

В.М. Стадниченко<sup>1</sup>, Р.М. Джус<sup>2</sup>, С.А. Плешкунов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Національний авіаційний університет, Київ

<sup>2</sup>Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

## МЕТОДИКА ПРИСКОРЕНОЇ ОЦІНКИ ПОКАЗНИКІВ ВТОМНОЇ ПОШКОДЖУВАНOSTI КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

У статті представлені результати розробки прискореної методики оцінки на порівняння контактної втомної міцності при проведенні випробувань при терті кочення з проковзуванням поверхонь, зміцнених традиційною газовою цементациєю і плазмовим азотуванням по технології АВІНІТ N (ЗАТ “ФЕД”). Робота проводилася на зразках, виготовлених з жароміцної сталі 20ХЗМВФ ГОСТ 20072.

**Ключові слова:** випробування, методика оцінки, втомна міцність, кочення з проковзуванням, технологія зміцнення, цементация, азотування, АВІНІТ N.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Проблема забезпечення надійності вузлів тертя торкається усіх етапів їх життєвого циклу: проектування, виробництва та експлуатації. Тому її рішення потребує системного підходу, що знайшло відображення у формуванні нового напрямку у практиці розробки та застосування технічних виробів – організації системи управління строком служби (ресурсом), в якому підставою для виведення об’єкта з експлуатації є не призначений ресурс, а фактичне досягнення ним граничного стану [1].

У якості універсальної бази для опису зміни стану поверхневого шару можна прийняти структурно-енергетичну теорію, у якій критичний стан матеріалу пов’язаний з досягненням щільності внутрішньої енергії системи величини енергії активації руйнування, при якій дисипативна система переходить до точки біфуркації [2].

Згідно сучасним уявленням про руйнування твердих тіл, енергію активації руйнування можна розглядати як практичну характеристику міцності матеріалу.

Не дивлячись на те, що енергетичні методи оцінки параметрів зношування застосовуються у трибології більше ніж півсторіччя, до цих пір експериментальні дослідження зміни накопиченої енергії поверхневих шарів в процесі зношування практично не проводилися – не було відповідних методик та технічних засобів.

Цю проблему можна вирішити за допомогою методу контролю, оснований на аналізі параметрів сигналів акустичної емісії, які поступають безпосередньо із зони тертя [3].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Досягнення в області втомної міцності широко узагальнені в роботі [4]. Зараз у літературі велике місце

відводиться обзорним трудам, створенню різноманітних класифікацій та критеріїв оцінки триботехнічних характеристик матеріалів, насамперед на методику проведення порівняльних випробувань на втомну зносостійкість [4–6]. Втомне зношування в даних роботах характеризується існуванням скритого латентного періоду, впродовж якого відсутнє видиме руйнування матеріалу поверхневого шару, але відбувається поступове накопичування дефектів [5–7]. При досягненні певної концентрації мікропошкоджень настає фаза швидкого руйнування, коли “втомлений” матеріал поверхневого шару диспергується (перетворюється) у вигляді часток зносу [8].

У роботі [9] В.В. Федоров вперше показав, що щільність внутрішньої енергії є одностаійною інтегральною характеристикою термодинамічного стану матеріалу поверхневого шару. При цьому основну роль у пошкодженості відводилася прихованій енергії пластичної деформації, на наявність якої вперше вказав Хорт ще у 1906 році [4].

Основною проблемою енергетичної теорії руйнування, що оперує подібними параметрами пошкодженості, є те, що вони за своєю природою неспостерігаємі [9–12]. Сучасний розвиток неруйнівних методів контролю, а саме методу акустичної емісії (АЕ) [3; 13–14], дозволив контролювати процеси як мало-, так і багатоциклової втоми на усіх етапах розвитку. Це і дало практичні основи для розробки методики прискореної оцінки показників втомної пошкодженості.

**Мета статті.** Актуальність даної роботи обумовлена рішенням ДП “Антонов” про розробку дослідних зразків приводів генераторів для літаків сімейства Ан-148/158/178 зі збільшеним до 12000 годин ресурсом без ремонту, що потребувало заміни традиційного методу зміцнення зубів шестерень цементациєю на новий, більш досконалий метод зміцнення – іоноплазмові азотування. Для цього вини-

кла необхідність у проведенні комплексних досліджень на втому. Традиційні випробування потребують довгого терміну, який неможливо провести у стислі строки, які визначені рішенням ДП Антонов №ГП21КМ/П.002/36-17 від 22.09.2017.

**Метою роботи** є розробка методики прискореної оцінки показників контактної втомної міцності при проведенні випробувань конструкційних матеріалів при терті кочення з проковзуванням.

## Виклад основного матеріалу

Практика показує, що моделі поверхневого руйнування, в яких не закладена теоретична база, заснована на фундаментальних законах термодинаміки, фізики міцності, механіки деформованого твердого тіла та ін., мають досить обмежену сферу застосування і в інженерних розрахунках і при проведенні експериментальних досліджень.

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 і буде відходити з об'єму матеріалу.

Таким чином можна визначити збуджений стан як деяку багатомасштабну дисипативну структуру, яка утворюється під дією енергетичних впливів ззовні, має кінетичні та механічні властивості, відмінні від квазірівноважених, і яка релаксує досить швидко після зняття зовнішніх впливів.

