

УДК 620.178.15

А. Лебедєв¹, докт. техн. наук; Є. Голубовський², докт. фіз.-мат. наук; О. Локощенко³, докт. фіз.-мат. наук; М. Музика¹, канд. техн. наук; В. Ламашевський¹, канд. техн. наук

¹ Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України

² Центральний інститут авіаційного моторобудування ім. П.І. Баранова

³ Московський державний університет ім. М.В. Ломоносова

ВИЗНАЧЕННЯ ГРАНИЧНИХ РІВНІВ ПОШКОДЖЕНЬ У МАТЕРІАЛАХ ПІСЛЯ НАПРАЦЮВАННЯ В УМОВАХ ТЕРМОМЕХАНІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Резюме. Представлено результати аналізу можливих варіантів практичного використання концепції розсіяних дефектів у розрахунках конструкцій за допустимою пошкоджуваністю матеріалу. Опрацьовано, отримані методом LM-твердості, й узагальнено експериментальні дані з граничної пошкоджуваності деяких широко використовуваних у машинобудуванні сплавів на зруйнованих після напрацювання в умовах повзучості й малоциклової втоми зразках. Установлено лінійну кореляцію рівнів граничної пошкоджуваності з робочими напруженнями при напрацюванні. Запропоновано варіант методики визначення параметрів кореляційного рівняння за результатами базових дослідів.

Ключові слова: машинобудівні матеріали, гранична пошкоджуваність, твердість, повзучість, циклічна втома, напруження, кореляційні рівняння, кінетичні теорії накопичення пошкоджень.

A. Lebedev, E. Golubovskii, O. Lokoshchenko, N. Muzyka,
V. Lamashevsky

DETERMINATION OF LIMIT LEVELS OF DAMAGE IN MATERIALS AFTER OPERATING TIME UNDER THERMOMECHANICAL LOADING

The summary. The results of the analysis of possible variants of using the concept of scattered defects for structural calculations with allowable material damage are presented. The experimental data on the limit damage to some alloys, which are widely used in mechanical engineering, are obtained by the LM-hardness test method on the specimens fractured after accrued operating time under creep and low-cycle fatigue conditions. These data are processed and generalized. A linear correlation between levels of limit damage and working stress under operating time is established. A variant of the method for determining the parameters for equation of correlation from the basic test results is proposed.

Key words: engineering materials, limit damage, hardness, creep, cyclic fatigue, stress, equations of correlation, kinetic theories of damage accumulation.

Вступ. Практично всі машинобудівні матеріали, в тому числі сталі й сплави, містять дефекти структури (мікротріщини, пори, хімічні флуктуації та ін.), різні за своєю природою і масштабним рівнем. Ці та нові дефекти, що зароджуються за термосилового впливу, вже на початковій стадії експлуатації конструкції починають інтенсивно розвиватися, відбувається збільшення їх щільності. У зонах локалізації дефектів зароджуються небезпечніші пошкодження у вигляді макропор і макротріщин складної конфігурації. Подальший розвиток цієї групи дефектів можна прогнозувати, використовуючи вже добре розроблені алгоритми механіки руйнування [1].

В останні десятиріччя інтенсивно розвивається теорія накопичення дефектів, які прийнято називати розсіяними (в англійській літературі – континуальними) ушкодженнями. Приводом введення цього терміна стало, очевидно, погіршення

характеристик фізико-механічних властивостей матеріалу, яке спостерігається в багатьох випадках із часом (природне старіння), або при різних температурно-силових діях, що призводять до його деградації.

Кінетичні теорії розсіяних пошкоджень. Основні концепції цього напрямку в механіці матеріалів сформулювали Л.М. Качанов і Ю.М. Работнов, ідеї яких отримали розвиток як при вдосконаленні теорії описування кінетики накопичення пошкоджень, так і при вирішенні практичних завдань. Більшість цих робіт виконано з позиції механіки квазіоднорідного середовища в припущенні безперервного розподілу пошкоджень по об'єму тіла. На основі цих уявлень отримано рівняння, що описують кінетику накопичення пошкоджень, тобто розвиток руйнування. В окремих випадках результати цих робіт дозволяють прогнозувати поточні процеси деградації матеріалу.

На жаль, ефективну реалізацію цього підходу стримує відсутність фізично й експериментально обґрунтованого критерію, який дозволяє адекватно судити про рівень поточної пошкоженості матеріалу і, особливо, про її граничні значення, коли настає руйнування його макрооб'єму.

