вн}})] = 0, \quad (13)$$

тобто:

$$\ln f(E_{\text{вн}i}) + \ln P(E_{\text{вн}}) = E_{\text{max}}. \quad (14)$$

E_{max} визначається з умови характеристик мікроструктури та підведеної потужності N , яка діє на мікроструктуру у процесі імпульсного навантаження. З цього витікає, що структура з більш дрібнозернистою структурою має більше значення енергії руйнування, а відповідно, і більш високі ресурсні показники.

Такий висновок дає привід для проведення порівняльних ресурсних випробувань ТС з різними видами модифікування поверхонь (цементація та іонно-плазмова обробка AVINIT N).

2. Аналіз кінетики розвитку пошкоджень в умовах контактного утомного зношування

Визначення цього завдання є надзвичайно актуальною і недостатньо вивченою проблемою, оскільки вирішення цього завдання складається з двох складових:

– визначення міри пошкодження яка адекватно

оцінює зміну фізико-механічних властивостей конструкційного матеріалу у процесі тривалої експлуатації;

– математичне описання еволюції змін міри пошкодження матеріалів в процесі тривалої експлуатації в умовах знакозмінних навантажень.

В результаті проведеного аналізу [31], встановлено, що найбільшому впливу КМ піддається при роботі в умовах високонавантажених агрегатів приводів АТ. Тому прогнозування ресурсу КМ, зводиться до контролю зміни їх фізико-механічних властивостей в процесі контрольних випробувань, основним недоліком яких є довготривалість, а формування методики прискорених випробувань є надзвичайно актуальною задачею [32].

Моніторинг зміни фізико-механічних властивостей конструкційних матеріалів свідчить [33], що найбільш ефективними методами контролю фізико-механічних властивостей матеріалу є метод АЕ, розроблений у НАУ та ХНУПС [12–15].

Еволюція зміни мір пошкодження матеріалів в процесі тривалої експлуатації в умовах знакозмінних навантажень, представляє собою дифузійний марківський процес [34–35].

Розглянемо закономірності аналізу зміни міри пошкодження за параметром АЕ [17] (рис. 2). На рис. 2:

– $n_{крЦ} = 53812$ – критична кількість циклів контактної взаємодії на момент руйнування поверхневого шару, зміцненого цементацією;

– $n_{крА} = 97875$ – критична кількість циклів контактної взаємодії на момент руйнування поверхневого шару, зміцненого азотуванням;

– $z_{крЦ} = 322000$ – критична міра пошкоджуваності, еквівалентна інтегральній величині потужності АЕ $W_{кр}^*$ у відносних одиницях [12–15] на момент руйнування поверхневого шару, зміцненого цементацією;

– $z_{крА} = 587000$ – критична міра пошкоджуваності, еквівалентна інтегральній величині потужності АЕ $W_{кр}^*$ у відносних одиницях [12–15] на момент руйнування поверхневого шару, зміцненого азотуванням.

Цілком логічно, що площі під ділянкою графіку до досягнення $n_{кр}$ пропорційні величині E_{max} – максимальній питомій енергії, при якій матеріал починає руйнуватися.

Тобто ці площі дають можливість порівняльної оцінки енергії активації руйнування різних матеріалів (або різних способів модифікації поверхонь тертя) при використанні прискореної методики такої оцінки [18].

Рис. 2. Закономірності зміни міри пошкодження за параметром АЕ:

1 – залежність для ТС, зміцненої цементацією;
2 – залежність для ТС, зміцненої азотуванням

АВІНІТ N

Джерело: розроблено автором.