На рис. 1 приведена схема структурної побудови поверхневого шару сталі, яка зазнає імпульсного навантаження при переведенні трибосистеми в збуджений стан. У відповідності з даними роботи [15], 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 визначальною в їх контактній витривалості (втомній міцності). Відомо [5, 16–17], 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 активуємої 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 трибосистеми (ТС). Одним з таких механізмів є накопичення пошко-

джуваності (рис. 1). 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 багаточисловому режимі [9].

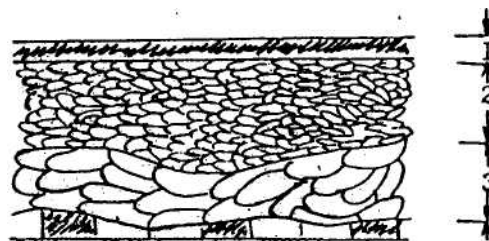


Рис. 1. Схема мікроструктурної організації поверхневого шару матеріалів трибосистеми за умов тертя з великими контактними навантаженнями:  
1 – шар перенесення (вторинної структури),  
2 – дрібноосередкова фрагментована структура,  
3 – структура з нерівновисніми осередками

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, на основі викладеного вище, було сплановано експеримент, який передбачав реалізацію імпульсного навантаження трибосистеми на першому етапі її роботи з одночасною реєстрацією акустико-емісійного випромінювання.

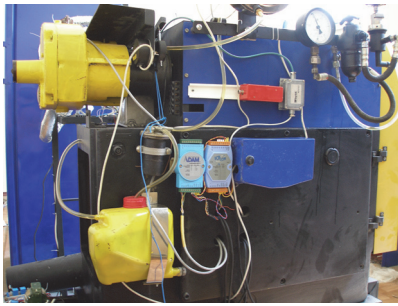
Випробування проводилися на порівняння контактної втомної міцності при терті кочення з проковзуванням поверхонь, зміцнених традиційною газовою цементацією і плазмовим азотуванням по технології АВІНІТ N (ЗАТ «ФЕД»).

У даній роботі, після проведення модернізації машини тертя, вдалося досягти контактних навантажень, що дозволяють оцінити відносну контактну втому при циклічних навантаженнях в умовах кочення з проковзуванням.

У цих дослідженнях зразки зі зміцненням цементацією прийняті за еталон. В основі планування експерименту покладено структурно-енергетичну модель втомного руйнування, запропоновану В.В. Федоровим [9].

Випробування, проведені в Харківському національному університеті Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, на підставі договору про науково-технічне співробітництво з підприємством ЗАТ «ФЕД» від 2004 року, а також по співпраці з АТ «Мотор Січ» у рамках інноваційного регіонального аерокосмічного кластеру «Мехатроніка».

Випробування проводили на вдосконаленій машині тертя 2070 СМТ-1 (рис. 2, а; б).



а



б

Рис. 2. Зовнішній вигляд вдосконаленої машини тертя 2070 СМТ-1: а – блоки автоматизації режимів тертя; б – електромеханічний навантажувачий пристрій

Схема випробувань “диск-диск”. Змащення здійснювалося маслом М-8В ГОСТ 10541 шляхом занурення нижнього зразка в масляну ванну. Масло, яке захоплюється нижнім зразком, надійно утримується на його поверхні, потрапляє в контактну область і при русі формує масляний клин в зазорі між хвилеводом і нижнім зразком (рис. 3).

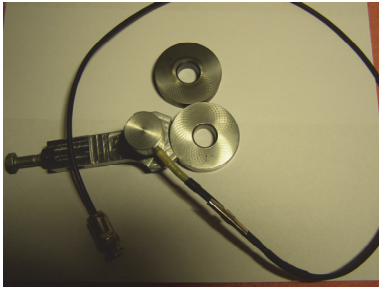


Рис. 3. Зовнішній вигляд зразків і хвилеводу з датчиком прийому сигналів акустичної емісії через масляний клин

Удосконалення машини тертя 2070 СМТ-1 полягала в підвищенні величини навантаження, яку можна прикласти до випробуваних зразків шляхом зміни кріплення важеля каретки і в автоматизації процесу зміни навантаження. За рахунок цього вдалося підвищити величину навантаження до 4500 Н. Форма хвилеводу забезпечує утримання необхідної кількості мастила і його безперервну подачу в контактну область. Прийом сигналів АЕ здійснювався через масляний клин між хвилеводом і нижнім зразком (рис. 4).

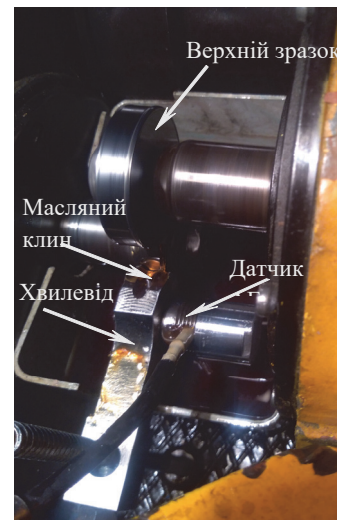
З метою управління величиною навантаження, прикладеного до трибосистеми, серійна машина тертя 2070 СМТ-1 була доукомплектована модулем управління величиною навантаження [13–14]. А також електромеханічним пристроєм зміни величини навантаження, прикладеного до ТС, що дозволяє здійснювати автоматичну зміну навантаження в широкому експлуатаційному діапазоні: 0...5000 Н (рис. 2, б).

Температуру в зоні контакту вимірювали пірометром “Нимбус-760”.

Об'єктами випробувань були зразки у вигляді дисків діаметром 50 мм і висотою 12 мм – стандартні для машин тертя СМЦ-2 і 2070 СМТ 1 (рис. 2).