Друга проблема видається складнішою й поки недостатньо розробленою, не зважаючи на те, що в її вирішенні вкрай зацікавлені фахівці, які займаються моніторингом залишкового ресурсу (наприклад, до зародження в матеріалі макротріщин) несівних елементів конструкцій за тривалої експлуатації.

Спроба вирішити це завдання була зроблена, наприклад, вченими Інституту проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України, що спільно з фахівцями із Росії розробили та запропонували нормативний документ РД 34.17.440-96, який в 1999 році було введено в дію [2].

Цей документ, що регламентує процедуру моніторингу ресурсу елементів парових турбін, містить вимогу обов'язкового оцінювання їх граничного стану за рівнем накопичених у процесі експлуатації розсіяних дефектів, тобто розрахунок конструкції за допустимими пошкодженнями.

Нові дані про реальний ресурс роторів, корпусних деталей та інших відповідальних деталей турбін дозволили авторам скоригувати запропоновані раніше підходи й запропонувати простішу, але, на їх думку, досить надійну методику визначення коефіцієнта запасу за граничним рівнем пошкоджуваності матеріалу.

Отримані результати відображені в роботі [3], з якої випливає, що її автори, у зв'язку з відсутністю достовірних моделей, які описують кінетику накопичення пошкоджень і, отже, їх граничних значень, змушені були обмежитися визначенням коефіцієнта запасу за сумарним граничним пошкодженням при повзучості (за часом до руйнування) й малоциклової втоми (за числом циклів), використовуючи при цьому лінійне сумування пошкоджень.

Досвід авторів робіт [2, 3] є яскравим прикладом складності проблеми створення адекватних моделей накопичення пошкоджень у матеріалі при напрацюванні й виборі експериментально обґрунтованого критерію оцінювання поточної пошкоженості й, головне, її граничного рівня, який призводить до в'язкого або крихкого (утворення макротріщини) руйнування.

Концепція оцінювання граничної пошкоджуваності. Нижче, за результатами опрацювання та узагальнення експериментальних даних, отриманих при випробуваннях деяких конструкційних матеріалів при стаціонарних статичному і циклічному, в тому числі високочастотному, навантаженнях запропоновано алгоритм визначення граничного рівня розсіяних пошкоджень у матеріалі залежно від ступеня його напруженості.

Вихідною інформацією в цьому алгоритмі були результати лабораторних дослідів при фіксованих режимах випробувань, які максимально імітували (якісно) штатні температурно-силові умови роботи матеріалів у реальних виробках.

Випробування зразків, доведення їх до руйнування при напрацюванні в умовах тривалого статичного і циклічного (із різною частотою) навантажень дозволили встановити стійкі лінійні кореляції граничних значень параметрів пошкоджуваності різних матеріалів із рівнем діючих напружень. За параметр пошкоджуваності прийнято ступінь розсіювання характеристик механічних властивостей матеріалу на зруйнованих зразках після напрацювання при різних рівнях напружень. Вибір такого критерію пошкоджуваності (деградації) матеріалу пов'язаний з тим, що він добре, завдяки відносній простоті визначення параметрів пошкоджуваності за розсіюванням чисел твердості (метод LM-твердості – патент України № 52107, МПК 7 G01N3/00, G01N3/40), себе зарекомендував. Реалізація цього методу може бути здійснена без порушення цілісності виробу, в тому числі на працюючому обладнанні. Про доцільність (в зіставленні з іншими методами аналогічного призначення) подальшого розширення обсягу і сфер упровадження методу свідчать про вже накопичений досвід його практичної реалізації [4–6 та ін.] та відгуки фахівців [7, 8 та ін.].

За параметр розсіювання виявилось зручним використовувати параметр m розподілу Вейбулла [9], що має зміст коефіцієнта гомогенності матеріалу. Його можна визначити за формулою Гумбеля [10]. Стосовно до випробувань на твердість ця формула має вигляд

$$m = 0.4343 \cdot d_n \left[\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (\lg H_i - \overline{\lg H})^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

де величину d_n визначають залежно від кількості n вимірювань; H_i – значення твердості по i -му виміру; $\overline{\lg H}$ – середнє значення логарифму твердості за результатами n вимірювань.

