

## **Влияние циклического нагружения на локальные структурные изменения в жаропрочном сплаве**

**Г. Г. Писаренко, И. М. Васинюк, А. В. Войналович, П. М. Копчевский, А. Н. Майло**

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

*Предложен методологический подход к оценке характеристик локальной неупругости металлических сплавов при циклическом нагружении по изменению характеристик случайного распределения локальной неупругости материала.*

**Ключевые слова:** дислокационная структура, повреждаемость, микропластические деформации, усталость, неупругость.

**Введение.** Данные о закономерностях эволюции дислокационной структуры конструкционных материалов при циклическом нагружении свидетельствуют о локальном характере структурных изменений [1–3]. Так, развивающиеся на начальной стадии повреждаемости микропластические деформации имеют локальный характер распределения по микрообъемам. Особенностью микрообъемов максимальных структурных изменений является повышенная чувствительность структурных элементов к внешним нагрузкам. Это обусловлено локальной концентрацией напряжений, концентрационной неоднородностью примесей и легирующих элементов, близостью к свободной поверхности. Сформировавшаяся таким образом поликристаллическая структура материала обладает особенностью, характерной для определенного макрообъема [4–6].

Макрохарактеристики физико-механических свойств поликристаллического тела (прочность, пластичность, неупругость и пр.) интегрально отображают механическое поведение материала при деформировании и обобщенно представляют неоднозначный характер реакции совокупности дискретных микроструктурных элементов со случайным распределением локальных особенностей физико-механических свойств конструктивного элемента или лабораторного образца материала на прикладываемую нагрузку. Изменение исходного распределения микросвойств неоднородной структуры соответствует процессу механической повреждаемости и обладает определенной закономерностью в зависимости от указанных выше факторов. Каждому состоянию повреждаемости соответствует такое распределение свойств микрообъемов, кинетика которого обладает стационарной закономерностью с характерными для данных условий нагружения свойствами. Таким образом, повреждаемость может быть представлена определенной последовательностью параметров случайного распределения локальных свойств, закономерность изменения которых отражает кинетику структурных изменений. Поврежденность конструкционных материалов проявляется в изменении макросвойств, например неупругих деформаций [7, 8] или твердости [9], что указывает на возможность корреляционной связи характеристик случайного распределения микросвойств с их макроскопическими аналогами.

Цель работы заключается в обосновании методологии количественной оценки поврежденности при усталости металла, основанной на кинетических характеристиках изменения дисперсии локальной нелинейности циклических деформаций.

**Методика исследования.** Нелинейность циклических деформаций представлена величиной угла сдвига фаз между прикладываемым напряжением и реакцией материала – деформацией в режиме резонансных колебаний объема материала, ограниченного зоной контактного нагружения поверхностного слоя толщиной 0,1 мм. Измерения угла сдвига фаз проводили на стандартных образцах, изготовленных из жаропрочного сплава на никелевой основе ЭП202 (ХН67ВМТЮ), после их разрушения в результате усталостных испытаний при частотах 100 Гц и 10 кГц в условиях симметричного растяжения–сжатия. Методика измерений описана в работах [10–12]. Объектом исследования служила кольцевая зона цилиндрической поверхности рабочей части разрушенных образцов вблизи месторасположения магистральной трещины.

Результаты исследования приведены на рис. 1–4. Из рис. 1, 2 видно, что для данного сплава частота циклического нагружения существенно влияет на сопротивление усталости. Однако в работе [13] установлено, что повышение частоты симметричного нагружения до 10 кГц не приводит к изменению характера структурных и фазовых преобразований микроструктуры сплава, в то время как в [3] показано, что с повышением частоты нагружения уменьшаются размеры микрообъемов, в которых существенно выражены структурные и фазовые изменения микроструктуры с преобладающей локализацией этих микрообъемов вблизи границ зерен при сохранении основных тенденций эволюции структуры.

