

01;05.1

О признаке усталостного разрушения сталей

© Л.Б. Зуев, В.В. Муравьев, Ю.С. Данилова

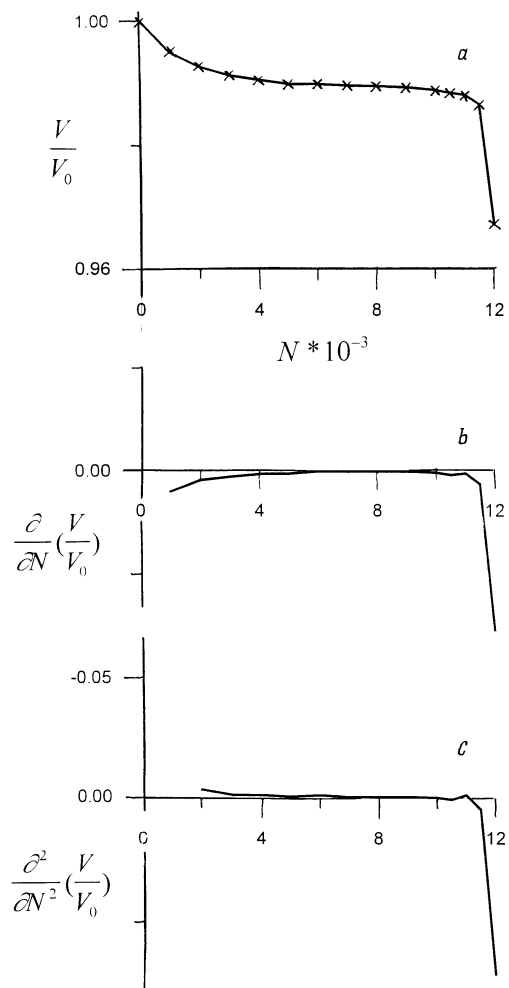
Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск
Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск

Поступило в Редакцию 27 ноября 1998 г.

Установлен информативный признак усталостного разрушения сталей, позволяющий надежно фиксировать переход к заключительной стадии процесса по форме зависимости скорости распространения ультразвуковых волн в них от числа циклов нагружения и производных от этой функции по числу циклов. Проанализирована природа явлений, связанных с изменением скорости ультразвука в ходе накопления усталостных повреждений.

Усталостное разрушение обычно происходит неожиданно, а предсказание долговечности [1, 2] с помощью усталостных кривых оперирует статистическими представлениями, т. е. позволяет оценивать срок службы конкретного изделия только вероятностным, но не детерминированным образом. Особенно сложна оценка остаточного ресурса изделия при усталости, так что наиболее сложной проблемой, связанной с усталостным разрушением, является предсказание его приближения для индивидуального объекта. Подобная задача обычно решается с применением разнообразных сложных методик раннего выявления усталостных микротрещин [3].

В настоящей работе на основе ранее проведенных [4–6] исследований скорости распространения ультразвука в усталостно нагруженных образцах предлагается пригодный для индивидуальных объектов формальный признак усталостного разрушения. В работах [4–6] установлено, что при циклическом нагружении скорость распространения ультразвуковых волн непрерывно падает с ростом числа циклов нагружения N , как это показано на рис. 1,а. При этом общее снижение скорости до момента разрушения составляет не более $(3 \dots 3.5) \cdot 10^{-2}$, что предъявляет достаточно высокие требования к методике и технике измерений этой величины [7]. Относительное изменение скорости $V^* = V/V_0$ (V_0 — скорость до начала усталостного испытания, V —



a — зависимость скорости звука в образцах из стали 45 от числа циклов нагружения $V^*(N)$. (Асимметричный цикл, амплитуда 200 МПа, частота нагружения 1 Hz). b — первая производная $\partial V^*/\partial N = \xi_1(N)$. c — вторая производная $\partial^2 V^*/\partial N^2 = \xi_2(N)$.

скорость после N циклов нагружения) является функцией N и для целого ряда сталей, например, имеет трехстадийный вид. При этом переход от одной стадии к другой определяется как типом материала, так и условиями нагружения.