Проведені дослідження показали, що досить стабільні значення коефіцієнта m забезпечуються при $n = 25 \dots 30$ вимірювань.

Оцінювання ступеня розсіювання характеристик досліджуваних властивостей, у тому числі твердості, можна проводити й за іншими статистичними критеріями, наприклад, за коефіцієнтом варіації v , який показує, наскільки велике розсіювання величин, що складають наведену сукупність у порівнянні із середнім значенням

$$v = \frac{1}{H} \cdot \left[\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (H_i - \overline{H})^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

де H_i і n мають такі ж значення, що у формулі (1); \overline{H} – середнє значення твердості.

У даній роботі метод LM-твердості використано для отримання даних, необхідних для перевірки стійкості зазначеної вище лінійної кореляції, яку можна ефективно використовувати в розрахунках граничного рівня пошкоджуваності матеріалу з подальшим визначенням коефіцієнтів запасу при моніторингу поточного та критичного стану конструкції за розсіяними пошкодженнями, а також прогнозувати кінетику зміни цього коефіцієнта в процесі напрацювання.

Експериментальні дані та їх обговорення. Реальну ступінь пошкоджуваності матеріалів в зоні руйнування зразків після напрацювання визначали на базі твердоміра COMPUTEST SC (фірма ERNST, Швейцарія) методом LM-твердості, реалізацію якого виконували, зберігаючи прийняту технологію та режими випробувань.

Використовуючи базу чисел твердості матеріалу, що отримана при 30-ти вимірах у зоні руйнування зразка, за формулою (2) визначали коефіцієнт варіації v , тобто параметр рівня пошкоджуваності матеріалу, який відповідає його граничному стану.

За цією методикою досліджені зразки зі сплавів ЭИ698ВД, ВТ6, які широко використовуються в турбобудуванні, зі сплавом АМг6Н, що застосовується в авіаційній і

космічній техніці, а також зразки з теплостійкої сталі 10ГН2МФА. Крім зразків із зазначених матеріалів аналогічні дослідження виконувалися на зразках із трубної сталі 17Г1С.

Дослідження граничної пошкоджуваності сплаву ЭИ698ВД [11] виконано на зразках, зруйнованих при пульсуючому циклічному навантаженні до 10^4 циклів з частотою 0,1 Гц. Температура випробувань 650°C . Суцільні циліндричні зразки діаметром 5 мм і довжиною робочої частини 30 мм (ГОСТ 25.502-79) вирізали зі штампованої заготовки диска турбіни в радіальному напрямку й по хордах периферійної частини диска (кільце 1) і маточини (кільце 2). Випробування зразків проводили на машині УМЗ-10Т із піччю радіаційного нагрівання при пульсуючих напруженнях 78, 85 і 90 МПа. Форма циклу – близька до синусоїдальної.

Рівень граничної пошкоджуваності сплаву визначали методом ЛМ-твердості за описаною вище методикою. Отримані результати наведені на рис. 1.

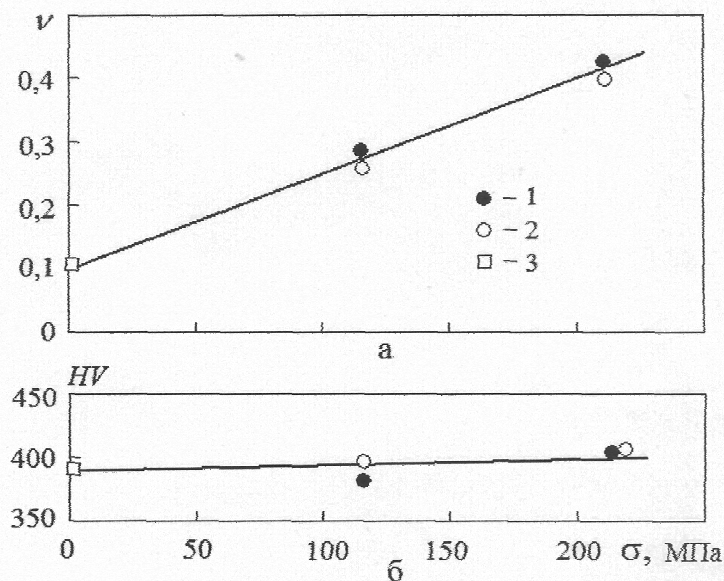


Рисунок 1. Кореляція граничних пошкоджень матеріалу в оцінюванні коефіцієнтом варіації – (а) й твердості – (б) з рівнем діючих напружень при напрацюванні. Циклічне пульсуюче навантаження сталі ЭИ698ВД при розтягу до 10^4 циклів з частотою 0,1 Гц: 1 – зона диска; 2 – зона маточини; 3 – вихідний стан

