

УДК 621.921

Г. Писаренко¹, докт. техн. наук;
О. Войналович², канд. техн. наук; А. Майло¹, канд. техн. наук

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

²Національний університет біоресурсів і природокористування
України

АМПЛІТУДНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИСКРЕТНОЇ НЕПРУЖНОСТІ СУБМІКРОКРИСТАЛІЧНОГО ТИТАНУ VT1-0 ЗА БАГАТОЦИКЛОВОГО НАВАНТАЖУВАННЯ

Резюме. Структурна неоднорідність конструкційних матеріалів проявляється під час механічних випробувань у вигляді масштабного фактора або розкиду результатів втомних випробувань. Наслідком такої неоднорідності є нерівномірний розподіл у навантаженому матеріалі локальної напруженості, еволюція якої є немонотонною. Амплітудно-часові параметри локальної нестабільності матеріалу під навантаженням залежать від рівня напружень у локальному об'ємі розміром у кілька зерен полікристала. Прояв ефекту структурної неоднорідності на пружнопластичні властивості матеріалу за дії знакозмінного деформування полікристала, виявлений Баушингером, проявляється під час змінного навантажування і супроводжується зміненням фізико-механічних властивостей матеріалу з перших циклів навантажування. Отримано амплітудні характеристики змінення гомогенності субмікрокристалічного титану VT1-0 в об'ємному наноструктурованому стані за дії змінного навантажування. Виявлено закономірності кінетики непружності матеріалу з пластичною нестабільністю після попереднього оброблення інтенсивним пластичним деформуванням. Запропоновано феноменологічні аналогії кривих багатоциклової втоми і характеристик розподілу параметрів неоднорідності пошкодження поверхневого шару матеріалу під час втоми лабораторних зразків.

Ключові слова: втома, розсіяне пошкодження, наноструктурований матеріал, непружність, пошкоджуваність.

G. Pisarenko, O. Voynalovich, A. Maylo

THE AMPLITUDE CHARACTERISTICS OF DISCRETE INELASTIC SUBMICROCRYSTALLINE TITANIUM VT1-0 AT HIGH- CYCLE LOADING

Summary. The nature of polycrystalline materials manifests itself during mechanical tests of materials as a scale factor or the fatigue test results scattering. The consequence of the structural inhomogeneity is the non-uniform distribution in the loaded specimen the evolution of which is not monotonous. The amplitude-time parameters of local instability of the material under loading are dependent on the actual stress level in the local volume of the size of a few polycrystalline grains. The effect of structural inhomogeneity on the elasto-plastic properties of the material under the action of the alternating deformation of a polycrystal was observed by Bauschinger. It manifests itself under variable loading and is accompanied by a change in the mechanical properties of the material starting from the first cycles of loading. The amplitude characteristics showing the change in the VT1-0 alloy homogeneity in a three-dimensional nanostructured state under variable loading are obtained. The regularities governing the inelasticity kinetics of the material with plastic instability after a severe plastic deformation pretreatment are established. The phenomenological analogies of the high-cycle fatigue and statistical distribution characteristics of the parameters of non-uniform damage in the material surface layer of a laboratory specimen in fatigue are proposed.

Key words: fatigue, scattered damage, nanostructured material, inelasticity, damage.

Вступ. Закономірності пошкоджуваності сталей і сплавів, представлені у наукових публікаціях на основі аналізу експериментальних досліджень лабораторних зразків, дозволяють інтегрально оцінити механічні властивості матеріалів. Структурна

неоднорідність полікристалів є їх характерною особливістю, що проявляється під час механічних випробувань конструкційних матеріалів у вигляді масштабного фактора або розкидання результатів втомних випробувань. Наслідком структурної неоднорідності будови матеріалу є нерівномірний розподіл в об'ємі зразка напруженості, еволюція якої характеризується закономірністю, зумовленою пружнопластичними властивостями матеріалу та умовами навантажування [1]. Амплітудно-часові параметри локальної нестабільності матеріалу за циклічного навантажування залежать від рівня напружень у локальному об'ємі, обмеженому розміром 4 – 5 діаметрів структурних елементів [2].