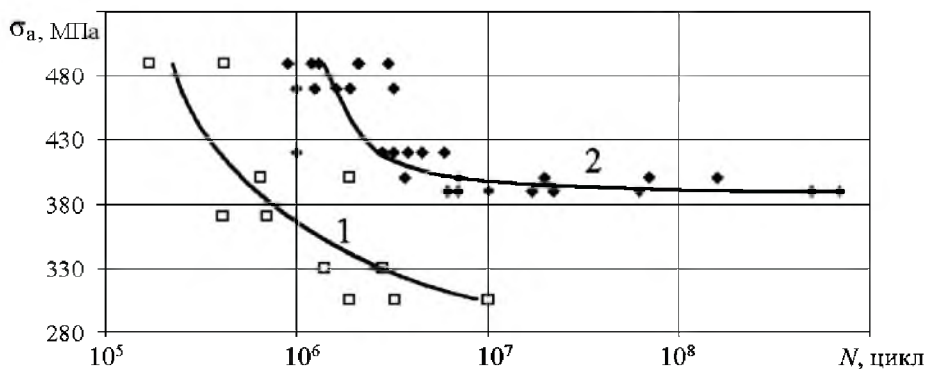


Рис. 1. Результаты усталостных испытаний образцов из жаропрочного сплава ЭП202 при частотах нагружения 100 Гц (1) и 10 кГц (2),  $\sigma_a$  – амплитуда циклических напряжений, МПа. (Здесь и на рис. 2–4:  $N$  – количество циклов до разрушения.)

Интенсивность накопления микроструктурных изменений разная, причем это различие существенно уменьшается при формировании магистральной трещины. Таким образом, к моменту усталостного разрушения образца в материале присутствуют микрообъемы с разной степенью эволюции микроструктуры, обусловленной возникновением различного количества характерных элементов, определяющих поврежденность материала. Так, для сплава

ЭП202 на стадии локального разрушения в зонах зерен, свободных от выделений упрочняющей  $\gamma$ -фазы, образуются деформационные полосы, из которых могут возникнуть усталостные микротрещины, изменяется пространственное расположение элементов дислокационной структуры относительно границ зерен и т.д.

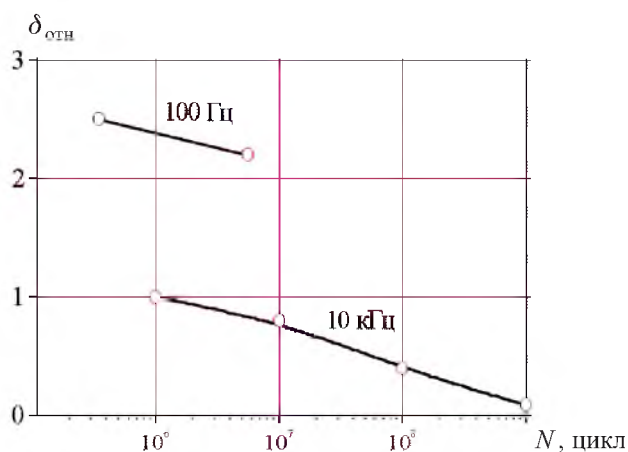


Рис. 2. Диаграммы изменения относительного значения дисперсии локальной неупругости циклической деформации  $\delta_{отн}$  образцов из сплава ЭП202.

**Анализ результатов.** В пределах зоны действия в материале циклических напряжений одного уровня совокупность равнонагруженных микрообъемов образца можно рассматривать как множество микроструктурных элементов с различной степенью эволюции. Степень структурных изменений в таком случае может характеризоваться кинетикой параметра распределения какого-либо свойства материала, определяющего индивидуальные особенности механической реакции материала лабораторного образца на циклическое нагружение при тестовых испытаниях. Данная феноменологическая модель позволяет сопоставить кинетику распределения параметра локальной неупругости с долговечностью образцов для амплитуд циклических напряжений в соответствующем диапазоне кривых усталости сплава ЭП202.