Значення коефіцієнтів варіації матеріалу диска і маточини в межах одного кільця, як випливає з результатів випробувань зразків, вирізаних по радіусу й хорді, досить стабільні, хоча наведені значення коефіцієнта варіації матеріалу на периферії диска незначно перевищують значення коефіцієнта в зоні маточини. Цей результат свідчить про високу чутливість методу ЛМ-твердості, бо вказані відмінності цілком закономірні, тому що метал маточної частини заготовки був менш «прокований» при штампуванні.

Дослідження пошкоджуваності двофазного ($\alpha + \beta$) титанового сплаву ВТ-6 (Ti-6Al-4V) після напрацювання в умовах повзучості при розтягу до руйнування проводили на машині АІМА [12]. Зразки мали ті ж розміри та форму, що й для сплаву ЭИ698ВД. Випробування проводили під навантаженням 30, 117 і 217 МПа при температурах 600 і 700°C . Перед випробуваннями матеріал зразків термодифузійним способом насичували воднем до рівня середньої концентрації, яка в трьох партіях відповідно становила 0,1, 0,2 і 0,3%.

Ступінь деградації матеріалу середньої частини зразків у вихідному стані й після руйнування визначали вище описаним способом. Показано, що збільшення ступеня насичення сплаву воднем спричиняє зниження рівня пошкоджуваності. При цьому

лінійність кореляційної кривої $v=f(\sigma)$ зберігається. Отримані результати наведені на рис. 2.

Процеси накопичення пошкоджень сплаву АМг6Н досліджували на магнітострикційній установці при гармонічному розтягу в умовах симетричного циклу навантаження з частотою 17 кГц [13]. Зразки для випробувань являли собою резонансний напівхвильовий стрижень із циліндричною робочою частиною, довжина якої дорівнювала половині довжини хвилі резонансної частоти. Розподіл напружень по довжині зразка відповідав гармонійному закону. Максимальні амплітуди напружень дорівнювали 34,3, 42,9 і 47,1 МПа, а максимальне число циклів при напрацюванні становило відповідно 6,66; 5,93 і $1,58 \times 10^8$.

Ступінь пошкоженості матеріалу в зоні руйнування в оцінюванні коефіцієнтом варіації v визначали методом LM-твердості. Отримані результати в координатах « $v - \sigma$ » і « $HRB - \sigma$ » представлені на рис. 3.

Дослідження процесів деформування й накопичення пошкоджень теплостійкої сталі 10ГН2МФА проведені при м'якому циклічному (віднульовому) навантаженні [14].