Явище локалізації втомного пошкодження використовують для виявлення на ранніх стадіях деформування місць руйнування за результатами визначення параметрів акустичної емісії, джерелом якої є пластично деформовані зерна, розташовані у зоні утворення розвинених смуг ковзання на стадії перед розвитком зони макропластичної течії зразка [3]. Результати дослідження впливу структурної неоднорідності на пружнопластичні властивості полікристалічного матеріалу за втоми показали, що змінне навантажування супроводжується зміненням фізико-механічних властивостей матеріалу, починаючи з перших циклів навантажування [4]. У роботі [1] встановлено, що це явище характеризується автомодальністю, що дозволяє використовувати модель накопичування пошкодження як на стадії розсіяної пошкоженості, так і на стадії локальної нестабільності матеріалу.

У роботі [5] пошкоджуваність за циклічного навантажування представлено величиною накопиченої мікропластичної деформації. Кількісне оцінювання пошкоженості отримано за допомогою тензометрії, шляхом планіметрування площі фігури Ліссажу еліптичної форми на екрані електронно-променевого приладу. Метод характеризується високою чутливістю за напружень, близьких до границі витривалості для більшості конструкційних матеріалів і дає інтегральну оцінку пружнопластичних властивостей. Для високоміцних сплавів з високою добротністю застосування методу інтегрального оцінення пошкоженості, як суми накопиченої мікропластичної деформації, не забезпечує належної точності за рівня відносної деформації нижче 10^{-6} для достовірного визначення ступеня пошкоженості матеріалів.

Результати досліджень [6] описують залежність еволюції структури від амплітудно-часових параметрів змінного навантажування з урахуванням структурної неоднорідності. Ефективність методу вимірювання параметра пошкоженості досягнуто внаслідок урахування локальних особливостей поведінки поверхні зразка матеріалу за циклічного деформування. Результати досліджень [6], отримані на алюмінієвих сплавах, відповідають закономірностям статистичних вимірювань параметрів гомогенності цих матеріалів, визначених методом вимірювання твердості [7].

Мета роботи – оцінити кінетичні закономірності статистичних характеристик дискретної непружності субмікроструктурного (СМК) титану VT1-0 за змінного навантажування.

У даній роботі представлено результати дослідження амплітудних залежностей структурної неоднорідності і дискретної непружності СМК титанового сплаву, виготовленого на основі технічно чистого титану VT1-0, за багатоциклового навантажування. Досліджено матеріал VT1-0 з високим рівнем структурної неоднорідності, отриманої внаслідок інтенсивного пластичного деформування (ПД). Об'ємні заготовки матеріалу для виготовлення зразків були надані співробітниками Запорізького національного технічного університету.

Лабораторні зразки було виготовлено у вигляді плоских пластин двоступеневої форми розмірами 1,5x18x30 мм. Довжина робочої частини зразків становила 18 мм. Зразки навантажували з частотою 600 Гц на першій формі резонансних коливань.

Резонансний режим навантажування дозволяє уникнути неконтрольованого впливу деяких нестабільних параметрів експерименту, а саме, наслідків механічного оброблення поверхні та розкиду макровластивостей матеріалу окремих зразків.

Застосований підхід забезпечує достовірність результатів експерименту на рівні 95% та дозволяє мінімізувати кількість лабораторних зразків для втомних випробувань. Схему розташування зон вимірювання на поверхні зразків показано на рис. 1. Резонансно-контактний метод [6] базується на енергетичному оцінюванні ступеня деформування матеріалу в контактній зоні поверхні за параметром зсуву фази між напруженням і деформацією за амплітуд циклічних напружень σ_a , менших границі витривалості матеріалу σ_{-1} . Метод характеризується високою виокремівною здатністю і чутливістю, що досягнуто шляхом прецизійного позиціонування зони контактної взаємодії коливальної системи з поверхнею досліджуваного об'єкта з дискретністю 10^{-3} мм. Для досягнення заданої достовірності (95%) результатів статистичних вимірювань під час втомних випробувань згідно з теоремою Бернуллі [8] у даній роботі експериментальні залежності побудовано на базі $2 \cdot 10^3$ значень вимірювань у контрольованих перерізах зразка. Амплітуда циклічних напружень 400 МПа, реалізована під час навантажування, згідно з даними [9] відповідає $\pm 10\% \sigma_{-1}$.