Кінетичні рівняння для міри пошкодження поверхневого шару конструкційного матеріалу $z(t)$ є рівнянням фільтру для визначального параметра надійності $\lambda(t)$ при тривалій експлуатації, за рахунок процесів деградації на атомно-молекулярному рівні:

$$\begin{cases} \frac{dz(t)}{dt} = F[z(t), \lambda(t), R(t)]; \\ \frac{d\lambda(t)}{dt} = \Phi_1(\lambda) + \Phi_2(\lambda)n(t), \end{cases} \quad (15)$$

де $F[z(t), \lambda(t), R(t)]$ – детермінована від’ємна для кумулятивних моделей накопичення дефектів на І етапі скалярна лінійна або на II етапі нелінійна функція при об’єднанні дефектів та тріщин;

$R(t)$ – вектор параметрів базової залежності для заданої моделі накопичення пошкоджень;

$\Phi_1(\lambda)$ і $\Phi_2(\lambda)$ – детерміновані функції, що задовольняють умові Ліфшиця.

Визначальний параметр надійності $\lambda(t)$ при тривалій експлуатації напряду пов’язаний з функцією, що описує кінетику розвитку пошкоджень $n_{кр}f(n)$ в рівняннях (1–3).

Часовий діапазон вимірювання міри пошкодження визначається швидкістю зміни механічних властивостей конструкційного матеріалу $z(t)$ за одиницю часу. В цьому випадку процес $z(t)$, швидкість якого описується першим рівнянням (1), можна вважати приблизно одномірним марківським для часових інтервалів $(t, \Delta t), (t \geq 0)$, якщо величина Δt задовольняє нерівностям [35]:

$$\tau_k \gg \Delta t \gg \tau_c, \quad (16)$$

де τ_k – час кореляції $\lambda(t)$, який має порядок тисяч вимірів (15000 вимірювань за 5 хв випробувань);

τ_c – постійна часу АЕ системи реєстрації пошкоджень (20 мс);

Внаслідок цього, виконання лівої частини нерівності (16) не викликає сумнівів, тоді як виконання правої частини вимагає перевірки у кожному конкретному випадку. Приведені доводи про можливість розгляду процесу накопичення пошкоджень в поверхневому шарі, як марківського носять якісний характер, строгий доказ цього твердження представляє складну проблему та потребує проведення випробувань на багатоциклову втому конструкційного матеріалу.

З рівняння (15), можна на підставі роботи [36] стверджувати, що множина $[z(t), \lambda(t)]$ представлятиме двовимірний марківський процес, одновимірною щільністю імовірності якого $f(z, \lambda, t)$ задовольняє рівнянню ФПК [36]:

$$\frac{df}{dt} = -\frac{d}{d\lambda} [A_1(\lambda)f] - \frac{d}{dz} [A_2(\lambda, z)f] + \frac{1}{2} \frac{d^2}{d\lambda^2} [B(\lambda)f], \quad (17)$$

з граничними умовами:

$$f(z, \lambda, t) > 0, \quad (18)$$

та початковими умовами:

$$f(z, \lambda, t) = f(z)f(\lambda), t > 0. \quad (19)$$

Умови (18) формулюються виходячи з фізичної суті задачі. В умові (19) передбачається, що $z(t)$ і $\lambda(t)$ в початковий момент часу $t=0$ стохастично незалежні. Відповідно до загальної теорії марківських процесів існує взаємно однозначна відповідність між коефіцієнтами рівняння (17) і коефіцієнтами стохастичних диференціальних рівнянь (15):

$$A_1(\lambda) = \Phi_1(\lambda) + \frac{N_0}{4} \Phi_2(\lambda) \frac{d\Phi_2(\lambda)}{d\lambda}; \quad (20)$$

$$A_2(\lambda, z) = F(\lambda, z, y_m, R); \quad (21)$$

$$B(\lambda) = \frac{N_0}{2} \Phi^2(\lambda). \quad (22)$$

Таким чином, з рівняння (18), яке базується на методі характеристичних функцій, можна визначити одновимірну щільність імовірності величини міри пошкоджень поверхневого шару $f(z, t)$, по якій визначаються всі основні показники міцності для кумулятивних лінійних моделей накопичення пошкоджень в поверхневому шарі в умовах знакозмінних навантажень конструкційного матеріалу:

$$P(t) = \int_0^1 f(z, t) dz; \quad (23)$$

$$q(t) = -\frac{dP}{dt} = -\int_0^1 \left(\frac{df(z, t)}{dt} \right) dz,$$

де $P(t)$ – час накопичення граничного рівня пошкодження, який визначає утомну міцність КМ;

$q(t)$ – середньоімовірнісне значення швидкості деградації за період реєстрації на атомно-молекулярному рівні в шарах 1, 2, 3 (рис. 1).

