

Писаренко Г. До прогнозування довговічності алюмінієвих та титанових сплавів за характеристиками дискретних властивостей пошкоджуваності під час втоми / Писаренко Г., Войналович О., Майло А. // Вісник ТНТУ. — 2011. — Спецвипуск — частина 1. — С.42-47. — (механіка та матеріалознавство).

УДК 621.921

**Г. Писаренко, докт. техн. наук;
О. Войналович, канд. техн. наук; А. Майло**

Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАНУ, Київ

ДО ПРОГНОЗУВАННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ АЛЮМІНІЄВИХ ТА ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ ЗА ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ДИСКРЕТНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОШКОДЖУВАНOSTІ ПІД ЧАС ВТОМИ

Резюме. Отримано характеристики пошкоджуваності алюмінієвих та титанових сплавів. Застосування дискретної моделі пошкоджуваності дозволяє прогнозувати циклічну довговічність на стадії нелокалізованої пошкоджуваності (90% відносної кількості циклів напрацювання). Отримані характеристики дозволяють визначити пошкодженість полікристалічного матеріалу за її кінетичними характеристиками на мезоструктурному рівні.

Ключові слова: пошкоджуваність, циклічна довговічність, мікропластична деформація, втома.

G. Pisarenko, O. Voynalovich, A. Maylo

FOR PREDICTING OF THE ENDURANCE OF ALUMINIUM AND TITANIC ALLOYS BY CHARACTERISTICS OF DISCRETE PROPERTIES OF DAMAGEABILITY AT THE FATIGUE

The summary. The characteristics of the damageability of aluminum and titanium alloys were obtained in this paper. Use of the discrete damage model can allow one to predict cyclic life at the stage of non-localized damage (90 % relative life). The obtained characteristics shows the possibility for monitoring of damage accumulation in a polycrystalline material according to its kinetics at a mesolevel.

Key words: damageability, cyclic life, microplastic deformation, fatigue.

Вступ. За дії циклічного навантажування в елементах конструкцій і деталях машин відбувається поступове накопичення пошкоджень, що призводять до зміни фізико-механічних властивостей з подальшим їх руйнуванням. Надійність за таких умов навантажування залежить від достовірності прогнозування довговічності або вичерпання несівної здатності при продовженні ресурсу. У якості чутливого чинника до зміни властивостей конструкційного матеріалу під час втоми може бути прийнята мікропластична деформація. Одним із основних факторів, що впливають на вірогідність оцінки стану конструкційного матеріалу, є чутливість прийнятого параметра до мікропластичних деформацій, які відбуваються у матеріалі поступово на кількох структурних рівнях: мікроскопічному, мезорівні та макроскопічному.

Найбільш інформативним об'ємом конструкційного матеріалу щодо його пошкодженості є поверхневий шар, що пов'язано з особливостями будови та рядом технологічних чинників. Відомі методи прогнозування довговічності, або визначення залишкового ресурсу базуються на критеріях інтегрального оцінювання [1] реакції структури матеріалу на дію силових чинників. Визначена кінетика пошкоджуваності за інтегральними параметрами не дозволяє контролювати її особливості з урахуванням масштабних рівнів. Наприклад, отримані характеристики пошкоджуваності за інтегральним параметром непружності дозволяють контролювати її кінетику у

діапазоні відносної кількості циклів напрацювання 30 – 70 %, тоді як під час втоми стадія інкубаційного накопичення пошкоджень складає близько 10 %, а загалом стадія розсіяної пошкоджуваності становить 90 %. Отже, забезпечивши контроль кінетики пошкоджуваності на ранніх етапах навантажування (інкубаційна стадія), можна підвищити достовірність прогнозування, а також моніторингу поточного стану. Для вирішення такого завдання необхідно контролювати кінетику пошкоджуваності з урахуванням масштабних рівнів структури (мікро-, мезо-, макрорівні).

Метод дослідження. Вибіркові досліджувані матеріали алюмінієвого (АМг6Н) та титанового (ОТ4-1) сплавів зумовлено наступним: для даних матеріалів характерний низький рівень розсіювання енергії у матеріалі за умов циклічного навантажування порівняно зі сталями. Невисокі рівні розсіювання під час циклічного навантажування дозволяють реалізувати за високих частот навантажування лабораторних зразків великі бази випробовувань. Зниження амплітуди напружень циклу і низький рівень гістерезисних втрат енергії досліджуваних матеріалів сприяє зменшенню впливу термічного чинника під час випробовувань на втому. У літературі [2] широко досліджено кінетику пошкоджуваності алюмінієвих сплавів, визначену з застосуванням інтегральних методів контролю непружності, які описуються монотонною зміною параметра непружності.