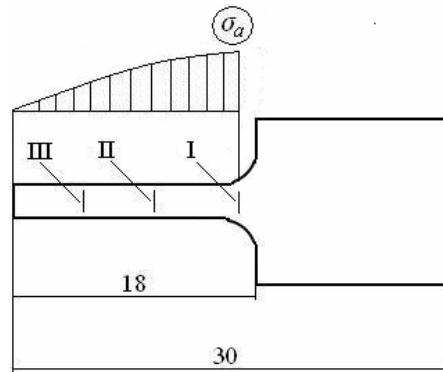


Рисунок 1. Схема розташування зон вимірювання на поверхні зразка: I – вузловий переріз; II – на відстані 5 мм від вузлового перерізу; III – на відстані 10 мм від вузлового перерізу; σ_a – епюра амплітуд циклічних напружень удовж робочої частини зразка

Figure 1. Arrangement of measuring zones on the sample surface: I – nodal section; II – at a distance of 5 mm from the nodal section; III – at a distance of 10 mm from the nodal section; σ_a – diagram amplitude cyclic stresses along the working part of the sample

Амплітудні характеристики пошкоженості отримано за результатами статистичних вимірювань резонансно-контактним методом [6]. Діаграми амплітудних залежностей дискретної непружності (рис. 2) побудовано у координатах $D = f(\sigma_a)$, де D – нормоване значення дисперсії параметра непружної деформації (кута зсуву фаз між напруженням і деформацією) згідно з фазовим методом [5]; σ_a – амплітуда максимальних циклічних напружень у перерізах зразка (I, II та III на рис. 1). Амплітудні характеристики кінетики неоднорідності структури зразків титану ВТ1-0 представлено для двох станів: 1 – початкового (кількість циклів навантажування до руйнування $N=10^6$ циклів), 2 – субмікросталічного ($N=10^7$ циклів).

Відмінністю представлених на рис. 2 кривих 1 та 2, характерних для зазначених умов навантажування, є стрімкий нахил кривої 2 у зоні високих значень D , що відображає різну динаміку процесів гомогенізації неоднорідності деформування структурних елементів. Зі зростанням амплітуди циклічних напружень різниця у нахилі кривих зменшується.

У роботі [10] досліджено залежність характеристик опору втомі за циклічного навантажування від розміру зерна і показано, що внаслідок високого рівня неоднорідності сильно деформованої структури матеріалу фрактограми зразків матеріалу істотно відрізняються. Цьому відповідає й висновок, отриманий з аналізу форми кривих на рис. 2.

Рівень нормованої дисперсії після ПД суттєво знижується, до рівня дисперсії початкового матеріалу (з 20% розкидом), після циклічного навантажування ($N = 10^7$ циклів), що на порядок перевищує тривалість ($N = 10^6$ циклів) навантажування зразка початкового матеріалу. Отже, після ПД формується об'ємна структура з підвищеною здатністю опору втомі, причини і механізми чого досліджено у роботах [10, 11]. То ж можна зробити висновок, що стан вичерпання пластичності, як критерій граничного стану розсіяної пошкодженості [1] наноструктурованого матеріалу, досягається за

