

**РОЗПОДІЛ ЛОКАЛЬНОЇ НЕПРУЖНОСТІ ПРИ ЦИКЛІЧНОМУ  
НАВАНТАЖУВАННІ МЕТАЛЕВИХ МАТЕРІАЛІВ****О.В.Войналович<sup>2</sup>, Г.Г.Писаренко<sup>1</sup>, І.М.Васинюк<sup>1</sup>, П.М.Копчевський<sup>1</sup>,  
А.М.Майло<sup>1</sup>, Ю.М.Голованьов<sup>1</sup>****DISTRIBUTION OF LOCAL INELASTICITY IN METALLIC  
MATERIALS UNDER CYCLIC LOADING****A.V.Vojnalovich<sup>2</sup>, G.G.Pisarenko<sup>1</sup>, I.M.Vasinyuk<sup>1</sup>, P.M.Kopchevsky<sup>1</sup>,  
A.N.Maylo<sup>1</sup>, Yu.M.Golovan'ov<sup>1</sup>**<sup>1</sup>*Інститут проблем міцності ім. Г.С.Писаренка, м. Київ, Україна*<sup>2</sup>*Національний аграрний університет, м. Київ, Україна*

**Abstract.** Relation between the statistical parameters of distributing of local inelasticity in the microvolumes of the material and characteristics of fatigue of metallic materials is set. The ranges of longevity to destruction of samples are exposed, in which monotony of change of the rationed dispersion of local inelasticity of microstructure of the samples is observed.

Різноманітні дослідження впливу циклічного навантажування на кінетику розсіяного та локального пошкодження у металевих матеріалах підтверджують стадійний характер накопичування втомного пошкодження [1 - 3]. Разом з тим сучасні методи неруйнівного контролю не дозволяють однозначно ідентифікувати ту чи іншу стадію розвинення втомного пошкодження, що дозволило б спрогнозувати залишковий ресурс металоконструкції.

Багато в чому складність методів оцінення ступеню деградації матеріала на стадії розвивання розсіяного пошкодження полягає в тому, що протягом усього періоду циклічного навантажування у матеріалі водночас присутні різні типи мікроструктури, а також зони, що не зазнали змін [4]. Параметри режиму навантажування та умови довкілля впливають на ступінь локалізації пластичної деформації у різних мікрооб'ємах матеріалу, а тому перспективними є методи дослідження розсіяного пошкодження у матеріалі, що враховують статистичність мікрохарактеристик матеріалу [5, 6].

Так, з використанням методів статистичного аналізу у статті [7] було виявлено особливості кінетичних залежностей емпіричного параметра, пов'язаного зі структурною неоднорідністю металу, що дозволяє обґрунтовано визначати характерні моменти процесу втомного пошкодження. Застосування методу ЛМ-твердості [8] підтвердило стадійність деградування матеріалу у процесі навантажування, нелінійність (відсутність монотонності) у розвиванні пошкодженості із зростанням деформації.

Тому метою даної статті було встановити зв'язок між статистичними параметрами розподілу локальної непружності у мікрооб'ємах матеріалу (як параметру гомогенності механічних властивостей) з характеристиками втоми зразків металевих матеріалів, зруйнованих за різних режимів циклічного навантажування.

Втомні випробування зразків конструкційних матеріалів характеризуються суттєвим розкиданням результатів за довговічністю, що збільшується з наближенням до границі витривалості. Це пояснюється статистичністю процесу втомлювання матеріалу, коли з множини мікрооб'ємів з різною інтенсивністю накопичення мікроструктурних змін реалізація макровтомного пошкодження відбувається лише у декількох з них за певного рівня циклічних напружень.

Разом з тим, із збільшенням кількості циклів навантажування паралельно з розвиванням макропошкоджень у мікроструктурі матеріалу перерозподіляються

локальні мікронеупружності, не досягаючи при цьому небезпечних величин для мікроструктурних одиниць матеріалу. Таким чином мікроструктуру зразка біля втомного зламу можна розглядати як множину мікрооб'ємів з різним ступенем реалізації втомного пошкодження, статистичні параметри якої залежать від кількості циклів до зруйнування зразка та рівня циклічних напружень у досліджуваному перерізі. Тобто від характеристик, які формують криві втоми матеріалу для заданих експлуатаційно-технологічних чинників. Отже простежуються аналогії у розподілі локальної неупружності та розподілі макровтомного пошкодження в результаті циклічного навантажування.

У даній статті параметри локальної неупружності було визначено на зразках конструкційних матеріалів, зруйнованих за різних режимів циклічного навантажування, зокрема частоти циклу. Як метод дослідження було застосовано акустичний метод визначення локальної неупружності [9]. Схему експерименту зображено на рис. 1.