Середній час досягнення граничного рівня пошкодження поверхневого шару m_T і дисперсію часу її досягнення σ_T^2 можна знайти так:

$$m_T = \int_0^n tq(t)dt, \sigma_T^2 = \int_0^n t^2 q(t)dt - m_T^2. \quad (24)$$

Даний підхід до визначення ресурсу конструкційного матеріалу справедливий для лінійної моделі накопичення пошкоджень на атомно-молекулярному рівні (дефекти 1-го типу).

Зародження дефектів типу тріщина (дефекти 2-го типу), відбувається при критичному накопиченні дефектів 1-го типу. У цьому випадку об'єднання дефекту 1-го типу в формі структурно фазових перетворень [34] і формування субмікроскопічних, а в подальшому і макроскопічних тріщин, призводить до пітінгового руйнування, тобто до закінчення ресурсу конструкційного матеріалу (точка переходу від лінійної ділянки до нелінійної, рис. 2).

Особливості зміни параметрів міцності конструкційних матеріалів (зменшення міцності атомних зв'язків) реєструється в одиницях параметрів АЕ з переходом від лінійного закону до нелінійного.

Для нелінійної моделі накопичення пошкоджень математичне очікування $m_z(t)$ і дисперсія міри пошкодження $\sigma_z^2(t)$ відповідно дорівнюють:

$$m_z(t) = z_0 \exp \left\{ \left(m_1 + \frac{\sigma_1^2}{2} \right) t \right\}; \quad (25)$$

$$\sigma_z^2(t) = m_z^2(t) \left\{ \exp(\sigma_1^2) - 1 \right\}, \quad (26)$$

де m_1 – математичне очікування $\ln z$ $m_1 = M(\ln z)$;

σ_1^2 – дисперсія $\ln z$ $\sigma_1^2 = D(\ln z)$;

z_0 – параметр, що визначає початкове пошкодження.

Таким чином, метод АЕ дає інструмент кількісної оцінки показників кінетики розвитку пошкоджень в умовах контактної утомної зношування при проведенні прискорених випробувань. Ця теоретична модель прискорених випробувань на контактну міцність потребує експериментального підтвердження.

Так, попередні експериментальні дослідження при проведенні прискорених випробувань на втомну міцність зразків за методикою, викладеною у [18] показали, що діаграма запису параметру АЕ за ча-

сом випробувань містить дві ділянки: перша – демонструє лінійну залежність збільшення рівню пошкоджуваності, а на другій ділянці – нелінійна залежність за рахунок поєднання дефектів та формування великих часток зносу, характерних для пittingових явищ (рис. 2), що повністю підтверджує запропоновану модель та дає основу для проведення комплексних порівняльних досліджень різних матеріалів згідно запропонованого критерію утомної міцності – питомою енергією руйнування за один цикл навантаження $\bar{E}_{\text{пум}}$ (4).

Висновки

Таким чином, у роботі було розроблено структурно-енергетичну модель прискореної оцінки показників контактної утомної міцності матеріалів. Зроблений з її допомогою теоретичний аналіз контактної взаємодії дає підтвердження правомірності розробленої раніше у роботі [18] методики прискорених випробувань при оцінці утомної міцності поверхонь, зміцнених різними методами.

Аналіз структурно-енергетичного балансу енергії поверхневого шару в умовах контактної взаємодії дозволив сформулювати критерії утомної міцності матеріалів: питома енергія руйнування за один цикл навантаження. Сформульовано умови проведення прискорених випробувань на контактну втомну міцність: імпульсне навантаження до максимальних величин з реєстрацією кількості циклів до настання утомного пошкодження.