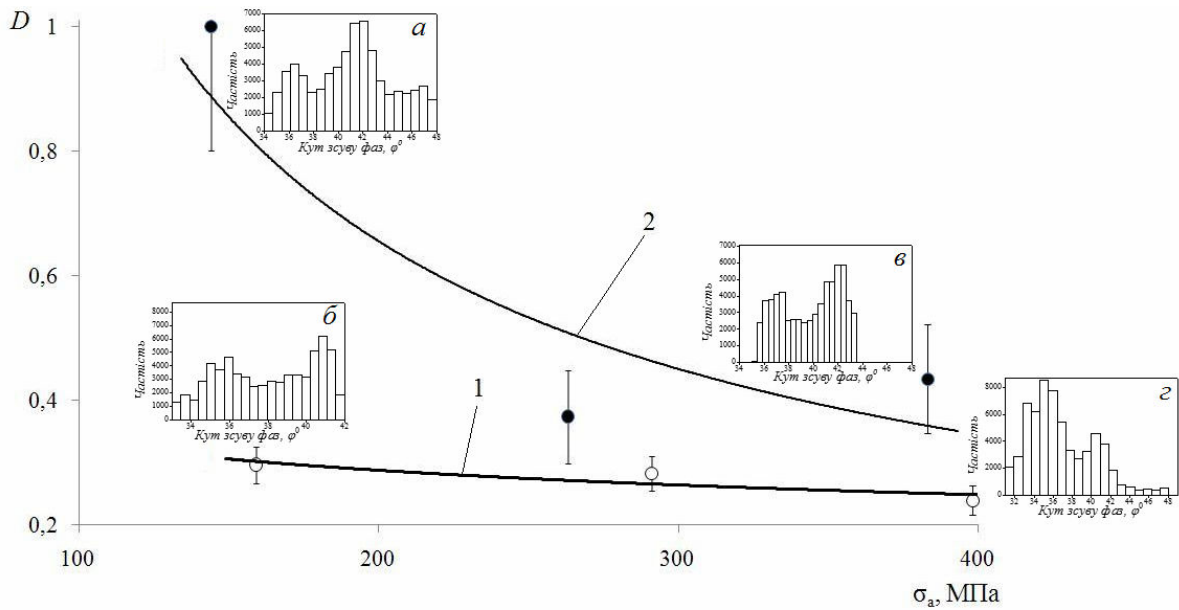


Рисунок 2. Характеристики дискретної непружності титанових сплавів: 1 – початковий стан; 2 – оброблення ПД; а, б – гістограми розподілу непружності, $\sigma_a = 150$ МПа; в, г – гістограми розподілу непружності, $\sigma_a = 400$ МПа; а, в – $N = 10^7$ циклів; б, г – $N = 10^6$

Figure 2. Characteristics of discrete inelasticity of titanium alloys: 1 – original state; 2 – treatment of severe plastic deformation; а, б – histogram of the distribution of inelasticity, $\sigma_a = 150$ МПа; в, г – histogram of the distribution of inelasticity, $\sigma_a = 400$ МПа; а, в – $N = 10^7$ cycles; б, г – $N = 10^6$

співставних рівнів амплітуд циклічних напружень, але за кількості циклів, на порядок більше, ніж для початкового матеріалу.

Основний період стадії високої інтенсивності еволюції мікроструктурних напружень у СМК титані відповідає періоду перебування під навантаженням за обмежених довговічностей, $10^4 - 10^5$ циклів навантажування для початкового матеріалу за амплітуди циклічних напружень $1,5\sigma_{-1}$, як це впливає із зіставлення з базовою кількістю циклів для лівої частини кривої 2 (рис. 2). Феноменологічно ці дві характеристики (гомогенізації мікроструктурних напружень і вичерпання пластичності у локальній зоні) представляють у різних параметрах єдиний процес накопичування пошкодженості у титановому сплаві після ПД, а нахили кожної кривої на рис. 2 характеризують еквівалентну інтенсивність процесу втоми за дії циклічного навантажування для різних зразків мікроструктур.