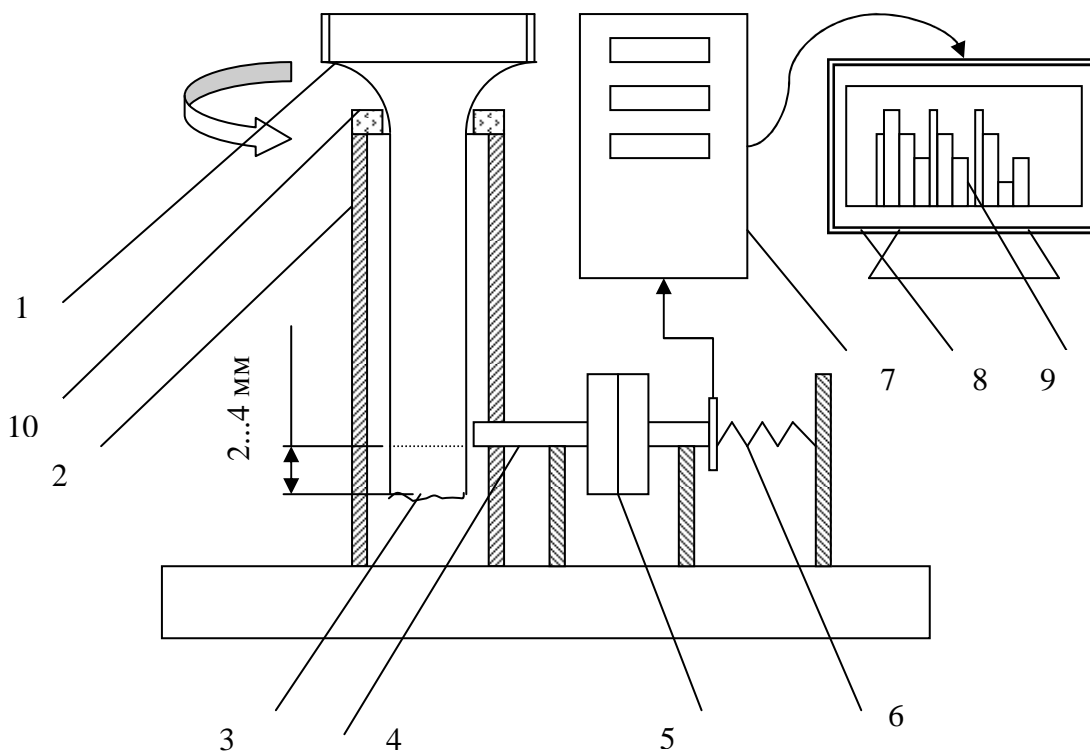


Рис. 1. Схема вимірювання ступеню локальної неупружності у зруйнованих внаслідок циклічного навантажування зразках у перерізі біля поверхні втомного зламу: 1 – частина зруйнованого зразка, 2 – спрямівний стакан, 3 – втомний злам, 4 – голчастий хвилеввід, 5 – п'єзодатчик, 6 – підпружинник, 7 – комп'ютеризований аналізатор сигналів, 8 – монітор, 9 – діаграма розподілу локальної неупружності, 10 – регулятор висоти зразка

У роботі було досліджено розподіл локальної неупружності у зразках із алюмінієвого сплава АмгбН, нікелевого сплава ЕП202 та сталі ВНС-25, випробуваних при симетричному розтязі-стискові з частотами від 35 до 10000 Гц. Криві втоми, що відповідають реалізованим режимам циклічного навантажування досліджуваних матеріалів, представлено на рис. 2. Втомні випробування зразків алюмінієвого сплава та сталі ВНС-25 було виконано на базі  $2 \cdot 10^7$  цикл, а сплава ЕП202 -  $10^9$  цикл (частота навантажування в останньому випадку становила 10 кГц). Таким чином стало можливим порівняти розподіли локальної неупружності у зразках для різних поєднань величини циклічних напружень, частоти і бази навантажування.