Встановлено, що основним фактором, який впливає на утомну контактну міцність конструкційних матеріалів є коефіцієнт дисипації енергії, який є константою для кожного з матеріалів.

Кінетика розвитку пошкоджуваності поверхневого шару на графіку закономірності зміни міри пошкодження складається з лінійної та нелінійної ділянок накопичення пошкоджень та може бути математичним очікуванням та дисперсією на цьому графіку. Оцінка ресурсних показників матеріалу виконується за кількістю циклів до переходу від лінійної ділянки на графіку (рис. 2) до нелінійної.

Список літератури

1. Gromakovsky D. G., Kovshov A. G., Ibatullin I. D., Dynnikov A. V. Problems of Kinetics of Surface Destruction. Proceedings of VII-th International Symposium "INTERTRIBO 2002". Stara Lesna : House of Technology, 2002. P. 57-58.
2. Ибатуллин И. Д. Кинетика усталостной повреждаемости и разрушения поверхностных слоев : монография. Самара : СГТУ, 2008. 387 с.
3. Ибатуллин И. Д. Диагностика ресурсных характеристик элементов машин. *Вестник Самарского государственного университета*. 2002. № 15. С. 123-130.
4. Направленное формирование свойств изделий машиностроения / Васильев А. С., Дальский А. М., Золотаревский Ю. М., Кондаков А. И. Москва : Машиностроение, 2005. 352 с.
5. Bhushan B. Nanotribology and Nanomechanics an Introduction. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 2005. 1148 p.
6. Беркович И. И., Громаковский Д. Г. Трибология. Физические основы, механика и технические приложения : учебн. для вузов. Самара : СГТУ, 2000. 268 с.
7. Федоров С. В. Общие закономерности эволюции трения с позиций самоорганизации и синергизма. В кн.: *Известия Киевского государственного технического университета*. 2007. № 11. С. 22-31.
8. Федоров В. В. Термодинамические аспекты прочности и разрушения твердых тел. Ташкент : ФАН, 1979. 186 с.
9. Артемов И. И., Савицкий В. Я., Сорокин С. А. Моделирование изнашивания и прогнозирование ресурса трибосистем : монография. Пенза : ПГУ, 2004. 374 с.
10. Amiri M., Khonsari M.M. On the thermodynamics of friction and wear – a review. *Entropy*. 2010. Vol. 12. P. 1021-1049.
11. Yunhui M., Dehua T., Xicheng W., Li Qinghua. Research on friction-coatings with activated ultra-thick tin-base. *Advanced Tribology*. 2010. No. 2. P. 915-919.
12. Filonenko S. F., Stadnichenko V. N., Troshin O. N. Research of influence of thermal resistance of elements of tribosystem on wearproofness of friction units. *Safety in aviation and space technology. Aviation in the XXI-st century : Proceeding of the fourth world congress*. 2010. Vol. 1. P. 12.1-12.4.
13. Запорожец В. В., Стадніченко В. Н. Идентификация наноизносных режимов трения с использованием метода акустической эмиссии. *Технологические системы*. 2012. № 4. С. 42-56.
14. Трошин О. Н., Стадніченко Н. Г., Джус Р. Н., Гуринов О. А. Информативное содержание метода акустической эмиссии для безразборной диагностики узлов авиационной техники. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2013. № 2(11). С. 80-83.
15. Стадніченко В. Н., Трошин О. Н., Стадніченко Н. Г., Приймак А. В., Просяник И. И. Классификация видов наноизноса по значению коэффициента диссипации подводимой внешней энергии к трибосистеме. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*. 2011. № 1(27). С. 51-61.
16. Арнольд В. И. Теория катастроф. Москва : Наука, 2000. 128 с.
17. Джус Р. М., Стадніченко М. Г., Попов В. В., Плешкунов С. А., Семенов С. Я. Порівняльна оцінка технологічних методів цементації та іонно-плазмового азотування при їх використанні для зміцнення високонавантажених вузлів АТ. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2020. № 2(39). С. 54-61.