У роботах [9, 10] досліджено вплив структурного стану на механічні властивості матеріалів і механізми руйнування у діапазоні довговічностей $10^4 - 10^5$ циклів, де

перебуває умовна межа мало- і багатоциклової втоми. У цьому діапазоні відбувається зміна нахилу характеристик втоми. Ймовірною причиною змінення параметрів опору втомі матеріалу є пластична нестабільність, зумовлена структурними перетвореннями, зміцненням поверхні, наявністю двох механізмів пошкодження матеріалу. За тривалої дії високих рівнів циклічних напружень вплив зазначених чинників на параметри опору втомі знижується, що й зумовило зменшення нахилу правої частини кривої 2 (рис. 2).

Аналогічні закономірності можливо мають місце й для інших металевих

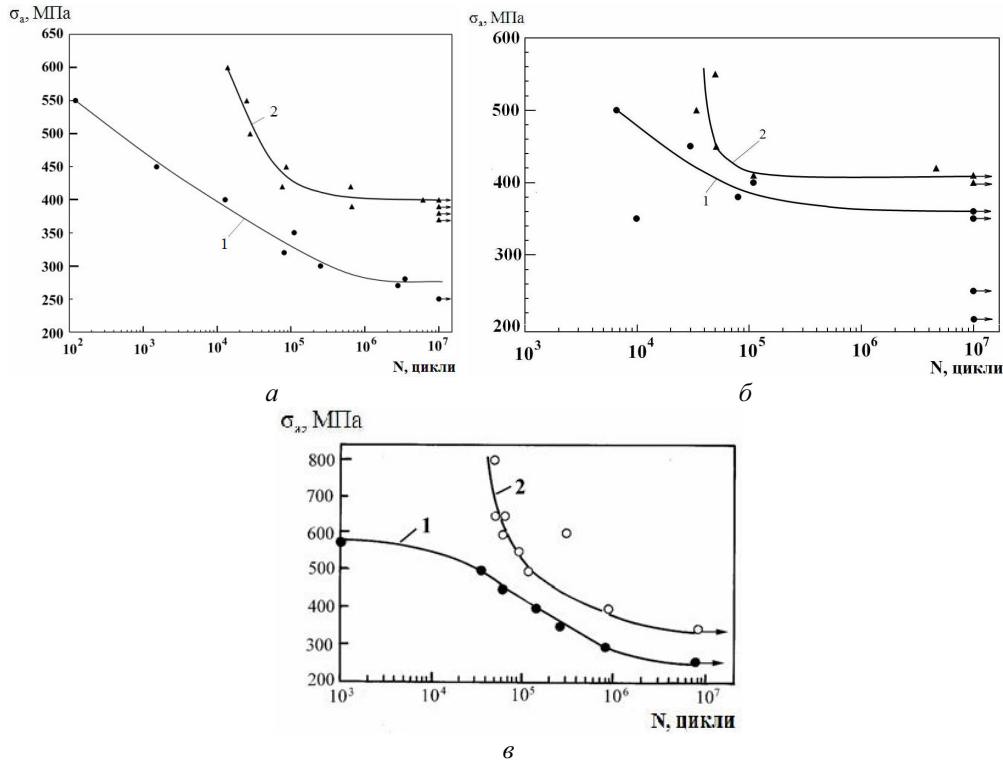


Рисунок 3. Криві втоми полікристалічних матеріалів: а – титан VT1-00 [9]; б – сплав Zr-2,5%Nb [9]; в – аустенітна сталь X18N10T [12]; 1 – початковий стан; 2 – оброблення ІПД

Figure 3. S-N curves of polycrystalline materials: a – titanium VT1-00 [9]; б – alloy Zr-2,5%Nb [9]; austenitic steel X18N10T [12]; 1 – original state; 2 – treatment of severe plastic deformation

конструкційних матеріалів у стані після ІПД з різними механічними властивостями. Результати досліджень, викладені у роботах [9, 12] і представлені на рис. 3 для титанового, цирконієвого і хромонікелевого сплавів, підтверджують зроблені висновки. Ідентичність взаємного розташування кривих втоми зазначених матеріалів у початковому і наноструктурованому стані можна зіставити з характеристиками фундаментальних ознак поведінки сильно деформованих полікристалічних матеріалів за змінного навантажування, до яких належать кінетичні діаграми пошкодженості (криві 1 та 2 на рис. 2).