На рис. 2 представлены обобщенные данные, полученные усреднением по ряду характеристик, как результат измерений локальной неупругости циклических деформаций в 1000 дискретных точках поверхности 20 стандартных образцов для усталостных испытаний. Сравнение результатов измерений проводили в рамках разработанного подхода с привлечением пакета средств статистического анализа данных. Анализ кривых на рис. 1 и 2 показывает, что уменьшение относительного значения дисперсии локальной неупругости образцов при увеличении количества циклов нагружения изменяется в соответствии с ростом долговечности образцов со снижением амплитуды циклических напряжений. Представленные данные свидетельствуют, что особенности динамики диаграмм, отображающих величину дисперсии локальной неупругости при циклическом нагружении (рис. 2), и кривых усталости (рис. 1) обусловлены действием механизма влияния циклического деформирования на эволюцию структуры металлов [3], что может

быть следствием идентичности кинетики микро- и макрохарактеристик физико-механических свойств сплава в процессе усталости.

Рис. 3 иллюстрирует микроструктурные преобразования исследуемого материала при нагружении симметричными циклами растяжения–сжатия с частотой 100 Гц. С ростом количества циклов нагружения увеличиваются размеры микрообъемов максимально выраженных структурных изменений с уменьшенным количеством  $\gamma$ -фазы (рис. 3,б), что приводит к возникновению полос деформаций и развитию усталостных микротрещин (рис. 3,з).

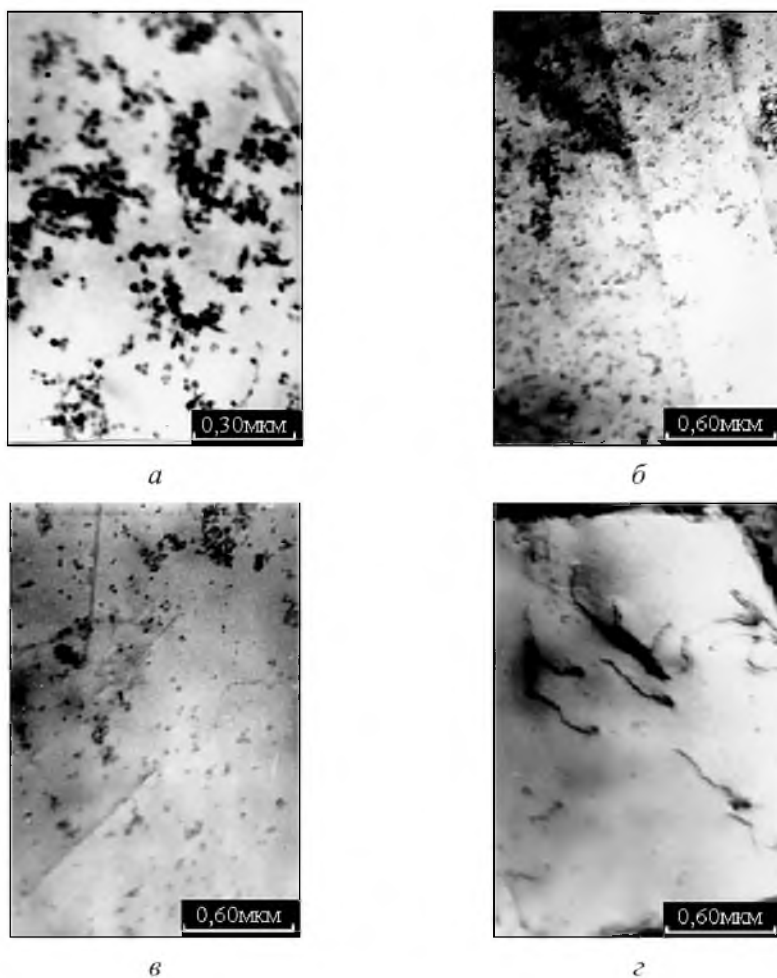


Рис. 3. Дислокационная структура никелевого сплава ЭП202 вблизи зоны разрушения образцов на частоте нагружения 100 Гц [3]: а – исходное состояние; б –  $N = 2 \cdot 10^5$  цикл; в –  $N = 10^6$  цикл; з –  $N = 10^7$  цикл.