18. Стадніченко В. М., Джус Р. М., Плешкунов С. А. Методика прискореної оцінки показників втомної пошкоджуваності конструкційних матеріалів. *Системи озброєння і військова техніка*. 2019. № 2(58). С. 122-131. <https://doi.org/10.30748/soivt.2019.58.15>.
19. Джус Р. М., Стадніченко М. Г., Стадніченко В. М., Плешкунов С. А. Мікроструктурні та фазові особливості поверхневого шару, зміцненого іонно-плазмовим азотуванням, як фактор підвищення втомної міцності. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*. 2020. № 1(63). С. 89-95.
20. Джус Р. М., Стадніченко М. Г., Плешкунов В. М., Градиський Ю. О. Порівняльний аналіз параметрів зносостійкості зразків, зміцнених цементуванням та іонно-плазмовим азотуванням, працюючих в умовах багаточиклового зношування. *Проблеми тертя та зношування*. 2020. № 3(88). С. 87-98. [https://doi.org/10.18372/0370-2197.3\(88\).14922](https://doi.org/10.18372/0370-2197.3(88).14922).
21. Могильная Е. П., Дубасов В. М. Ионное азотирование изделий из конструкционной стали 38ХМФА. *Ресурсо-зберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні*. 2013. № 1. С. 193-198.
22. Kemmer H. A. Investigation of the friction behavior of automotive brakes through experiments tribological modeling. *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 1998. № 5. С. 113-122.
23. Костик К. О. Порівняльний аналіз впливу газового та іонно-плазмового азотування на зміну структури і властивості легованої сталі 30ХЗВА. *Вісник Національно-технічного університету Харківського політехнічного інституту*. 2014. № 48(1090). С. 21-41.
24. The method of ion-plasma precision nitriding of the surfaces of metal products: pat. 2555692 Russian Federation : C23C8/36 (H01J 37/00), C23C14/48; stated 27.12.14; publ. 10.07.15, Bull. No. 19. 13 p.
25. Gromakovsky D. G., Malyarov A. N., Samarin Y. P. Modelling and Wear Calculation on Friction : Abstracts of Papers of the World Tribology Congress. Bath : Bookcraft Limited, 1997. 462 p.
26. Погодаев Л. И., Ежов Ю. Е., Сергеева Л. Л., Касьянова Н. Р. Структурно-энергетические модели поведения (надежности) материалов при импульсном нагружении. *Трение, износ, смазка*. 2013. № 57(15). С. 68-70.
27. Федоров В. В. Кинетика повреждаемости и разрушения твердых тел. Ташкент : ФАН, 1985. 168 с.
28. Владимиров В. И. Проблемы физики трения и изнашивания. *Трение, износ, смазка*. 2008. № 2(10). С. 7-31.
29. Татаркина И. С. Повышение эксплуатационных свойств ресурсопределяющих деталей и технологических характеристик материала модифицированием поверхности, включая наноструктурирование : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.01. Харків, 2015. 143 с.
30. Стадніченко М. Г., Фененко О. О., Варваров В. В. Методика прогнозування ресурсу конструкційних матеріалів силових елементів планера летального апарату військового призначення. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2016. № 1(22). С. 41-45.
31. Анипко О. Б. Фененко О. А. Дефекты стыковочной ленты узла крепления киля к подкилевой надстройке и физико-химические процессы, приводящие к ним. *Интегрированные технологии и энергосбережение*. 2014. № 4. С. 96-102.
32. Хромов С. П., Петросян М. А. Метеорология и климатология. Москва : Наука, 2006. 582 с.
33. Tazbaz O. D., Wood R. J. K. Electrostatic monitoring of oil lubricated sliding point contacts for early detection of scuffing. *Wear*. 1999. No. 230(1). P. 86-97.
34. Кочаров Э. А., Олешко В. С. Энергосберегающая технология контроля прижогов титановых лопаток компрессоров газотурбинных двигателей по флуктуациям работы выхода электрона. *Труды Военно-воздушной инженерной академии им. Н. Е. Жуковского*. 2008. № 4(80). С. 73-76.
35. Стадніченко М. Г., Фененко О. О., Варваров В. В. Методика прогнозування ресурсу конструкційних матеріалів силових елементів планера літального апарату військового призначення. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2016. № 1(22). С. 41-45.
36. Болотин В. В. Ресурс машин и конструкций. Москва : Машиностроение, 1990. 448 с.