Досліди проводили за стандартною методикою на магнітострикційній установці [3]. Використання резонансних півхвильових ($\lambda/2$, λ – довжина поздовжньої хвилі на частоті основного резонансу) зразків (рис. 1) дозволило отримати розподіл напружень циклу σ_a уздовж робочої частини, який дає можливість контролювати зону пошкодження у фіксованому перерізі зразка, де діють максимальні напруження циклу (σ_{max}). Зміну фізико-механічних властивостей конструкційного матеріалу внаслідок циклічного навантажування визначали за статистичними характеристиками узагальненого параметра пошкоженості, виміряного у поверхневому шарі досліджуваного зразка за методикою [4]. Розроблена методика дозволяє контролювати узагальнений параметр пошкоженості (кут зсуву фаз) у локальних зонах поверхневого шару структурно-неоднорідного конструкційного матеріалу на прикладі лабораторного зразка для втомних випробовувань.

Циклічне навантажування зразка припиняли після зниження резонансної частоти силозбудувача на 3 %, що відповідає відносній кількості циклів напрацювання близько 90 %. Таке зниження резонансної частоти зумовлено пошкодженням матеріалу зразка і було прийнято за критерій припинення циклічного навантажування.

Результати та їх аналіз. З аналізу отриманих характеристик розподілу кута зсуву фаз із застосуванням розробленого методу у координатах «дисперсія кута зсуву фаз – циклічна довговічність» для різних значень амплітуд напружень циклу для алюмінієвих [4] та титанових сплавів (рис. 2). Можна зробити висновок, що загальна кінетика кута зсуву фаз (усереднена характеристика результатів вимірів – крива 2 на рис. 2) відповідає кінетиці пошкоджуваності, яка відома з літератури (три основні стадії з узагальненої діаграми втоми). На отриманих характеристиках спостерігається послідовність окремих екстремумів (крива 1 на рис. 2). У такому випадку, якщо вважати, що більшій пошкоженості відповідає більша неоднорідність розподілу мікропластичних деформацій, відповідно менша неоднорідність – меншій

пошкодженості, тоді спадання отриманих характеристик відповідає зміцненню конструкційного матеріалу, а їх зростання – його знеміцненню. Отже, кожен мінімум на отриманих характеристиках (N_1, N_2, \dots) відповідає максимальному зміцненню матеріалу, а максимум – знеміцненню.

На стадії розсіяної пошкоджуваності спостерігається періодичне чергування таких екстремумів зміцнення-знеміцнення, яке вказує на циклічний характер кінетики кута зсуву фаз, представленої на діаграмі рис. 2. Характеристика, визначена за параметром кута зсуву фаз, виміряного у локальних зонах поверхневого шару, відповідає кінетиці пошкоджуваності полікристалічного матеріалу у відповідності з її локалізацією. У міру напрацювання відбувається поступове вичерпання ресурсу мікропластичності, що унеможливорює його подальше зміцнення за відносної кількості циклів напрацювання близько 90 %.

Отже, періодичність появи екстремумів зміцнення описує кінетику пошкоджуваності конструкційного матеріалу на стадії розсіяного втомного пошкодження.

Отриману періодичність екстремумів можна описати рекурентним рядом [5] із застосуванням сталої руйнування

$$\frac{N_n}{N_{n+1}} = \Delta \frac{1}{2^{(n+1)}}, \quad (1)$$

де N_n, N_{n+1} – відповідно кількість циклів, що відповідає n -тому екстремуму зміцнення і наступному.

Стала руйнування Δ характеризує енергетичний стан локального об'єму під час деформування полікристалічного матеріалу аналогічно процесу плавлення, де енергія, затрачена на руйнування цього об'єму, еквівалентна енергії його плавлення. Для алюмінієвих сплавів $\Delta = 0,22$, для титанових – $\Delta = 0,12$. Отже, знаючи кількість циклів, що відповідає першому екстремуму зміцнення ($n=1$), можна отримати розрахунковий ряд, який відповідає плинним значенням циклів максимального зміцнення. За перший член ряду N_1 прийнято перший екстремум зміцнення (перший мінімум на характеристиці рис. 2). За такої умови перший член експериментального ряду та перший розрахункового – співпадають. Визначивши N_1 , за формулою (1), вираховували наступні значення ряду (N_2, N_3, \dots) і зіставляли їх з експериментальними значеннями. Методом поступових наближень знаходили експериментальний ряд екстремумів зміцнення з мінімальною похибкою.