а



б

Рис. 4. Загальний вигляд контактної взаємодії при випробуваннях: а – зразків; б – хвилеводу

Випробували зразки з одного матеріалу – сталь 20Х3МВФ ГОСТ 20072-74. Марка матеріалу обрана з умови, що дана сталь може зміцнюватися як цементацією, так і азотуванням.

Для порівняння контактуючі поверхні зразків були зміцнені:

- газовою цементацією за традиційною технологією, шліфовані після загартування;
- азотуванням “АВІНІТ N” за технологією ЗАТ “ФЕД” [18].

Випробувано по чотири однойменних пари тертя.

Умови випробувань:

- швидкість обертання ведучого зразка – 500 об/хв;
- прослизання між зразками – 20%;
- абсолютне навантаження – 4500 Н (розрахункове питома контактне навантаження  $\sigma_{\max}=1140$  МПа), швидкість навантаження – 450 Н/с;
- час досягнення навантаження – 10 секунд;
- час випробувань – до моменту збільшення амплітуд акустичної емісії більш ніж в 10 разів, імовірно, до початку первинних проявів втомного руйнування.

Сутність технології зміцнюючого іоноплазмового азотування “АВІНІТ N” полягає в тому, що на поверхні виробу формується азотований шар зі стабільно рівноважною мікроструктурою без тендітної поверхневої структури і, як наслідок, збільшується твердість, відсутнє викривлення виробів, забезпечується збереження вихідних геометричних розмірів при одночасному прискоренні азотування в 3 – 5 разів [18].

Головною перевагою, яка декларується в патенті і вимагає підтвердження, є можливість отримання спеціальної контрольованої структури поверхневих шарів металів для конкретних умов роботи трибосистем. 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) [4]:

- а) розриви адгезійних зв'язків між поверхнями;
- б) релаксація пружних напружень від взаємодіючих нерівностей поверхонь (тобто перехід пружних напружень в довгохвильові фонони);
- в) перетворення енергії механічного впливу в теплову (80 ... 90%);
- г) релаксація напружень в результаті пластичних деформацій по дислокаційній механізми [4].

Загальні потоки енергії через поверхневі шари досить великі. Якщо в нашому випадку прийняти товщину шару для азотованих і цементованих зразків рівній  $H \approx 0,2$  мм, а напруга тертя  $\sigma \approx 1400$  МПа, то при швидкості зсуву  $V_{tr} \approx 0,65$  м/с питома потужність енергії, що дисипується, після імпульсного навантаження буде близько:

$$\frac{P}{V} = \frac{\sigma V_{tr}}{H} \approx 10^9 \text{ Дж} / \text{м}^3 \text{с}. \quad (1)$$

При пластичній деформації поверхні шарів після імпульсного навантаження частка накопиченої енергії за даними джерела [9] не перевищує 30%.

Енергія, накопичена в цьому шарі, не перевищує енергію зв'язку атомів  $E_{\max}$  ( $\sim 10^{11}$  Дж/м<sup>3</sup> теоретична міцність [1; 4; 9]).

Якщо навіть невелика частка цієї енергії перейде в приховану (латентну) [9], яку накопичила структура поверхневого шару (рис. 4), то матеріал переходить в збуджений стан. Для розглянутих умов імпульсних контактних впливів такий стан може привести до наступних ефектів.

1) На зразках, збільшених азотуванням, збільшення ступеня і швидкості деформації створюють умови переходу структури з кристалічного в аморфний стан. Зовнішнє тертя призводить до аморфізації поверхневого шару атомами азоту з утворенням нових, в тому числі, нерівноважних фаз.

Слід очікувати, що для азотованих поверхонь припинення зовнішнього впливу буде приводити до швидкої перебудови структури, а отже – до релаксації залишкових і діючих напружень. Це і буде головною відмінністю каналів дисипації зовнішньої підведеної при терті енергії для цементованих і азотованих зразків.

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

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

Дана гіпотеза ґрунтується на структурно-енергетичній теорії міцності, по якій В.В. Федоров [9; 19] запропонував таку умову руйнування в інтегральному вигляді:

$$u = u_0 + u(t_*) = u_0 \int_0^{t_*} \dot{u} dt = u^* = const, \quad (2)$$

де  $u$  – деякий параметр пошкоджуваності;

$t_*$  – час до руйнування.

В даному виразі пошкоджуваність матеріалу розділена на дві частини: спочатку властивість  $u_0$  накопичується в плінні часу  $t_*$  зі швидкістю  $\dot{u}$ . З цих позицій мірою пошкодження можна вважати відношення  $\omega = u(t)/u^*$ , яке дорівнює 1 в момент руйнування.

Як вже відмічалось, основною проблемою теорій руйнування, що оперують подібними параметрами пошкоджуваності, є те, що вони за своєю природою неспостерігаємі [9; 19]. Для експериментальної перевірки і обґрунтування даних критеріїв необхідно, щоб параметр  $u$  мав фізичний зміст конкретної властивості матеріалу і його можна було б об'єктивно виміряти в процесі його пошкоджуваності.

Ґрунтуючись на основних положеннях енергетичної теорії, фізичний зміст параметра пошкоджуваності  $u$  можна уявити як питому потужність дисипованої енергії за один цикл навантаження  $E_{\text{ц}}$  в межах часу  $t_*$ , тобто по суті це критерій, що оцінює дисипацію енергії руйнування, накопичену за цей

час  $t_*$ , основна роль в якій відводиться прихованій енергії пластичної деформації [9; 15].