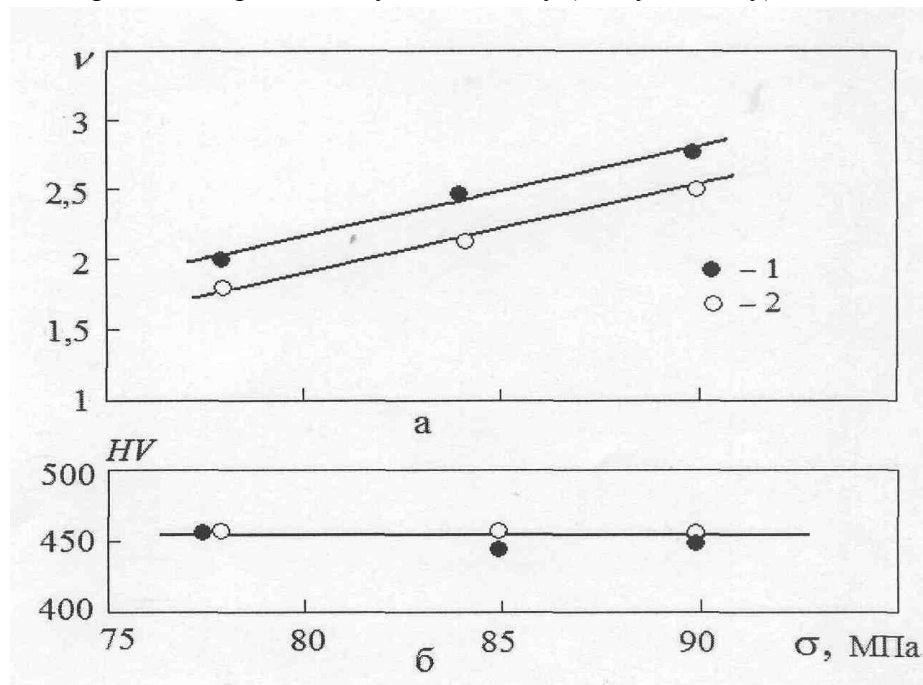


Рисунок 2. Те ж, що й на рисунку 1. Статичне навантаження сплаву VT-6, насиченого воднем до 1% (1) і 3% (2), в умовах повзучості

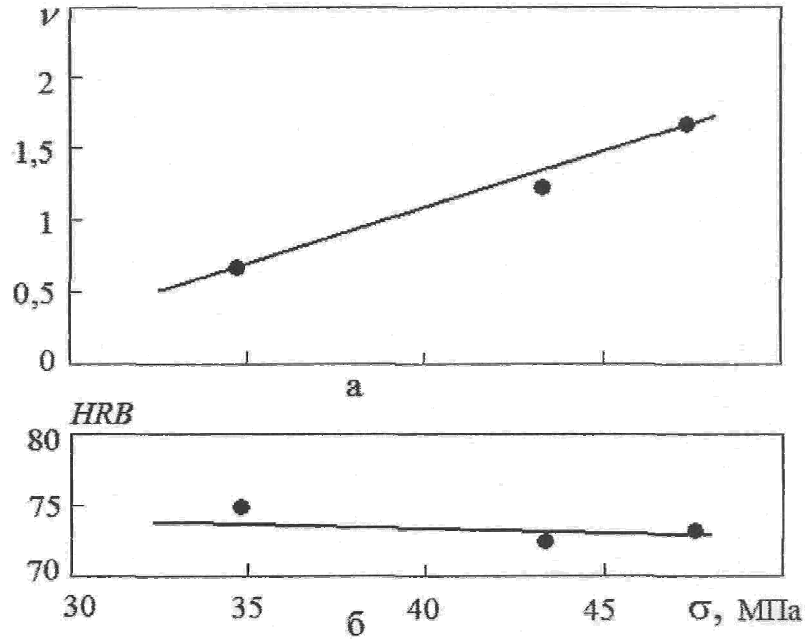


Рисунок 3. Те ж, що й на рисунку 1. Циклічне навантаження сплаву АМг6Н при гармонійному симетричному розтягу з частотою 17 кГц до 10 циклів

Випробування проводили на машині ТФ-2 (Угорщина), обладнаній пристроєм для реалізації малоциклового навантаження зразків за трапецієподібним віднульовим циклом з частотою 20 цикл/хв, з витримкою під навантаженням і в розвантаженому стані протягом 1 сек ($N_{\max} = 10^4$ циклів).

Параметр розсіювання значень твердості визначений за тією ж методикою, коефіцієнт варіації розраховували за результатами 30 вимірювань. Отримані дані, опрацьовані в координатах « ν - σ » і «HRB - σ » представлені на рис. 4.