Подібність форми характеристик кінетики гомогенності наноструктурованого матеріалу за втоми, отриманих на рівнях напружень, що відповідають рівням нижче границі витривалості на великих базах навантажування, дозволяє феноменологічно зв'язати досліджувані закономірності еволюції статистичних параметрів дискретної непружності з характеристиками пошкодженості наноструктурованих матеріалів.

Подальші дослідження вказаного взаємозв'язку фізико-механічних параметрів СМК матеріалів забезпечать розвиток обґрунтованих методологічних підходів щодо кількісного оцінювання пошкодженості наноструктурованих матеріалів, спрямованих на прогнозування довговічності конструкційних елементів на великих базах циклічного навантажування.

Висновки. Виявлено кінетичні закономірності статистичних характеристик дискретної непружності за змінного навантажування СМК титану. Запропоновано феноменологічний критерій подібності кінетичних характеристик пошкоджуваності і характеристик витривалості полікристалічних матеріалів.

Conclusions. The regularities governing the inelasticity kinetics of the material with plastic instability after a severe plastic deformation pretreatment are established. The phenomenological analogies in the high-cycle fatigue and statistical distribution characteristics of the parameters of non-uniform damage in the material surface layer of a laboratory specimen in fatigue are proposed.

Список використаної літератури

1. Яковлева, Т.Ю. Локальная пластическая деформация и усталость металлов [Текст] / Т.Ю. Яковлева. – К.: Наук. думка, 2003. – 238 с.
2. Богачев, И.Н. Статистическое металловедение [Текст] / И.Н. Богачев, А.А. Вайнштейн, С.Д. Волков. – М.: Металлургия, 1984. – 176 с.
3. Никитин, Е.С. Прогнозирование мест разрушения в металлических материалах акустическим методом на примере сталей М16С и Ст. 3Сп [Текст] / Е.С. Никитин // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309. – № 8. – С. 64 – 69.
4. Столяров, В.В. Эффект Баушингера в ультрамелкозернистых металлах [Текст] / В.В. Столяров // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2006. – Т. 72. – № 9. – С. 45 – 49.
5. Трошенко, В.Т. Усталость и неупругость металлов [Текст] / В.Т. Трошенко. – К.: Наук. думка, 1971. – 268 с.
6. Майло, А.Н. Резонансный метод контроля неупругости конструкционных материалов [Текст] / А.Н. Майло // Пробл. прочн. – 2009. – № 3. – С. 124 – 133.
7. Лебедев, А.А. Оценка поврежденности конструкционных сталей по параметрам рассеяния характеристик твердости материалов в нагруженном и ненагруженном состоянии [Текст] / А.А. Лебедев, В.П. Швец // Пробл. прочности. – 2008. – № 3. – С. 29 – 37.
8. Степнов, М.Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний [Текст] / М.Н. Степнов. – М.: Машиностроение, 1985. – 232 с.
9. Терентьев, В.Ф. Циклическая прочность субмикро- и нанокристаллических металлов и сплавов (обзор) [Текст] / В.Ф. Терентьев // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2010. – № 1. – С. 8 – 24.
10. Дронов, В.С. Влияние структурного состояния на кинетику локального усталостного разрушения конструкционных сталей [Текст]: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.16.01 / Дронов Виктор Степанович. – Тульский государственный университет. – Тула, 2008. – 46 с.
11. Новые материалы [Текст]; под научной редакцией Ю.С. Карабасова. – М.: МИСИС. – 2002 – 736 с.
12. Усталостная прочность аустенитной стали X18H10T после равноканального углового прессования [Текст] / В.Ф. Терентьев, С.В. Добаткин, Д.В. Просвирнин и др. // Деформация и разрушение материалов. – 2008. – № 10. – С. 30 – 38.

Отримано 06.08.2013