

УДК 539.3

ДИАГРАММЫ КВАЗИХРУПКОГО РАЗРУШЕНИЯ ТЕЛ С ИЕРАРХИЕЙ СТРУКТУР ПРИ МАЛОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ

© 2011 г.

В.М. Корнев

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

kornev@hydro.nsc.ru

Поступила в редакцию 15.06.2011

Построены диаграммы квазихрупкого разрушения тел при малоцикловом нагружении. Получено условие скачкообразного продвижения вершины трещины. Даны оценки критической длины трещины и критического числа циклов при малоцикловой усталости. Критические параметры разрушения получены в замкнутом виде.

Ключевые слова: хрупкое и квазихрупкое разрушения, материалы с иерархией структур, малоцикловая усталость, кривые Пэриса.

Рассматривается распространение трещины скачками в казихрупких материалах с иерархией структур при малоцикловом нагружении. Предлагается использовать для анализа указанного процесса диаграммы квазихрупкого разрушения тел при циклическом нагружении. Эти диаграммы очень напоминают аналогичные диаграммы [1], построенные при однократном нагружении. При построении диаграмм используются необходимые и достаточные критерии разрушения по Нейберу–Новожилову [2, 3], а конкретная реализация критериев выполнена на основе модификации модели Леонова–Панасюка–Дагдейла [4, 5] для трещин нормального отрыва, когда поперечник зон предразрушения совпадает с поперечниками зон пластичности.

Диаграмма на плоскости «внешняя нагрузка – длина трещины» при циклическом нагружении состоит из трех подобластей, в первой из которых длина исходной трещины не меняется (трещина устойчива), во второй длина исходной трещины увеличивается на длину зоны предразрушения при каждом скачке трещины (трещина подрастает, оставаясь устойчивой, а материал охрупчивается только в зоне предразрушения), в третьей длина исходной трещины увеличивается катастрофически (трещина неустойчива). Рассматривается пульсирующий режим нагружения, амплитуда которого постоянна, и эта амплитуда при однократном нагружении соответствует нагрузке между критическими нагрузками по необходимому и достаточному критериям. Для второй подобласти описан процесс накопления повреждений в зонах предразрушения при линейном и нели-

нейном суммировании повреждений.

Изменения в подобласти диаграммы квазихрупкого разрушения для циклического нагружения с учетом накопления повреждений описываются неравенствами

$$\frac{\sigma_{\infty i}^0}{\sigma_{mi}} < \frac{\sigma_{\infty}^+}{\sigma_{mi}} < \frac{\sigma_{\infty i}^{*(s)}}{\sigma_{mi}}, \quad 1 \leq s \leq N^{(j)} - 1, \\ j = 1, 2, \dots, j^* - 1, \\ \sigma_{\infty i}^0 < \sigma_{\infty i}^{*(s)} < \dots < \sigma_{\infty i}^{*(2)} < \sigma_{\infty i}^{*(1)} = \sigma_{\infty i}^*, \quad (1) \\ \frac{\sigma_{\infty}^+}{\sigma_{mi}} \geq \frac{\sigma_{\infty i}^{*(s)}}{\sigma_{mi}}, \quad s = N^{(j)}, \\ j = 1, 2, \dots, j^*, \quad \sigma_{\infty i}^0 < \sigma_{\infty i}^{*(s)},$$

когда критическое число циклов нагружения N^* подсчитывается так:

$$N^* = 1 + \sum_1^{j^*-1} N^{(j)}, \quad N^{(j)} \geq 2, \quad (2) \\ j = 1, 2, \dots, j^* - 1, \quad N^{(j^*)} = 1.$$

Здесь σ_{∞}^+ – максимальное значение напряжений (их амплитуда) в единичном цикле нагружения, σ_{mi} – напряжения текучести, i – номер структурного уровня ($i = 1$ соответствует макроуровню), σ_{∞} – напряжения, заданные на бесконечности, $\sigma_{\infty i}^0$ – критическая нагрузка, полученная по необходимому критерию хрупкого разрушения, $\sigma_{\infty i}^{*(s)}$ – критическая нагрузка, полученная по достаточному критерию квазихрупкого разрушения на s -м цикле нагружения до $j = 1, 2, \dots, j^* - 1$ скачка при продвижении вершины трещины, $s = 0$ соответствует состоянию поставки материала после каждого скачка трещины, $j = 0$ соответствует