На підставі цього, нами запропонована методика прискореної порівняльної оцінки показників втомної міцності ТС при коченні з проковзуванням з використанням методу АЕ. На першому етапі даної методики проводять імпульсне навантаження до гранично можливих значень і реєструють діаграму зміни сигналів АЕ до початку втомного руйнування (амплітуда АЕ зростає до значень більше 100 відн.од.).

На другому етапі визначають кількість циклів до початку втомного руйнування. На третьому етапі визначають різницю між величиною енергії зв'язку атомів в шарі  $E_{\max}$  (вона менше за  $10^{11}$  Дж/м<sup>3</sup>) і питомою потужністю дисипованої енергії. Ця різниця є еквівалентом параметра пошкоджуваності  $u$ . У відповідності з цим, нами запропоновано оцінювати втомну міцність питомою енергією руйнування за один цикл навантаження:

$$\bar{E}_{\text{пит}} = \frac{E_{\max} - (E_0 + E_{\text{імп}})}{n_{\text{ц}}}, \quad (3)$$

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

$E_{\max}$  – максимальна питома енергія, при якій матеріал руйнується;

$E_{\max} = \text{const} = 10^{11}$  Дж/м<sup>3</sup> (для матеріалів з близькими фізико-механічними властивостями) [9];

$E_0$  – початкова питома енергія руйнування від дефектів, закладених при виготовленні деталі;

$E_{\text{імп}}$  – питома енергія імпульсного навантаження;

$n_{\text{ц}}$  – кількість циклів до початку втомного руйнування.

Для вирішення проблеми реєстрації кількості циклів до втомного руйнування, як це прийнято при втомних випробуваннях конструкційних матеріалів, нами використана акустико-емісійна інформаційно-діагностична система (рис. 5), принципи якої викладені в роботах [3; 13–14].

Розглянемо результати прискорених випробувань на втомну міцність.

У процесі проведення випробувань встановлено, що кожен цикл випробувань складається з трьох характерних етапів:

- перший – етап навантаження;
- другий – вихід на сталий режим накопичення пошкоджень в поверхневому шарі;
- третій – перехід до початкових руйнувань втомного характеру.

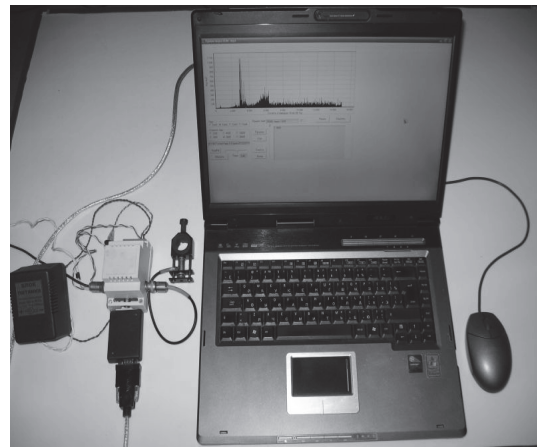


Рис. 5. Акустико-емісійна інформаційно-діагностична система

Усереднені результати кількості циклів до початку явищ втомного руйнування та триботехнічні параметри для чотирьох пар зразків, зміцнених цементацією та азотуванням, наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Кількість циклів до початку втомного руйнування та триботехнічні параметри для чотирьох пар зразків

Вид зміцнення зразків		Коефіцієнт тертя / середньо-поверхнева температура, °С		Кількість циклів до початку явищ втомного руйнування
Ведучого	Веденого	На початку випробувань	В кінці випробувань	
Цементация	Цементация	0,054/43	0,045/45	53812
Азотування "АВІНІТ N"	Азотування "АВІНІТ N"	0,08/50	0,063/52	97875

Після імпульсного навантаження зовнішні прикладені сили втратили роль причини руйнування і стали лише його умовою, необхідною для запуску внутрішніх дисипативних механізмів.

Роботу по руйнуванню поверхневого шару здійснюють внутрішні сили, що сформувалися в результаті обміну енергією дисипативної системи з

навколишнім середовищем.

Вигляд діаграми акустико-емісійного випромінювання при випробуваннях пар зразків, зміцнених цементацією та азотуванням представлені на рис. 6, а; рис. 6, б).

Розглянемо результати металографічних досліджень.



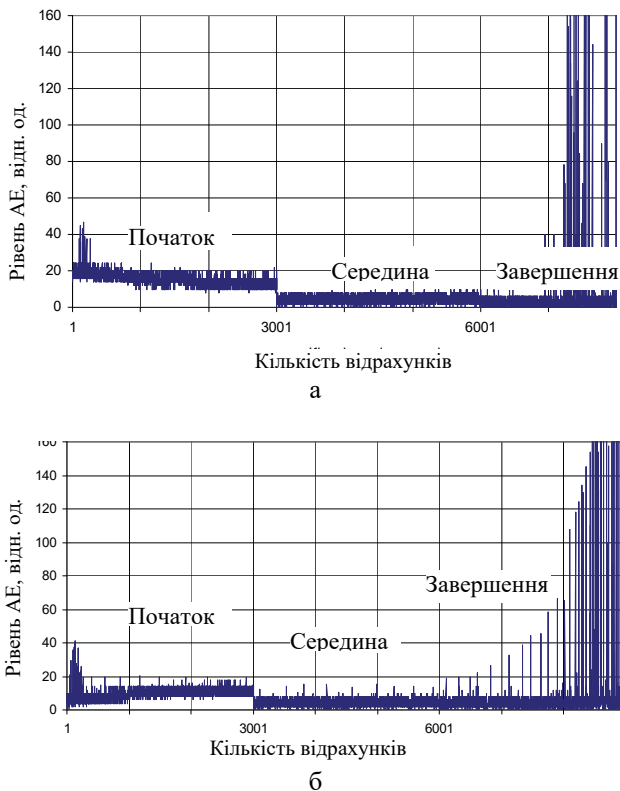


Рис. 6. Характер зміни діаграми спектральної потужності АЕ при випробуваннях на багатоциклово втому: а – цементация; б – азотування

