

Охрупчивание материалов при усталостном подрастании коротких макротрещин

В. М. Корнев

Институт гидродинамики им. М. А.

Лаврентьева СО РАН,

630090 Новосибирск, Россия

E-mail: kornev@hydro.nsc.ru

Детали авиадвигателей подвергаются повторным нагрузкам переменной амплитуды. Короткие трещины могут возникать как при изготовлении, так и при эксплуатации [1-3]. Рост коротких макротрещин составляет существенную часть времени жизни конструкции при усталости. Достоверные оценки распространения трещин дают возможность оценить реальное время жизни конструкции.

Рассматривается распространение трещины скачками в квазихрупких материалах при циклическом нагружении. Предлагается использовать для анализа указанного процесса модифицированные диаграммы разрушения деформируемых тел, полученные при однократном нагружении. За модель деформируемого тела выбрана модель упруго идеально пластического материала, имеющего предельное относительное удлинение.

Диаграммы разрушения при однократном нагружении состоят из двух критических кривых, построенных по необходимому и достаточному критериям разрушения. Эти кривые описывают как зарождение пластичности в зоне предразрушения, так и разделение образца на части. Критические кривые разделяют первый квадрант плоскости "длина трещины – амплитуда приложенной нагрузки" на три подобласти: в первой подобласти никакие изменения не происходят в материале образца, во второй подобласти зарождается пластическое течение в материале зоны предразрушения, в третьей подобласти образец разделяется на части.

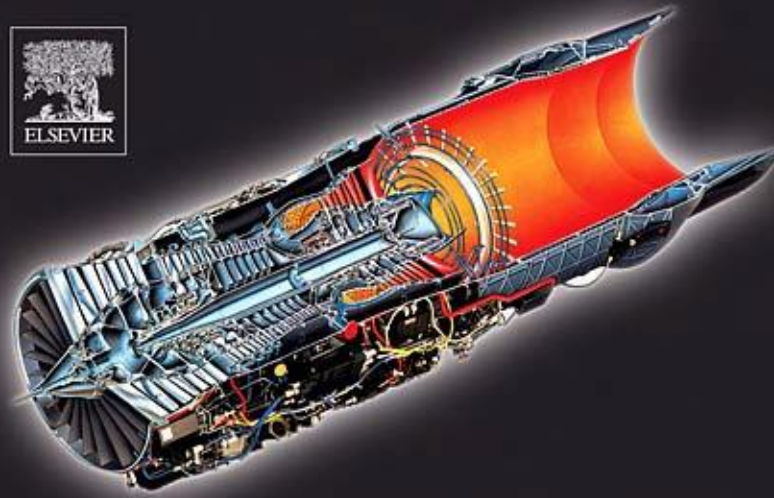
Данные, полученные в двух лабораторных экспериментах (классическая диаграмма напряжения - деформация и критический коэффициент интенсивности напряжений материала), позволяют построить эту диаграмму. Одна из кривых предлагаемой диаграммы напоминает диаграмму Китагавы - Такахаши.

Модификация полученных диаграмм при циклическом приложении нагрузки связана с учетом накопления повреждений при неупругом деформировании материала зоны предразрушения. Эти диаграммы имеют два порога усталости. Материал зоны предразрушения охрупчивается из-за суммирования повреждений, которые имеют место при нелинейном деформировании материала зоны предразрушения. Вторая подобласть циклической диаграммы разрушения видоизменяется по сравнению с диаграммой для однократного нагружения. При учете охрупчивания материала зоны предразрушения используется уравнение типа уравнения Коффина. Изучаются стационарное и нестационарное нагружения при пульсирующем приложении нагрузки. Получены аналитические выражения, связывающие скачкообразное продвижение вершины усталостной трещины с числом циклов.

После осреднения в явном виде получены оценки безразмерной средней скорости продвижения вершины трещины за один цикл нагружения. Проведен подробный анализ процессов продвижения вершин короткой макротрещины и макротрещины средней длины: скорости роста указанных трещин отличаются на порядки, так как видоизменяется зависимость скорости от параметров задачи. Полученные соотношения для средней скорости можно рассматривать как структурные формулы для построения кривых типа кривых Пэриса как для коротких макротрещин, так и для макротрещин средней длины.

Литература

- [1] *А.А. Шанявский*, Моделирование усталостных разрушений металлов. Синергетика в авиации. Уфа: Монография, 2007.
- [2] *T. Nicholas*, “High cycle fatigue: a mechanics of materials perspective”, Elsevier, Oxford, 2006.
- [3] *V.V. Bolotin*, “Mechanics of fatigue”, CRC Press, Boca Raton, London, 1998.