состоянию поставки материала образца с исходной трещиной длиной l_0, j^* – критическое число скачков, $N^{(j)}$ – число (группа) циклов между $(j - 1)$ и j скачками, N^* – критическое число циклов нагружения. Первая строка соотношений (1) описывает накопление повреждений в зоне предразрушения. Во второй строке соотношений (1) выписано условие, при котором происходит скачок трещины. После j^* скачков длина исходной трещины l_0 изменяется так, что система разрушается за один цикл $N^{(j^*)} = 1$. Исходный образец с трещиной длиной l_0 выдерживает N^* циклов нагружения (2).

Описано пластическое затупление трещины, причем это затупление тем больше, чем больше амплитуда приложенной нагрузки. Получено условие скачкообразного продвижения вершины трещины. Высказана гипотеза об останове трещины: трещина распространяется только по охрупченному материалу [6, 7]. Эта гипотеза не противоречит экспериментальным результатам [8, 9]. Даны оценки критической длины трещины и критического числа циклов при малоциклового усталости. В замкнутом виде получены критические параметры разрушения при малоциклового нагружении. Получены профили усталостных бороздок, формирующихся на мезоскопическом уровне. Эти профили зависят от линейного или нелинейного суммирования остаточных деформаций зон предразрушения, а амплитуда нагрузки и длина трещины существенно влияют на шаг усталостных бороздок. Проведено сравнение полученных и наблюдаемых [10, с. 164] профилей усталостных бороздок. Установлено соответствие между

профилями и минимальным шагом усталостных бороздок в предлагаемых теоретических построениях и натуральных экспериментах [10, с. 163–164].

Обсуждается разрушение на разных структурных уровнях, возможно формирование дополнительной морщинистой поверхности на микроуровне на поверхности разрушения, когда присутствуют усталостные бороздки на мезоскопическом уровне.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №10-08-00220) и в рамках проекта №22.16, входящего в программу Президиума РАН.

Список литературы

1. Корнев В.М. // Физическая мезомеханика. 2010. Т. 13, №1. С. 47–59.
2. Neuber G. Kerbspannunglehre: Grunglagen fur Genaue Spannungsrechnung. Springer-Verlag, 1937.
3. Новожилов В.В. // ПММ. 1969. Т. 33. Вып. 2. С. 212–222.
4. Леонов М.Я., Панасюк В.В. // Прикл. механика. 1959. Т. 5, №4. С. 391–401.
5. Dugdale D.S. // J. Mech. Phys. Solids. 1960. V. 8. P. 100–104.
6. Корнев В.М. // Деформация и разрушение материалов. 2008. №2. С. 2–11.
7. Kornev V.M. // Procedia Engineering. 2010. Vol. 2. No 1. P. 453–463.
8. Демешкин А.Г, Карпов Е.В., Корнев В.М. // Физическая мезомеханика. 2009. Т. 12, №3. С. 91–99.
9. Kornev V., Karpov E., Demeshkin A. // Procedia Engineering. 2010. Vol. 2. No 1. P. 465–474.
10. Шанявский А.А. Безопасное усталостное разрушение элементов авиаконструкций: Синергетика в инженерных приложениях. Уфа, 2003.

QUASI-BRITTLE FRACTURE DIAGRAMS FOR SOLIDS WITH STRUCTURAL HIERARCHY UNDER LOW-CYCLE FATIGUE

V.M. Kornev

Quasi-brittle fracture diagrams for solids under low-cycle fatigue have been obtained. The condition of a stepwise crack tip extension has been derived. Estimates of the critical crack length and critical number of cycles under low-cycle fatigue conditions are given. Critical fracture parameters have been obtained in a closed form.

Keywords:: brittle and quasi-brittle fracture, solids with structural hierarchy, low-cycle fatigue, Paris curves.