Після випробувань робочі поверхні всіх зразків оцінені під збільшенням  $\times 500$ . Відібрано зразки, які працювали парно, з найхарактернішими і великими пошкодженнями. Зображення пошкоджень поверхонь після випробувань представлені на рис. 7–9. Подальші дослідження цих відібраних зразків проведені на обладнанні і фахівцями АТ “Мотор Січ”

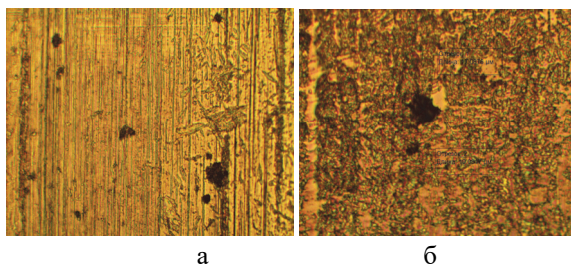


Рис. 7. Зображення пошкоджень після випробувань: а – ведучий; б – ведений

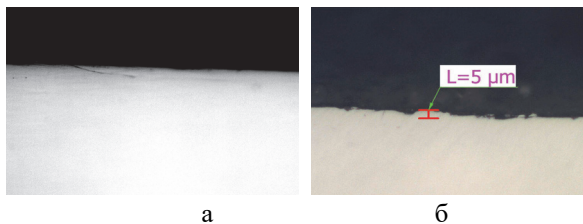


Рис. 8. Сліди викришування на зразку 3С з боку контактної поверхні: а – поздовжній шліф,  $\times 500$ ; б – поперечний шліф,  $\times 200$

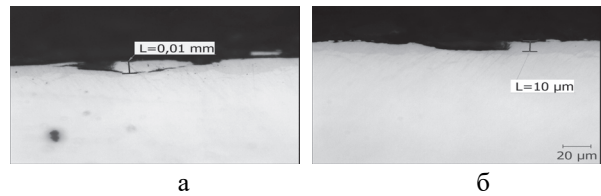


Рис. 9. Сліди викришування на азотованому зразку з боку контактуючої поверхні: а – поздовжній шліф,  $\times 500$ ; б – поперечний шліф,  $\times 500$

Встановлено, що вихідні рельєфи контактуючих поверхонь зразків з цементацией прикатані, на контактуючих поверхнях зразків з азотуванням проглядаються вихідні рельєфи попередньої обробки. На контактуючих поверхнях всіх зразків є множинні точкові раковини без випинання металу по контуру, ймовірно, представляють собою осередки втомного викришування. Мікроструктурними дослідженнями матеріалу зразків встановлено що:

- на цементованому зразку з боку контактуючої поверхні є виразкова тріщина і дрібні лунки від викришування, глибина яких становить  $\approx 0,005 \text{ mm}$  (рис. 8). Фактична глибина цементованого шару становить  $\approx 1,2 \text{ mm}$ .

- на азотованому веденому зразку з боку контактуючої поверхні є виразкова тріщина і орієнтовані по них лунки від викришування, глибина яких становить  $\approx 0,010 \text{ mm}$  (рис. 9). Фактична глибина азотованого шару становить  $\approx 0,2 \text{ mm}$  (рис. 10, а).

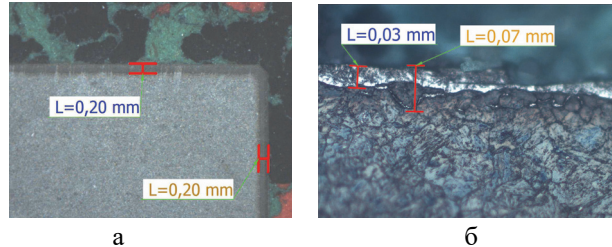


Рис. 10. Мікроструктурні дослідження поверхневого шару азотованих зразків:

- а – зразок ведений,  $\times 6,5$  шар азотування;
- б – зразок ведений,  $\times 500$ , мікроструктура шару азотування

Мікроструктура азотованого шару – в крайньому зовнішньому шарі є  $\xi$ -фаза товщиною  $\approx 0,03 \text{ mm}$ , а також прилеглі до неї великі надлишкові нітриди, глибиною залягання від поверхні  $\approx 0,07 \text{ mm}$  (рис. 10, б)). Далі по перетину азотований шар являє собою азотистий мартенсит відпускання, надлишкові нітриди фактично відсутні. Виконано визначення мікротвердості по перетину зміцнених шарів.

Результати представлені в таблицях 2 і 3. Ефективна глибина цементованого шару, відповідна 500 HV, становить  $\approx 1,15 \text{ mm}$ . Твердість серцевини веденого цементованого зразку – 39,5 HRC (табл. 2). Ефективна глибина азотованого шару, відповідна 500 HV, становить  $\approx 0,15 \text{ mm}$ . Твердість серцевини веденого азотованого зразка – 29 HRC (табл. 3).