Представивши результати розрахунків у координатах: порядковий номер екстремуму зміцнення (N_1, N_2, \dots) – відносна кількість циклів до руйнування ($N/N_p, \%$) (рис. 3), отримано діаграми, які описують пошкоджуваність конструкційного матеріалу як дискретний процес.

З аналізу діаграм (рис. 3) встановлено, що у діапазоні довговічності на стадії розсіяного пошкодження вкладається фіксована кількість екстремумів зміцнення (5), яка не залежить від амплітуди напружень циклу та бази випробувань для даного матеріалу.

Першому номеру лінії спектра зміцнення (N_1 на рис. 3), за яким розраховуються наступні члени рекурентного ряду, відповідає відносна кількість циклів у межах 10 %, а останньому (N_5) – (90÷95) %. З аналізу результатів, представлених на рис 3, впливає, що для діаграм б, г кількість екстремумів зміцнення становить 6, а не як зазначалося 5. Така неоднозначність пов'язана з тим, що під час деформування матеріалу виявляються й інші серії спектрів з деяким відставанням один відносно іншого [6]. Відзначена неоднозначність впливає на точність прогнозування і в такому випадку достовірність

прогнозування буде становити близько 80 %.

На діаграмі в значення відносної кількості циклів, що відповідає екстремуму N_5 , становить 54 %. Розбіжність між експериментальними значеннями і розрахунковими згідно із застосовано моделлю пошкоджуваності має суттєве значення. Така похибка може бути пов'язана з тим, що місце локалізації пошкоджень під час циклічного навантажування виявилось поза межами зони контролю параметра пошкодження на поверхні зразка досліджуваного матеріалу. Для того, щоб усунути таку похибку, було застосовано підхід, описаний у розділі «результати та їх аналіз», що дозволив контролювати зону локалізації втомного пошкодження і зменшити похибку до допустимої.

Отже, кількість циклів, що відповідає першому члену ряду (N_1), може бути прийнята у якості критерію прогнозування циклічної довговічності конструкційних матеріалів.

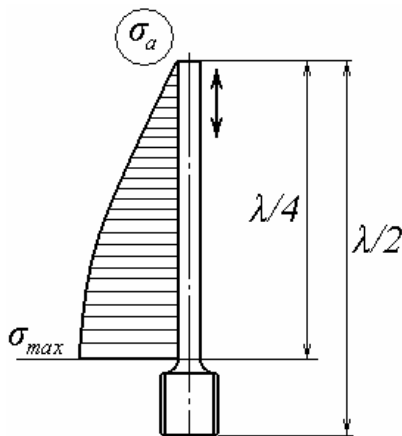


Рисунок 1

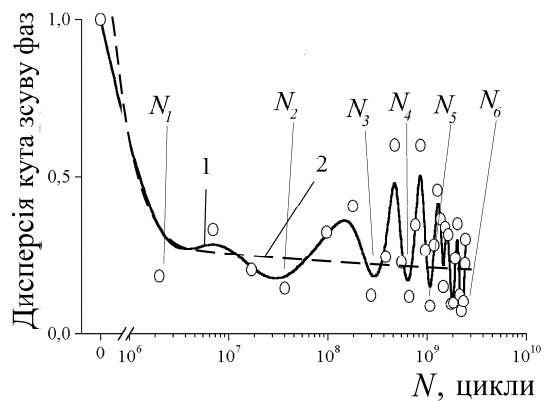
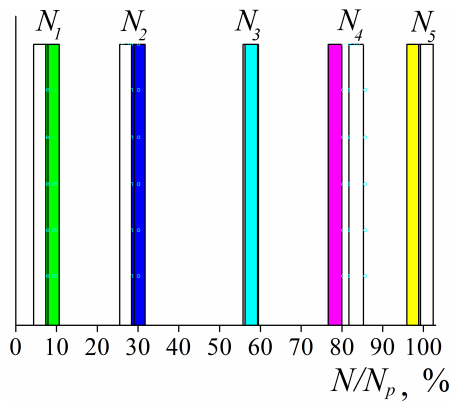
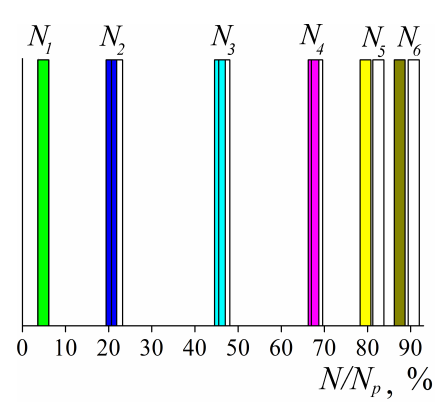