Механизм указанного явления может быть описан с помощью модельных представлений о процессе усталостного повреждения [3], в соответствии с которыми локализация очагов зарождения трещин происходит путем образования локальных областей пластического деформирования на фоне относительно стабильной структуры и количество локальных областей до определенного момента процесса возрастает. Этапу локального разрушения

предшествует возникновение по схеме включение–матрица множества структурных зон, идентичных по степени исчерпания ресурса пластических свойств, но расположенных в объеме материала со свойствами, отличающимися в пределах естественной дисперсии локальных свойств материала. Это обстоятельство обуславливает дисперсию скоростей роста малых трещин, образующихся в зонах предразрушения, вследствие чего имеет место разброс долговечностей образцов при усталостных испытаниях [7, 14].

В работе [15] получены экспериментальные данные, которые объясняют зависимость между размером малых трещин (10–20 мкм) и напряженным состоянием при циклическом нагружении. Установлено, что в идентичных условиях нагружения трещины одной геометрии имеют разную динамику. Эти данные являются подтверждением приведенных в [15] положений о применимости характеристик локальной неупругости металла к оценке долговечности образцов при циклическом нагружении.

В соответствии с предложенной [3] моделью, при циклическом нагружении происходят локальные изменения пластических свойств материала, что сопровождается эволюцией микроструктуры в объеме материала, окружающего критические области. Это, естественно, приводит к изменению распределения внутренних напряжений микроструктуры, что является реакцией материала на циклическое деформирование, свойственной природе материала с поликристаллической структурой. Механизм локального изменения пластических свойств активизируется номинальными циклическими напряжениями, приложенными к образцу. Результатом циклического деформирования является известное из литературных источников, например [8], изменение макросвойств материала, которое может быть сопоставлено с кинетической характеристикой дисперсии параметра неупругости локальных объемов. Кривая на рис. 4 отображает изменение величины разброса локальной неупругости материала образцов, разрушенных при фиксированном количестве циклов. По мере развития поврежденности дисперсия проходит через минимум, который соответствует базе нагружения  $5 \cdot 10^7$  цикл. Материал образцов, разрушившихся на больших базах ( $10^9$  цикл), содержит структурную неоднородность, идентичную неоднородности материала, разрушенного на относительно малых базах ( $5 \cdot 10^6$  цикл). По-видимому, такое изменение механизма повреждаемости на больших базах нагружения связано с взаимодействием двух процессов. Одновременно действует механизм внутренних напряжений, обусловленный снижением неоднородности материала, и развивается процесс локального разрушения материала по указанной выше модели.

Учитывая предысторию нагружения каждого испытуемого образца, в соответствии с обобщенной диаграммой усталости [16] к определенному этапу усталости в материале происходят структурные изменения как по упругому, так и пластичному механизму. В итоге второй механизм преобладает и это вызывает развитие неупругих процессов, что соответствует возрастающему участку кривой на рис. 4.

Предложенный подход к анализу поврежденности базируется на закономерностях изменения характеристик локальной неупругости материала. С его использованием можно установить феноменологические закономерности

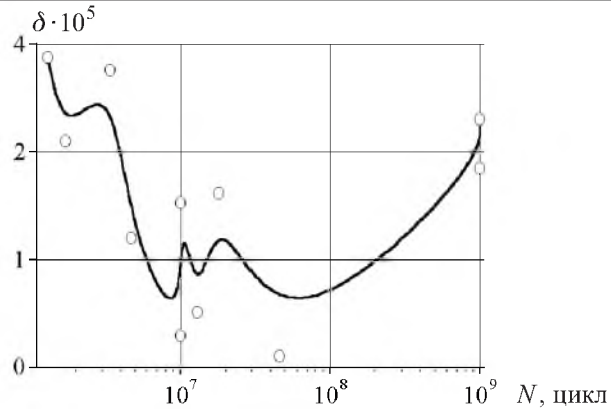


Рис. 4. Диаграмма изменения дисперсии неупругости  $\delta$  локальных объемов образцов из сплава ЭП202, разрушенных на частоте нагружения 10 кГц.

ти эволюции исследуемого сплава при циклическом нагружении путем анализа кинетики параметров распределения физико-механических свойств материала.