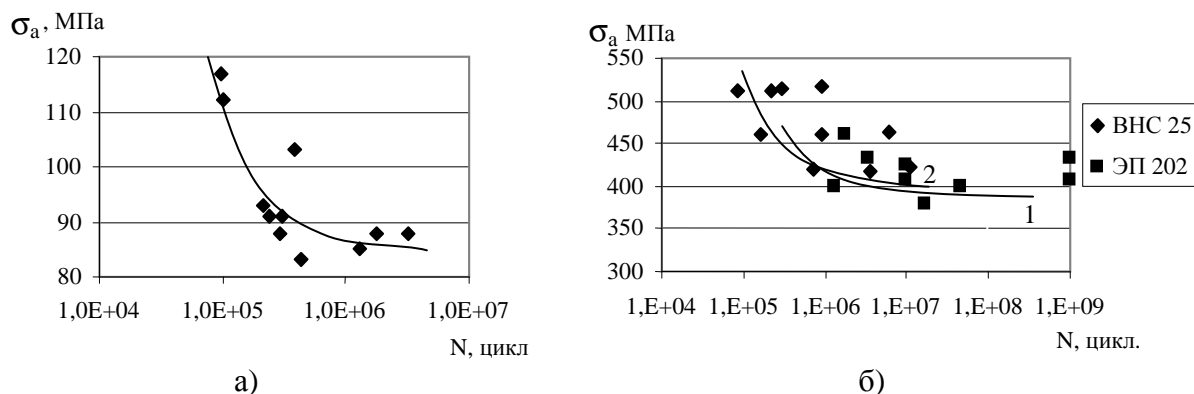


Рис. 2. Результати втомних випробувань досліджених сплавів (а - сплав АмгбН, б – 1- сплав ЭП202 і 2 - сталь ВНС-25).

На рис. 3 представлено для досліджених сплавів діаграми, що встановлюють залежності нормованої дисперсії локальної непружності мікроструктури зруйнованих зразків від їх довговічності. З представлених діаграм видно, що у діапазоні довговічностей  $10^5 - 10^6$  цикл (ліві частини графіків) нормована дисперсія локальної непружності для більших значень циклічної довговічності до зруйнування стає меншою, що відповідає збільшенню гомогенності мікроструктури.

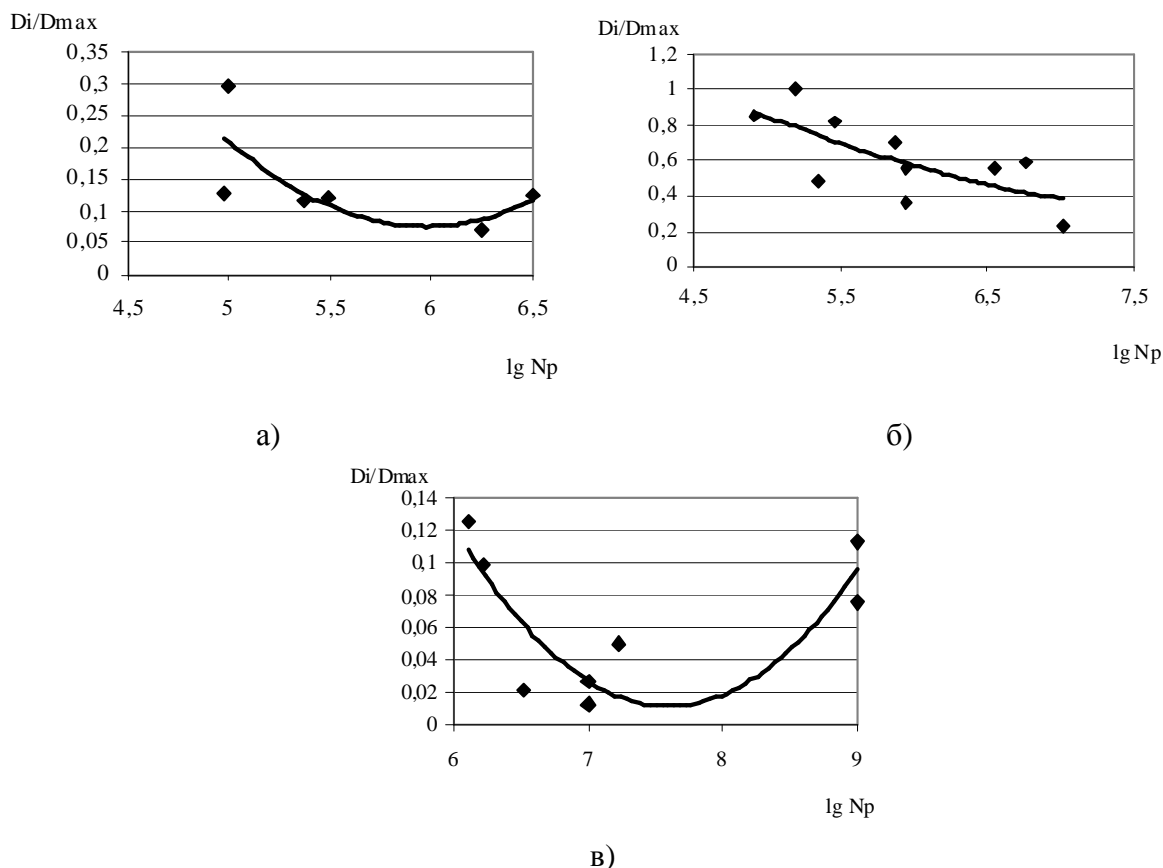


Рис. 3. Залежності нормованої дисперсії локальної непружності мікроструктури зруйнованих зразків від їх довговічності (а - сплав АмгбН, б – сплав ЭП202, в - сталь ВНС-25).

