

## ВОЛНОВЫЕ ПРИЗНАКИ И МИНИМАЛЬНАЯ СКОРОСТЬ РОСТА УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ

Применяемые в технической литературе термины "траектория трещины" и "скорость трещины" подразумевают под вершиной трещины некоторый материальный объект, обладающий в классическом смысле траекторией и скоростью.

За последние два десятилетия получены данные, показывающие, что усталостная трещина проявляет свойства, не присущие классическим объектам: дискретность критических длин, дискретность и ограниченность спектра скоростей роста, туннелирование [1-4].

Данные особенности поведения усталостной трещины в большей степени характерны объектам волновой природы, что позволяет оценить минимально возможную величину подрастания усталостной трещины за цикл нагружения  $\delta_{min}$ . Эти величины определяла различными способами [2-5], и во всех случаях оказалось, что  $\delta_{min} > a_0$ , где  $a_0$  - постоянная решетки.

В работе [5] с позиции дальнего действия межатомных сил установлено, что акт микроразрушения связан с изменением состояния большой группы атомов (порядка 20...40), характеристический размер образовавшейся свободной поверхности не может быть меньше нескольких постоянных решетки.

В работе [4] приведены оценки минимально возможного активационного объема межатомных перестроек, откуда получено для сплавов на основе железа:

$$\delta_{min} \geq 2a_0.$$

В работах [2; 3] экстраполяцией дискретный  $\Delta$  - зависимость шага усталостных бороздок для алюминиевых сплавов получено:

$$\delta_{min} = 23\text{Å} > 5a_0.$$

С позиции волновых представлений минимальная величина подрастания усталостной трещины может быть оценена как произведение характеристического времени на характеристическую скорость:

$$\delta_{min} = [\tau] \times [v]. \quad (1)$$

Очевидно, для разрушения кристаллических твердых тел такими величинами являются период тепловых колебаний узлов кристаллической решетки  $\tau_0$  и скорость продольных упругих волн  $c$  [5,6]. Гармоническое приближение позволяет получить:

$$\tau_0 = 1/\nu_3 = (2\pi\alpha_0/\sqrt{F})\sqrt{\rho/E}; \quad c = \sqrt{E/\rho}, \quad (2)$$

где  $\nu_3$  - "собственная" (эйнштейновская) частота тепловых колебаний узлов решетки;  $E$  - модуль упругости;  $r$  - количество атомов в элементарной ячейке объема;

Из уравнений (1), (2) находят

$$\delta_{min} = 2\pi\alpha_0/\sqrt{F}. \quad (3)$$

Данная величина находится в хорошем соответствии с ординатой нижней точки перелома кинетической диаграммы усталостного разрушения (КДУР), полученной из решения системы:

$$\begin{cases} dL/dN = c(\Delta K)^m; \\ K = K_{th}, \end{cases} \quad (4)$$

где  $c$  и  $m$  - постоянные;

$K_{th}$  - пороговая величина коэффициента интенсивности напряжений.

В качестве примера в таблице приведено сравнение  $\delta_{min}$  ординатами нижних точек перелома КДУР, полученных из уравнений (4) по экспериментальным данным С.Я.Яремы [6].

Сравнение значений  $\delta_{min}$  с ординатой нижней точки перелома КДУР

Материал	Ордината нижней точки перелома КДУР, Ю м		$\delta_{min} \cdot 10^{-10}$ (по формуле 3)
	Боздух	Вакуум	
Сталь 65Г, отпуск 453 <sup>0</sup> К	8,7	6,2	12,6
Сталь 65Г, отпуск 633 <sup>0</sup> К	12,8	8,0	12,6
Сталь 65Г, отпуск 853 <sup>0</sup> К	13,9	11,9	12,6
Д16А7В	10,1	4,3	12,7
Б95АТ1	13,0	5,6	12,7
Б95АТ2	20,9	14,7	12,7
Б95АТ3	9,1	5,2	12,7

На стадии доперисовского роста на КДУР имеются скорости на порядок меньше  $\delta_{min}$ . Однако в работе [3] показано, что для алюминиевых сплавов при

$$dL/dN < 23 \text{ \AA} = \delta_{min}$$

трещина продвигается за один цикл не по всему фронту, а на отдельных его участках, с локальной скоростью

$$(dL/dN)_{лок} \geq \delta_{min}$$

Перемещение же всего фронта в новое положение осуществляется на этой стадии за несколько циклов, что создает видимость спорадического роста усталостной трещины. Таким образом, доперисовский рост усталостной трещины контролируется механизмом локального микротуннелирования, что является типичным волновым признаком.

Физические условия реализации механизма микротуннелирования могут быть объяснены с позиции вероятностно-термофлуктуационных представлений. Так, если вероятность возникновения опасной флуктуации на локальном участке равна  $P_A$  и весь фронт трещины содержит  $n$  локальных участков характеристического размера  $\delta_{min}$ , то вероятность возникновения опасной флуктуации одновременно по всему фронту трещины:

$$P_{\Sigma} = (P_A)^n$$

Уже при  $n \geq 5$  (пластина толщиной  $\delta \geq (15 \dots 22) a_0 / \rho_A \gg P_{\Sigma}$ , что обеспечивает реализацию механизма микротуннелирования, как более вероятного. Дальнейший рост трещины приводит к росту напряженного состояния в вершине трещины, снижению энергии активации ее роста и увеличению  $P_{\Sigma}$ . В некоторый момент становится возможным перемещение всего фронта трещины за один цикл нагружения. Очевидно, этот момент и соответствует началу стадии Периса. Наличие корреляции между  $\delta_{min}$ , взятой из книги [5], и ординатой нижней точки перелома КДУР подтверждает это.

В пользу волновых представлений свидетельствует наличие усталостных бороздок на изломе. Кроме этого, в нормальном сечении профиль усталостной бороздки хорошо описывается, например, профилем Герстнера, что свидетельствует о близости траектории трещины к волновой.

Обобщение приведенных фактов позволяет утверждать, что усталостная трещина, по крайней мере на стадии зарождения, проявляет свойства, характерные волновым объектам.

### Список литературы

1. ИВАНОВА В.С., ТЕРЕНТЬЕВ В.Ф. Природа усталости металлов. - М.:Металлургия, 1975. - 456 с.
2. ШАНЬВСКИЙ А.А. Диаграмма дискретного РУТ в алюминиевых сплавах // Тез.пленарных докл. УШ Всособзн.конф. по усталости металлов. - М.: ИМЕТ, 1982. - С.72-76.
3. ШАНЬВСКИЙ А.А., КУНАВИН С.А. Механизм и диаграмма дискретного РУТ в алюминиевых сплавах // Изв. АН СССР. Металлы. - 1984. - № 2. - С.159-163.
4. ГУРЕВИЧ С.Е. Некоторые аспекты усталостной механики разрушения // Циклическая вязкость разрушения металлов и сплавов. - М.: Наука, 1981. - С.19-38.
5. БЛАДИМИРОВ Б.И. Физическая природа разрушения металлов. - М.: Металлургия, 1984. - 280 с.
6. ЯРЕМА С.Я., ПОЛУТРАНЦО И.Б. Рост усталостной трещины в вакууме и газовых средах // ФХММ. - 1983. - № 4. - С.37-46.