Надійшла до редколегії 08.11.2021

Схвалена до друку 14.12.2021

Відомості про автора:

Плешкунов Сергій Анатолійович
старший викладач
Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-0733-4535>

Information about the author:

Serhii Pleshkunov
Senior Lecturer
of Ivan Kozhedub Kharkiv
National Air Forces University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-0733-4535>

СТРУКТУРНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УСКОРЕННОЙ ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КОНТАКТНОЙ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ МАТЕРИАЛОВ

С.А. Плешкунов

В статье представлены результаты моделирования работы поверхностного слоя образцов из стали 20Х3МВФ, упрочненных традиционным цементированием и новым ионно-плазменным азотированием по технологии АВНИИТ N (АО "ФЭД", г. Харьков, Украина). Разработана модель поведения этих трибосопряжений при ускоренных эксперимен-

тальных испытаниях на контактную усталостную прочность, проведенных авторами. Анализ структурно-энергетического баланса энергии поверхностного слоя в условиях контактного взаимодействия позволил сформулировать критерии усталостной прочности материалов: удельная энергия разрушения за один цикл нагрузки.

Ключевые слова: усталостная прочность, упрочнение поверхностей трения цементацией, энергетический баланс материала, упрочнение поверхностей трения азотированием, ионно-плазменное азотирование, импульсная нагрузка, технология упрочнения АВИНИТ N.

STRUCTURAL-ENERGY MODEL OF ACCELERATED EVALUATION OF CONTACT TIRED STRENGTH OF MATERIALS

S. Pleshkunov

The article presents the results of modeling the surface layer of 20H3MVФ (20X3MBФ) steel hardened by traditional cementing and new ion-plasma nitriding using AVINIT N technology (FED JSC, Kharkiv, Ukraine). A model of the behavior of these tribocouples during accelerated experimental tests for contact fatigue strength conducted by the authors has been developed. The analysis of the structural and energy balance of the energy of the surface layer in the conditions of contact interaction allowed to formulate the criteria of fatigue strength of materials: specific energy of destruction for one cycle of loading. Previous experimental studies in accelerated tests on the fatigue strength of samples showed that the diagram of the recording of the acoustic emission parameter over the test time contains two sections: the first - shows a linear relationship of increasing the level of damage, wear, characteristic of pitting phenomena. The conditions for conducting accelerated tests on contact fatigue strength using the method of acoustic emission: pulse load to the maximum values with the registration of the number of cycles before the onset of fatigue damage. It is established that the main factor influencing the fatigue contact strength of structural materials is the energy dissipation coefficient, which is a constant for each of the materials. The kinetics of the development of the surface layer damage on the graph of the regularity of the change in the degree of damage by the acoustic emission parameter consists of linear and nonlinear areas of damage accumulation and can be a mathematical expectation and variance on this graph. Estimation of resource indicators of material is carried out on number of cycles before transition from a linear site on this schedule to nonlinear. It is established that the method of acoustic emission is defined as a tool for quantitative assessment of the parameter of fatigue damage - the critical number of cycles of contact interaction at the time of destruction of the surface layer.

Keywords: fatigue strength, hardening of friction surfaces by cementation, energy balance of material, hardening of friction surfaces by nitriding, ion-plasma nitriding, impulse loading, AVINIT N hardening technology.