Связь подобной зависимости с состоянием материала представляется в достаточной степени ясной. Микроскопические исследования [5] показали, что если на первых стадиях еще нет заметных изменений структуры, то на последней уже обнаруживаются микротрещины размером до 0.1 мм. Очевидно, что наступление третьей стадии зависимости $V^*(N)$ сигнализирует о приближении разрушения. Действительно, прямые эксперименты, проведенные на сталях 40, 40Х, 30ХГСА, рельсовой и других, показали, что достигший такого состояния образец выдерживает ~ 250 циклов нагружения, в то время как продолжительность двух первых стадий при той же амплитуде нагрузки может достигать 10^4 циклов.

Использование зависимостей типа приведенных на рисунке, *a* для предсказания усталостного разрушения возможно, но не дает необходимой точности, поскольку скорость распространения ультразвука уменьшается непрерывно в течение всего процесса нагружения, различаясь только темпом убывания на разных стадиях процесса, так что выявить момент перехода от второй стадии к третьей трудно. Можно показать, что более информативным является поведение первой и второй производных от V^* по N , т. е. $\xi_1 = \partial V^* / \partial N$ и $\xi_2 = \partial^2 V^* / \partial N^2$ соответственно в зависимости от числа циклов нагружения N , как это можно видеть на рисунке, *b, c*.

Форма зависимости $\xi_1(N)$ повторяет известную в теории надежности [8] U -образную кривую интенсивности отказов, но адаптирует ее к случаю индивидуального изделия [4]. При этом можно считать, что начальный спад значения скорости ультразвука соответствует процессам, ответственным за приработочные отказы, за спад скорости на втором этапе ответственны процессы, приводящие к случайным отказам, и наконец снижение скорости ультразвука на третьей стадии вызвано теми же причинами, что и износные отказы [4]. Эта последняя стадия наиболее опасна, поскольку к ее началу, как показывают микроскопические исследования [5], возникают зародышевые микротрещины, служащие очагами хрупкого долома.

Особенно информативным является поведение второй производной $\xi_2(N)$, которая, очевидно, при переходе к заключительной стадии про-

цесса меняет знак (см. рисунок, *c*). Этот хорошо заметный момент фиксирует начало наиболее опасной стадии усталостного разрушения, так что можно сформулировать следующий качественный признак перехода к критической стадии усталостного нагружения: ресурс изделия практически исчерпан при

$$\xi_2 = \partial^2 V^* / \partial N^2 = \partial^2 (V/V_0) / \partial N^2 > 0, \quad (1)$$

в то время как условие $\xi_2 \leq 0$ отвечает достаточно большому запасу работоспособности изделия или образца.

Интересно заметить, что если длительность процесса усталостного разрушения для разных образцов из одного материала может различаться почти в два раза, то переход к критической стадии происходит практически всегда при $V^* \approx 0.98$. Таким образом, условие $V^* \leq 0.98$ также может рассматриваться как признак приближения усталостного разрушения.

Практическое использование предложенного признака (1), основанного на измерении скорости распространения ультразвука, возможно при ремонте или техническом обслуживании и не требует предварительного измерения скорости ультразвука в ненагруженном изделии. Критическая стадия процесса может быть выявлена по знаку производной $\xi_2(N)$ при небольшом числе дополнительных циклов нагружения.

Список литературы

- [1] *Иванова В.С.* Усталостное разрушение металлов. М.: Металлургиздат, 1963.
- [2] *Кеннеди А.Дж.* Ползучесть и усталость в металлах. М.: Металлургия, 1965.
- [3] *Коллакот Р.* Диагностика повреждений. М.: Мир, 1989.
- [4] *Зуев Л.Б., Целлермаер В.Я., Громов В.Е.* и др. // ЖТФ. 1997. Т. 67. № 9. С. 123.
- [5] *Зуев Л.Б., Чиракадзе Д.З., Соснин О.В.* и др. // МНТ. 1997. Т. 19. № 8. С. 80.
- [6] *Зуев Л.Б., Соснин О.В., Чиракадзе Д.З.* и др. // ПМТФ. 1998. Т. 39. № 4. С. 180.
- [7] *Муравьев В.В., Зуев Л.Б., Комаров К.Л.* Скорость звука и структура сталей и сплавов. Новосибирск: Наука, 1996.
- [8] *Диллон Б., Сингх Ч.* Инженерные методы обеспечения надежности систем. М.: Мир, 1984.