**Заключение.** Установлена корреляционная связь между параметрами случайного распределения характеристик локальной неупругости циклических деформаций вблизи зоны разрушения и дисперсией долговечностей образцов на диаграмме многоциклового усталости.

Методология оценки локальных особенностей физико-механических свойств образцов сплава ЭП202 при циклическом нагружении может быть использована для прогнозирования долговечности на больших базах нагружения.

## Резюме

Запропоновано методологічний підхід до оцінки характеристик локальної непружності металевих сплавів при циклічному навантажуванні за зміною характеристик випадкового розподілу локальної непружності матеріалу.

1. *Kruml T. and Polak J.* Cyclic strain localization and internal structure in aluminum-lithium alloy // *Fatigue'99*. – Beijing: Higher Education Press, 1999. – **1**. – P. 187 – 192.
2. *Яковлева Т. Ю., Войналович О. В., Матохнюк Л. С.* Кінетика структурних змін у сплаві АМг6Н за дії високочастотного асиметричного навантажування // *Металознавство та обробка металів*. – 2000. – № 4. – С. 12 – 19.
3. *Яковлева Т. Ю.* Локальная пластическая деформация и усталость металлов. – Киев: Наук. думка, 2003. – 236 с.
4. *Горицкий В. М., Терентьев В. Ф.* Структура и усталостное разрушение металлов. – М.: Металлургия, 1980. – 207 с.
5. *Матохнюк Л. Е.* Ускоренные усталостные испытания высокочастотным нагружением. – Киев: Наук. думка, 1988. – 200 с.

6. Яковлева Т. Ю. Использование методов Фурье-оптики для количественного анализа эволюции структурного состояния металлов в условиях циклического нагружения // Пробл. прочности. – 2000. – № 2. – С. 81 – 89.
7. Троценко В. Т., Красовский А. Я., Покровский В. В. и др. Сопротивление материалов. В 2 т. – Киев: Наук. думка, 1994. – 701 с.
8. Троценко В. Т., Куриат Р. И., Лебедев А. А. и др. Прочность материалов и конструкций. – Киев: Академперіодика, 2005. – 1086 с.
9. Лебедев А. А., Музыка Н. Р., Волчек Н. Л. Определение поврежденности конструкционных материалов по параметрам рассеяния характеристик твердости // Пробл. прочности. – 2002. – № 4. – С. 5 – 12.
10. Писаренко Г. Г., Войналович А. В., Голованев Ю. М., Василюк И. М. Исследование закономерностей изменения статистических свойств титановых сплавов при циклическом нагружении // Там же. – 2001. – № 3. – С. 80 – 87.
11. Писаренко Г. Г., Войналович О. В., Голованьов Ю. М., Василюк И. М. Пошкоджувальність та структурна неоднорідність титанового сплаву ВТ14 при циклічному навантажуванні // Там же. – 2003. – № 6. – С. 75 – 84.
12. Писаренко Г. Г., Войналович О. В., Голованьов Ю. М., Василюк И. М. Аналіз кінетичних характеристик пошкоджувальності титанових сплавів за умов циклічного навантажування // Праці конф. “Оцінка й обґрунтування продовження ресурсу елементів конструкцій” (6–9 черв. 2000 р.). – Київ: Логос, 2000. – С. 137 – 142.
13. Яковлева Т. Ю., Войналович О. В., Матюхнюк Л. С. Особенности формирования дислокационной структуры никелевого сплава за дії циклічного навантажування // Металознавство та обробка металів. – 2001. – № 4. – С. 19 – 25.
14. Писаренко Г. С., Стрижало В. А. Экспериментальные методы в механике деформируемого твердого тела. – Киев: Наук. думка, 1986. – 264 с.
15. Ботвина Л. Р. Кинетика разрушения конструкционных материалов. – М.: Наука, 1989. – 230 с.
16. Иванова В. С., Терентьев И. Ф. Природа усталости металлов. – М.: Металлургия, 1975. – 455 с.

Поступила 21. 11. 2005