Таблиця 2

Мікротвердість по перетину цементованого шару												
Зразок ведений	Відстань від поверхні, мм											
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
	мікротвердість, HV (HRN15)											
	671,5 (89)	658 (89)	656,5 (88,5)	610,5 (88)	597 (87,5)	546,5 (87)	535 (86)	535 (86)	524,5 (85,5)	513 (85,5)	512 (85,5)	478,5 (84)

Таблиця 3

Мікротвердість по перетину азотованого шару				
Зразок ведений 3А	Відстань від поверхні, мм			
	0,05	0,1	0,15	0,2
	мікротвердість, HV (HRN15)			
	821,5 (92)	801,5 (91,5)	501,5 (85)	402 (80,5)

Виконано фрактографічні дослідження точкових раковин без випинання металу по контуру за допомогою електронного мікроскопа зі збільшенням до  $\times 5500$ , в результаті якого по донцям раковин виявлені концентричні і ступінчасті лінії відпочинку, що є характерною ознакою руйнування по втомному механізму (рис. 11).

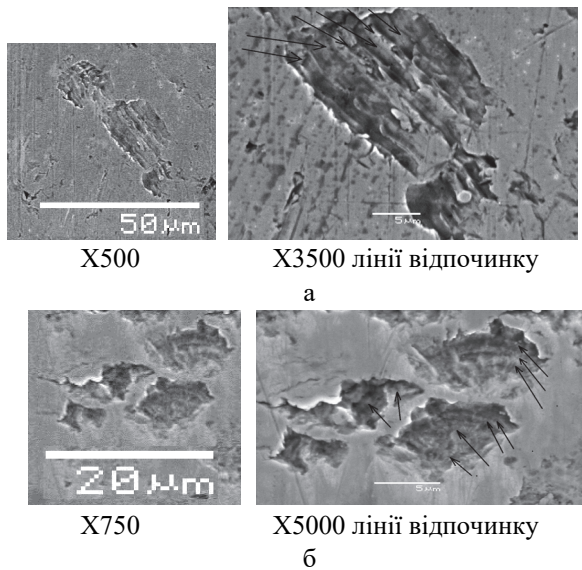


Рис. 11. Фрактографічні дослідження веденого цементованого зразку

## Висновки

Аналіз результатів прискорених випробувань і подальших досліджень зразків підтверджують правомірність підходів до проведення таких випробувань. Цей аналіз показує, що при питомому контакт-

тному навантаженні  $\sigma=1140$  МПа на робочих поверхнях всіх випробуваних зразків утворилися початкові осередки втомного викришування.

Метод акустичної емісії довів високу ефективність реєстрації моменту переходу трибосистем від нормального зносу до початкового втомного руйнування.

Кількість циклів до виникнення початкових осередків втомного викришування на зразках, які досліджувались, після випробувань на втомну міцність становлять:

1. Зразок ведений, зміцнений азотуванням "АВІНІТ N" глибиною 0,2 мм, відпрацював 97500 циклів.

Зразок ведений, зміцнений газовою цементациєю глибиною 1,2 мм, відпрацював 47000 циклів.

2. В середньому по чотирьох випробуваннях, пари зразків до утворення початкових осередків втомного викришування відпрацювали:

– зміцнені азотуванням "АВІНІТ N" – 97875 циклів;

– зміцнені газовою цементациєю – 53812 циклів.

3. Робочі поверхні ведених (загальмованих) зразків мають більш інтенсивні пошкодження, ніж ведучих зразків.

Таким чином, запропонована методика прискореної оцінки показників втомної пошкоджуваності конструкційних матеріалів істотним чином зменшує час експертної оцінки. Вона може бути використана при розробці нових конструкційних матеріалів та способів їх зміцнення.

## Список літератури

1. Problems of Kinetics of Surface Destruction / D.G. Gromakovsky, A.G. Kovshov, I.D. Ibatullin, A.V. Dynnikov // Proceedings of VII-th International Symposium "INTERTRIBO 2002", section B – Wear. – Slovak Republic, Stara Lesna: House of Technology, 2002. – P. 57.
2. Nicolis G. Exploring complexity: an introduction / G. Nicolis, I. Prigogine – New York: W.H. Freeman, 1989. – 313 p.