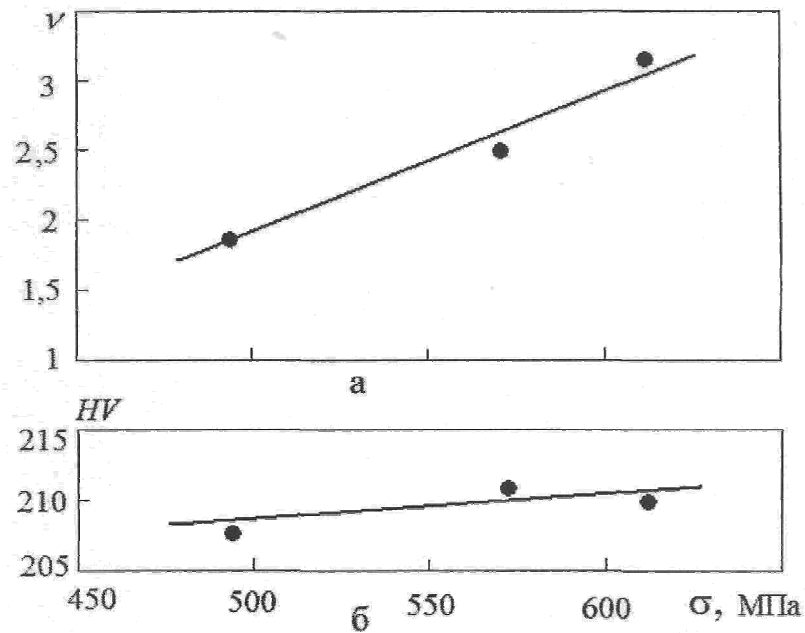


Рисунок 4. Те ж, що й на рис. 1. Малоциклове (частота 0,3 Гц) навантаження теплостійкої сталі 10ГН2МФА при віднульовому циклі

Висновок. Кінетика розсіяних пошкоджень на сьогодні залишається слабо розробленим напрямком досліджень у галузі механіки матеріалів. Найактуальнішим у цьому напрямку, особливо відносно додатків, слід визнати розробку достовірних методів визначення граничних рівнів накопичених розсіяних пошкоджень (дефектів), відсутність яких стримує розроблення достовірного моніторингу залишкового ресурсу конструкцій. Особливо актуальним є також питанням фізичного та експериментального обґрунтування критеріїв граничної пошкоженості матеріалу, що вже використовуються (твердість, деформація, час, число циклів тощо) й достовірних, але порівняно простих у реалізації методів їх визначення.

Розглянуті вище (що вже знайшли місце в нормативних документах) підходи ґрунтуються на припущеннях про можливість використання в якості характеристики граничної пошкоджуваності матеріалу при тривалій роботі конструкції одночасно двох незалежних параметрів – часу до руйнування і кількості циклів.

Рівень пошкоджуваності матеріалу, за яким визначають коефіцієнт запасу, запропоновано визначати шляхом лінійного складання зазначених параметрів, що потребує обґрунтування або вдосконалення шляхом використання, наприклад, методу вагових коефіцієнтів.

У цій роботі запропоновано іншу, достовірнішу концепцію, яка базується на експериментально встановленій лінійній кореляції рівня діючих при напрацюванні напружень зі ступенем граничної пошкоджуваності матеріалу в оцінюванні коефіцієнтом варіації, що визначається за параметром розсіяння твердості у зоні руйнування зразка.

Дві константи, що входять до лінійного рівняння $v = f(\sigma)$, можуть бути визначені за результатами двох випробувань матеріалу, які проводять до руйнування зразків при режимі, що максимально імітує умови роботи реальної конструкції, але (для скорочення часу випробування) більш форсованих за рівнями й характером зміни в часі (частотою) напруженнях.

Аналіз наведених у роботі результатів дозволяє зробити висновок про інваріантність встановленої лінійної залежності до температурно-силових умов напрацювання (довготривалість і рівень напруженості матеріалу) в умовах статичного, мало- і багатоциклового навантаження з різною частотою циклування, включаючи роботу матеріалу в пружній і пружно-пластичній областях.

Експериментальні результати, що обговорюються, отримані за одновісного розтягу. За попередніми даними авторів на структуру кореляційного рівняння може впливати вид напруженого стану.

Звертає на себе увагу слабка чутливість твердості матеріалу, зруйнованого при випробуваннях зразків до режиму й тривалості навантаження, в тому числі до ступеня напруженості й кількості циклів.

Ці результати, а також результати авторів робіт [15, 16], підтверджують думку, яка відзначалася в літературі, про те, що твердість, як і пружність, можна віднести до мало залежних від структури властивостей більшості кристалічних матеріалів.

Автори вважають корисним зазначити, що отримані в роботі експериментальні результати могли б різнитися при використанні інших методів індикації матеріалу і критеріїв оцінювання рівня розсіяних пошкоджень, наприклад, за зміною його

акустичних властивостей, електроопору, внутрішнього тертя та ін. У цьому відношенні обговорювані в роботі дані, отримані методом ЛМ-твердості, й критерій пошкоджуваності у вигляді коефіцієнта варіації чисел твердості слід визнати достовірними, які адекватно відображають стан досліджуваних матеріалів, що свідчить про високу показовість і широкі можливості методу.

Роботу виконано за сприяння ДФФД (проект Ф40.7/010) і РФФД (проект № 11-08-90401).