Рисунок 2



а



б

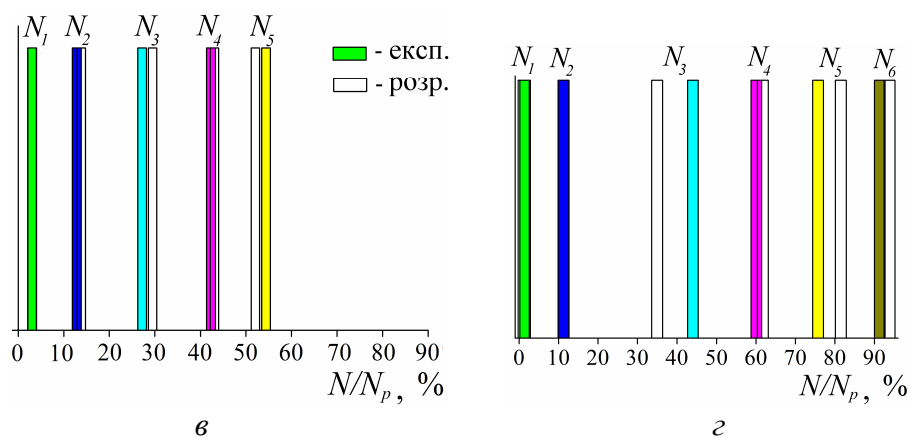


Рисунок 3

Рисунок 1. Півхвильовий зразок для втомних випробувань; λ – довжина поздовжньої хвилі на частоті основного резонансу.

Рисунок 2. Характеристика пошкоджуваності титанового сплаву OT4-1 ($\sigma_a = 122$ МПа); N_1, \dots, N_6 – екстремуми зміцнення.

Рисунок 3. Виокремлені екстремуми зміцнення сплавів: АМг6Н ($a - \sigma_a = 65$ МПа; $b - \sigma_a = 73$ МПа; $v - \sigma_a = 83$ МПа) та титанового OT4-1 ($z - \sigma_a = 122$ МПа).

Висновки. Отримано кінетичні характеристики пошкоджуваності алюмінієвого АМг6Н та титанового OT4–1 сплавів по параметру дисперсії кута зсуву фаз, виміряного у локальних зонах поверхневого шару зразків досліджуваних матеріалів. Встановлено, що першому періоду пошкоджуваності відповідає перший член ряду (N_1), який на отриманих характеристиках виявляється у діапазоні до 10 % відносної кількості циклів напруження. Обґрунтовано застосування у якості критерію прогнозування циклічної довговічності перший екстремум зміцнення N_1 на отриманих характеристиках пошкодженості для алюмінієвих та титанових сплавів при розкладанні за рекурентним співвідношенням сталої руйнування Δ .

Література

1. Бурдуковский, В. Г. Критерии накопления повреждений и разрушения при многоциклового усталости металлических материалов [Текст] / В. Г. Бурдуковский, И. С. Каманцев // Заводская лаборатория, 2009. – Т. 75. – №7. – С. 36–41.
2. Трощенко, В. Т. Методы ускоренного определения предела выносливости металлов на основе деформационных и энергетических критериев [Текст] / В. Т. Трощенко, Л. А. Хамаза, Г. В. Цыбанев – К. : Наук. думка, 1979. – 175 с.
3. Матохнюк, Л. Е. Ускоренные усталостные испытания высокочастотным нагружением [Текст] / Л. Е. Матохнюк – К. : Наук. думка, 1988. – 200 с.
4. Писаренко, Г. Г. Эволюция рассеянного повреждения алюминиевых сплавов [Текст] / Г. Г. Писаренко, А. В. Войналович, А. Н. Майло // Повреждение материалов при эксплуатации, методы его прогнозирования и диагностирования / Тернопіл. держ. техн. ун-т ім. Івана Пулюя. – Тернопіль, 2009. – С. 149–153.
5. Иванова, В. С. Синергетика разрушения металлов и механические свойства // Синергетика и усталостное разрушение [Текст] / В. С. Иванова. – М.: Наука, 1989. – С. 6-29. – ISBN 5-02-005897-J.
6. Радченко, А. И. Процесс усталости сплава Д16Т на различных масштабных уровнях эволюции [Текст] / А. И. Радченко, С. С. Юцкевич, В. М. Пантелеев // Прикладная синергетика в нанотехнологиях //: Ин-т металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН. – М., 2008. – С. 383-388.