3. Чернявський В.М. Результаты застосування методу акустичної емісії для діагностування стану зразків ОВТ в експлуатації / В.М. Чернявський, Р.М. Джус, С.В. Степанов // Системи озброєння і військова техніка. – 2011. – № 4. – С. 105-108.
4. Ибатуллин И.Д. Кинетика усталостной повреждаемости и разрушения поверхностных слоев: монография / И.Д. Ибатуллин. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2008. – 387 с.
5. Крагельский И.В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
6. Основы трибологии (трение, износ, смазка) / А.В. Чичинадзе, Э.Д. Браун, И.А. Буше, И.А. Буяновский. – М.: Наука и техника, 1995. – 778 с.
7. Громаковский Д.Г. Система понятий и структура моделей изнашивания / Д.Г. Громаковский // Трение и износ. – 1997. – № 1(18). – С. 53-62.
8. Фляйшер Г. Энергетический метод определения интенсивности износа / Г. Фляйшер // Исследования по триботехнике. – М: НИИМАШ, 1975. – С. 277-291.
9. Федоров В.В. Термодинамические аспекты прочности и разрушения твердых тел / В.В. Федоров. – Ташкент: ФАН, 1979. – 186 с.
10. Тушкевич В.М. Физика: Проблемы. История. Люди / В.М. Тушкевич. – М.: Наука, 1986. – 132 с.
11. Amiri M. On the thermodynamics of friction and wear – a review / M. Amiri, M.M. Khonsari // Entropy. – 2010. – Vol. 12. – 2010. – P. 1021-1049.
12. Yunhui M. Research on friction-coatings with activated ultra-thick tin-base / M. Yunhui, T. Dehua, W. Xicheng. // Advances in Tribology. – 2010. – P. 915-919.
13. Запорожец В.В. Идентификация наноизносных режимов трения с использованием метода акустической эмиссии / В.В. Запорожец, В.Н. Стадниченко // Технологические системы. – 2012. – № 4. – С. 42-56.
14. Перспективи впровадження вбудованих систем контролю авіаційної техніки на основі методу акустичної емісії / В.М. Стадніченко, М.Г. Стадніченко, Р.М. Джус, О.О. Гурін // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – 2013. – № 2(35). – С. 33-37.
15. Владимиров В.И. Проблемы физики трения и изнашивания [Электронный ресурс] / В.И. Владимиров // Трение, износ, смазка. – 2008. – № 2(10). – С. 7-31. Режим доступа: <http://www.tribo.ru/>.
16. Gutowski P. Computational Model for Friction Force Estimation in Sliding Motion at Transverse Tangential Vibrations of Elastic Contact Support / P. Gutowski, M. Leus // Tribology International. – 2015. – № 1(90). – P. 455-462.
17. Starcevic J. Simulation of the influence of ultrasonic in-plane oscillations on dry friction accounting for stick and creep / J. Starcevic, A.E. Filippov // Physical Mesomechanics. – 2012. – № 3(15). – P. 330-32.
18. Sagalovich V.V. The method of ion-plasma precision nitriding of the surfaces of metal products / Sagalovich V.V., Sagalovich A.V., Patent 2555692, Russian Federation, C23C8/36 (H01J 37/00), C23C14/48, stated 27.12.2014; publ. 10.07.2015, Bull. No. 19, 13 p.
19. Федоров В.В. Кинетика повреждаемости и разрушения твердых тел / В.В. Федоров. – Ташкент: ФАН, 1985. – 168 с.

## References

1. Gromakovsky, D.G., Kovshov, A.G., Ibatullin, I.D. and Dynnikov, A.V. (2002), Problems of Kinetics of Surface Destruction, *Proceedings of VII-th International Symposium INTERTRIBO 2002, section B – Wear*, House of Technology, Stara Lesna, Slovak Republic, 57 p.
2. Nicolis, G. and Prigogine, I. (1989), *Exploring complexity: an introduction*, W.H. Freeman, New York, 313 p.
3. Cherniavskiy, V.M., Dzhus, R.N. and Stepanov, S.V. (2011), “Rezultaty zastosuvannya metodu akustychnoi emisii dlia diahnostuvannya stanu zrazkiv OVT v ekspluatatsii” [Results of the method of acoustic emission for the diagnosis of the state of samples of weapons and equipment in operation], *Systems of Arms and Military Equipment*, No. 4, pp. 105-108.
4. Ibatullin, I.D. (2008), “Kinetika ustalostnoy povrezhdaemosti i razrusheniya poverhnostnykh sloev: monografiya” [Kinetics of fatigue damage and destruction of surface layers: monograph], Samar. Gos. Tehn. Un-t, Samara, 387 p.
5. Kragelskiy, I.V., Dobychin, M.N. and Kombalov, V.S. (1977), “Osnoviyi raschetov na trenie i iznos” [Basics of calculations for friction and wear], Mashinostroenie, Moscow, 526 p.
6. Chichinadze, A.V., Braun, E.D., Bushe, I.A. and Buyanovskij, I.A. (1995), “Osnoviyi tribologii (trenie, iznos, smazka)”, [The basics of tribology (friction, wear, lubrication)], Nauka i Tehnika, Moscow, 778 p.
7. Gromakovsky, D.G. (1997), “Sistema ponyatiy i struktura modeley iznashivaniya”, [The system of concepts and the structure of wear models], *Friction and Wear*, No. 1(18), pp. 53-62.
8. Flyaysher, G. (1975), “Energeticheskiy metod opredeleniya intensivnosti iznosa” [Energy method for determining wear rate], Tribotech Research, NIIMASH, Moscow, pp. 277-291.
9. Fedorov, V.V. (1979), “Termodinamicheskie aspektyi prochnosti i razrusheniya tverdykh tel”, [Thermodynamic aspects of strength and destruction of solids], FAN, Tashkent, 168 p.
10. Tushkevich, V.M. (1986), “Fizika: Problemyi. Istoriya. Lyudi: Sb. statey”, [Physics: Problems. History. People: Coll. of articles], Nauka, Moscow, 132 p.
11. Amiri, M. and Khonsari, M.M. (2010), On the thermodynamics of friction and wear – a review, *Entropy*, Vol. 12, pp. 1021-1049.