Література

1. Панасюк, В.В. Механика квазіхрупкого руйнування матеріалів [Текст] / В.В. Панасюк. – К.: Наукова думка, 1991. – 416 с.
2. Методические указания о порядке проведения работ при оценке индивидуального ресурса паровых турбин и продлении срока их эксплуатации сверх паркового ресурса. РД 34.17.440-96. – М: АООТ «ВТИ». – 1996. – 153 с.
3. Методологія розрахункової оцінки індивідуального ресурсу парових турбін ТЕС і ТЕЦ [Текст] / М.Г. Шульженко, П.П. Гонтаровський, Ю.І. Матюхін, О.В. Пожидаєв. – Цільова комплексна програма НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій». Збірник наукових статей з результатами, отриманими в 2007–2008 р.р., Наук. керівник – академік Б.Є. Патон. ІЕС ім.Є.О. Патона НАН України. – К.: 2009. – С. 682–686.
4. Лебедев, А.А. Новый метод оценки деградации материала в процессе наработки [Текст] / А.А. Лебедев, Н.Р. Музыка, Н.Л. Волчек // Залізничний транспорт України. – 2003. – №5. – С. 30–33.
5. Лебедев А.А. Контроль качества термической обработки металла методом ЛМ-твердости [Текст] / А.А. Лебедев, Н.Р. Музыка, В.П. Швець // Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов. Т.1. Сб. докладов 9-го Международного научно-технического конгресса термистов и металловедов. – Харьков, 2008. – С. 290–293.
6. Недосека, С.А. Комплексная оценка поврежденности и остаточного ресурса металлов с эксплуатационной наработкой [Текст] / С.А. Недосека, А.Я. Недосека // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2010. – № 1. – С. 9–16.
7. Матюнин, В.М. Оперативная диагностика механических свойств конструкционных материалов [Текст] / В.М. Матюнин. – М: Издательский дом МЗИ, 2006. – 210 с.
8. Назарчук, З.Т. Розробка методів і нових технічних засобів неруйнівного контролю та діагностики стану матеріалів і виробів тривалої експлуатації [Текст] / З.Т. Назарчук // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій споруд і машин. – Київ: Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, 2006. – С. 33–38.
9. Вейбулл, В. Усталостные испытания и анализ их результатов [Текст] / В. Вейбулл. – М.: Машиностроение, 1964. – 275 с.
10. Гумбель, Э. Статистики экспериментальных значений [Текст] / Э. Гумбель. – М.: Мир, 1965. – 450 с.
11. Голубовский, Е.Р. Характеристики конструкционной прочности (МЦУ и СРТУ) металла штамповок дисков из сплава ЗИ698ВД производства ОАО «Руспошмет» [Текст] / Е.Р. Голубовский, А.С. Волков, С.Н. Волков и др. // Авиационно-космическая техника и технология. – 2010. – №9 (76). – С. 82–86.
12. Локощенко, А.М. Анализ ползучести и длительной прочности титанового сплава ВТ6 с предварительным внедрением водородом [Текст] / А.М. Локощенко, А.А. Ильин, А.М. Мамонов и др. // Физико-химическая механика материалов. – 2008. – №5. – С. 98–194.
13. Писаренко, Г.Г. Дослідження процесів накопичення пошкоджень сплаву АМгбН при багаточисловому навантаженні [Текст] / Г.Г. Писаренко, В.П. Швець, А.М. Майло та ін. // Проблеми динаміки і міцності в турбомашинобудуванні: Тези доповідей четвертої міжнародної науково-технічної конференції, 31 травня–02 червня 2011. – С. 201–202.
14. Лебедев, А.А. Исследование процессов деформирования и накопления повреждений в стали 10ГН2МФА при малоцикловом нагружении [Текст] / А.А. Лебедев, И.В. Маковецкий, Н.Р. Музыка и др. // Пробл. прочности. – 2008. – №2. – С. 5–25.
15. Лебедев, А.А. Определение поврежденности конструкционных материалов по параметрам рассеяния характеристик твердости [Текст] / А.А. Лебедев, Н.Р. Музыка, Н.Л. Волчек // Пробл. прочности. – 2002. – № 4. – С. 5–12.
16. Лебедев, А.О. Технічна діагностика стану матеріалу методом ЛМ-твердості [Текст] / А.О. Лебедев, М.Р. Музыка // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин. – Київ: Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України. – 2006. – С. 97–101.

Отримано 05.12.2011