Ці закономірності, як у випадку аналізу параметрів кривих втоми конструкційних матеріалів, характерні для великих щодо границі витривалості циклічних напружень, що виявляється у меншому розкиді довговічностей зруйнованих зразків.

Для більших довговічностей (понад  $10^5$  –  $10^6$  цикл) характерним є підвищення неоднорідності сформованої мікроструктури, на що вказує підвищення дисперсії локальної непружності. Це призводить до значного розкиду результатів втомних випробувань на великих базах циклічного навантажування, в області циклічних напружень близьких до границі витривалості матеріалу. Можна зазначити, що зону довговічностей в околі  $10^5$  –  $10^6$  цикл деякі автори розглядали з точки зору розриву кривих втоми, що може бути пояснено саме наявністю мінімумів на діаграмах рис. 3.

Немонотонні кінетичні діаграми з проміжним мінімумом характеристичного параметра локальної непружності мікроструктури авторами було раніше отримано для титанових сплавів [10], порівнюючи статистичні характеристики локальної непружності на різних стадіях втоми. Аналогії у змінні ступеню локальної непружності мікроструктури, сформованої внаслідок циклічного деформування, отримані із застосуванням різних методик її визначення, підтверджують достовірність запропонованих підходів визначення макрохарактеристик процесу втомлювання матеріалів на основі аналізу статистичних параметрів непружності мікроструктури

### **Висновки**

Встановлено, що залежності нормованої дисперсії локальної непружності мікроструктури зруйнованих зразків від їх довговічності є немонотонними.

Виявлено діапазони довговічностей до руйнування, у межах яких спостерігається монотонність змінення нормованої дисперсії локальної непружності мікроструктури зруйнованих зразків.

Встановлено, що екстремум нормованої дисперсії локальної непружності розташований у діапазоні довговічностей до руйнування  $10^6$ - $10^7$  цикл.

### **Література**

1. Melisova D., Weiss B., Stickler R. The formation and stability of PSB's of Cu single crystals under stress controlled cycling // *Fatigue'99.: Proc. of the seventh Int. Congress.* – Beijing, P.R.China, - 8-12 June, 1999. – V. 1. – Beijing: Higher Education Press, 1999. – P. 187 – 192.
2. Яковлева Т.Ю., Войналович О.В., Матохнюк Л.Є. Особливості формування дислокаційної структури нікелевого сплаву за дії циклічного навантажування // *Металознавство та обробка металів.* – 2001. - № 4. – С. 19 – 25.
3. Л.Р.Ботвина. Кинетика разрушения конструкционных материалов.- Наука, 1989. – 230 с.
4. Т.Ю.Яковлева. Локальная пластическая деформация и усталость металлов. – К.: Наук. думка, 2003. – 236 с.
5. Горынин И.В., Тимофеев Б.Т., Сорокин А.А. Вероятностный анализ механических свойств материалов корпусов реакторов ВВЭР-1000 // *Пробл. прочности.* – 2006. - № 2. – С. 15 – 28.
6. Радченко А.И., Корчук Е.Ю., Пантелеев В.М. Оценка усталостного повреждения деталей по результатам измерений на инкубационной стадии усталости / *Проблеми динаміки і міцності в газотурбобудуванні: Тези доповідей міжнародної науково-технічної конференції.* – Київ: Інститут проблем міцності НАН України, 2001. – 184 с.
7. Писаренко Г.Г., Войналович О.В., Голованов Ю.М., Васинюк І.М. Пошкоджуваність та структурна неоднорідність титанового сплава ВТ14 при циклічному навантажуванні // *Пробл. прочности.* – 2003. - № 6. - С. 75 – 84.
8. Лебедев А.А., Маковецкий И.В., Музыка Н.Р., Волчек Н.Л., Швец В.П. Оценка поврежденности материала по рассеянию характеристик упругости и статистической прочности // *Пробл. прочности.* – 2006. - № 2. – С. 5 – 14.
9. Писаренко Г.Г., Васинюк И.М., Войналович А.В., Копчевский П.М., Майло А.М. Влияние циклического нагружения на характеристики неупругости жаропрочного сплава / *Тези доповідей Міжнародної науково-технічної конференції „Динаміка, міцність і ресурс машин і конструкцій”, Київ, 1-4 листопада 2005р., Ін-т проблем міцності ім. Г.С.Писаренка НАН України.* – Т. 2. – С. 270 – 271.
10. Писаренко Г.Г., Войналович А.В., Васинюк И.М., Голованев Ю.М. Исследование закономерностей изменения статистических свойств титановых сплавов при циклическом нагружении // *Проблеми прочности,* 2001, № 3. – С. 80 -87.