12. Yunhui, M., Dehua, T., Xicheng, W. and Qinghua, L. (2010), Research on friction-coatings with activated ultra-thick tin-base, *Advances in Tribology*, pp. 915-919.
13. Zaporozhets, V.V. and Stadnichenko, V.N. (2012), "Identifikatsiya nanoiznosnyih rezhimov treniya s ispolzovaniem metoda akusticheskoy emissii" [Identification of nano-wear friction modes using the method of acoustic emission], *Technological Systems*, No. 4, pp. 42-56.
14. Stadnichenko, V.M., Stadnichenko, M.H., Dzhus, R.M. and Hurin, O.O. (2013), "Perspektivi vprovadzhennya vbudovanih sistem kontrolyu aviatsiynoyi tehniki na osnovi metodu akustichnoyi emisiiyi" [Perspectives of introduction of integrated systems of control of aviation engineering on the basis of acoustic emission method], *Scientific Works of Kharkiv National Air Force University*, No. 2 (35), pp. 33-37.
15. Vladimirov, V.I. (2008), "Problemy fiziki treniya i iznashivaniya" [Problems of friction and wear physics], *Friction, Wear, Grease*, No. 2(10), pp. 7-31, available at: [www.tribo.ru/](http://www.tribo.ru/) (accessed 22 March 2011).
16. Gutowski, P. and Leus, M. (2015), Computational Model for Friction Force Estimation in Sliding Motion at Transverse Tangential Vibrations of Elastic Contact Support, *Tribology International*, No. 1(90), pp. 455-462.
17. Starcevic, J. and Filippov, A.E. (2012), Simulation of the influence of ultrasonic in-plane oscillations on dry friction accounting for stick and creep, *Physical Mesomechanics*, No. 3(15), pp. 330-332.
18. Sagalovich, V.V. and Sagalovich, A.V. (2015), "Sposob ionno-plazmennogo pretsizionnogo azotirovaniya poverhnostey metallicheskih izdeliy" [The method of ion-plasma precision nitriding of the surfaces of metal products], Patent 2555692, Russian Federation, C23C8/36 (H01J 37/00), C23C14/48, stated 27.12.2014; publ. 10.07.2015, Bull. No. 19, 13 p.
19. Fedorov, V.V. (1985), "Kinetika povrezhdaemosti i razrusheniya tverdyih tel" [Kinetics of damage and destruction of solids], FAN, Tashkent, 168 p.

Надійшла до редколегії 30.04.2019

Схвалена до друку 18.06.2019

#### Відомості про авторів:

##### Стадніченко Вячеслав Миколайович

доктор технічних наук професор  
професор Національного авіаційного університету,  
Київ, Україна  
<https://orcid.org/0000-0003-3450-3899>

##### Джус Роман Миколайович

кандидат технічних наук  
старший науковий співробітник  
старший викладач  
Харківського національного університету  
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,  
Харків, Україна  
<https://orcid.org/0000-0002-7079-0912>

##### Плешкунов Сергій Анатолійович

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

#### Information about the authors:

##### Vyacheslav Stadnychenko

Doctor of Technical Sciences Professor  
Professor of National Aviation University,  
Kyiv, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0003-3450-3899>

##### Roman Dzhus

Candidate of Technical Sciences  
Senior Research  
Senior Instructor  
of Ivan Kozhedub Kharkiv  
National Air Forces University,  
Kharkiv, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-7079-0912>

##### Serhii Pleshkunov

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

## МЕТОДИКА УСКОРЕННОЙ ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ УСТАЛОСТНОЙ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

В.М. Стадніченко, Р.М. Джус, С.А. Плешкунов

В статье представлены результаты разработки ускоренной методики оценки на сравнение контактной усталостной прочности при проведении испытаний при трении качения с проскальзыванием поверхностей, усиленных традиционной газовой цементацией и плазменным азотированием по технологии АВНИТ N (ЗАО "ФЭД"). Работа проводилась на образцах, изготовленных из жаропрочной стали 20Х3МВФ ГОСТ 20072.

**Ключевые слова:** испытания, методика оценки, усталостная прочность, качение с проскальзыванием, технология укрепления, цементация, азотирование, АВНИТ N.

## METHOD OF ACCURACY ASSESSMENT OF PERFORMANCE INDICATORS OF CONSTRUCTION MATERIALS

V. Stadnychenko, R. Dzhus, S. Pleshkunov

*The article presents the results of the development of an accelerated evaluation method for comparing contact fatigue strength during tests with friction rolling with slipping of surfaces reinforced by traditional gas cementation and plasma nitriding using the technology AVINIT N (ZAT "FED"). The work was carried out on samples made of heat-resistant steel 20H3MVF GOST 20072. The urgency of the work is due to the decision of DP "Antonov" to develop prototype drives of generators for the aircraft An-148/158/178 with an increase of up to 12,000 hours without a repair resource, which required the replacement of the traditional method of strengthening the gear teeth cementation to a new, more advanced method of strengthening - ion-plasma nitriding. To do this, there was a need for comprehensive research on fatigue. Traditional trials require a long term, which cannot be carried out in a short time. The purpose of the work was to develop a method for accelerated assessment of contact fatigue strength when conducting tests of structural materials when slip friction with a slip. The analysis of the results of accelerated tests and further research of samples confirms the legitimacy of approaches to conducting such tests. This analysis shows that when the specific contact load  $\sigma = 1140$  MPa on the working surfaces of all tested samples formed the initial cells of fatigue excitation. The method of acoustic emission proved the high efficiency of recording the transition moment of tribosystems from normal wear to initial fatigue failure. Thus, the proposed method of accelerated evaluation of the indicators of fatigue damage to structural materials substantially reduces the time of expert evaluation in the design of new structural materials and ways to strengthen them.*

**Keywords:** *accelerated estimation technique, fatigue strength, rolling with a slip, rolling test, accelerated test methods, strengthening of friction surfaces by cementation, strengthening of friction surfaces by nitriding, strengthening of AVINIT N.*