HIGH CYCLE FATIGUE

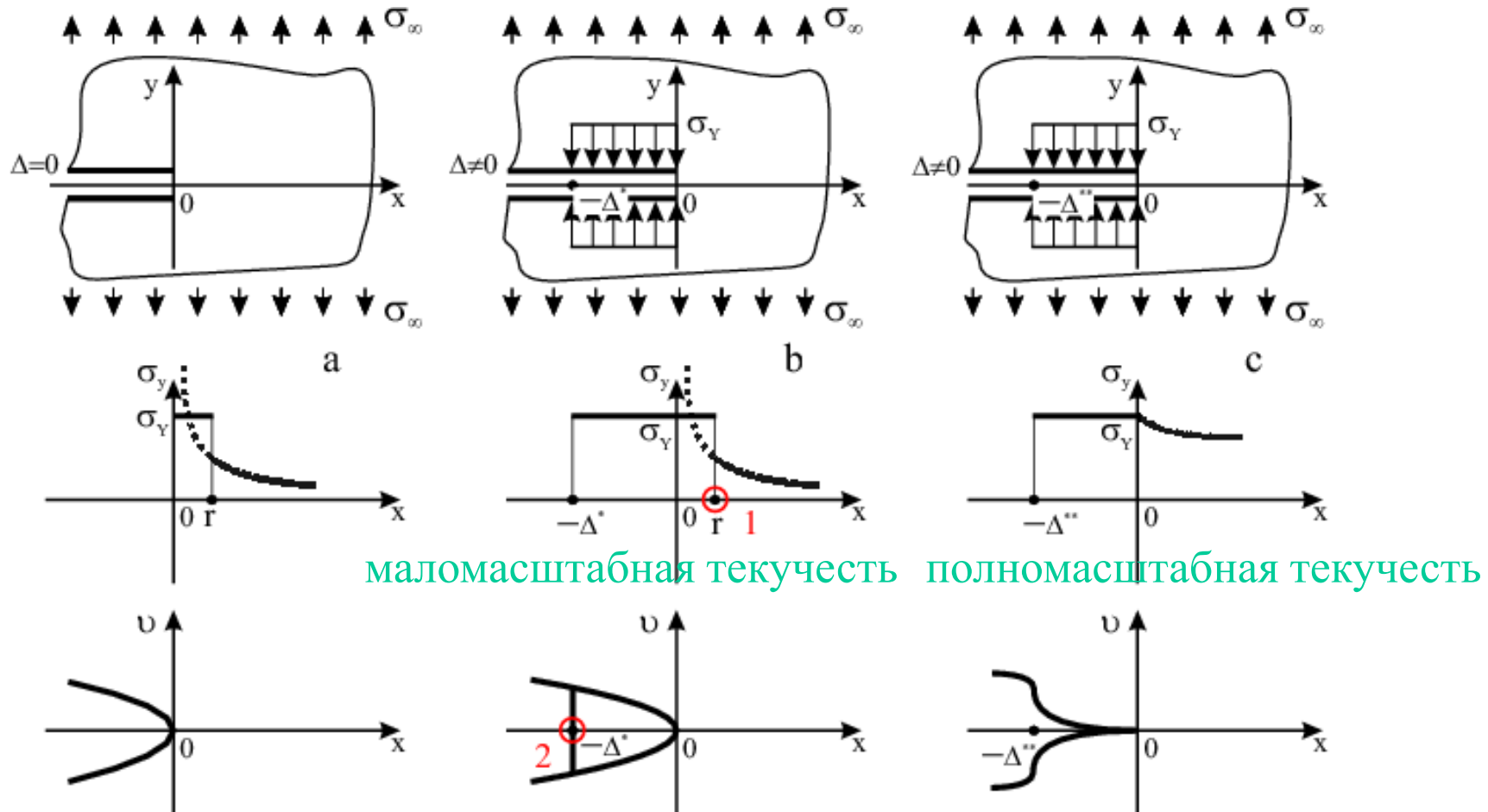
A MECHANICS OF MATERIALS PERSPECTIVE



THEODORE NICHOLAS

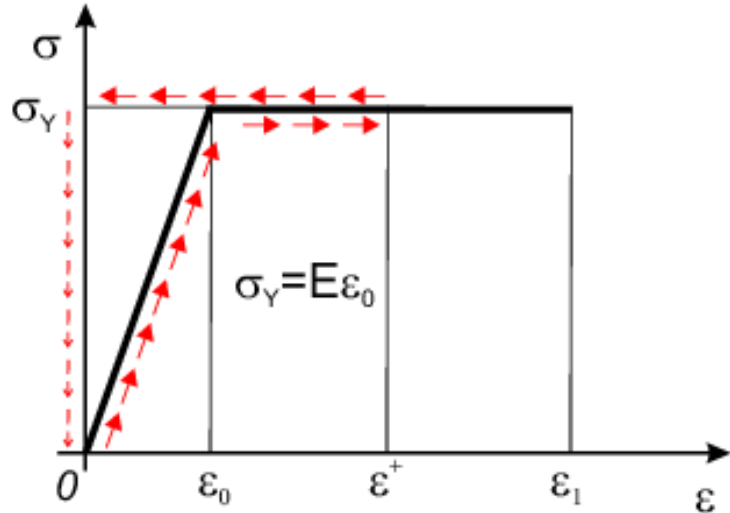
1. Введение

Используется подход Нейбера (1937) – Новожилова (1969).
Предлагается модификация модели Леонова-Панасюка (1959) –
Дагдейла (1960). Δ – длина зоны предразрушения, $2l = 2l_0 + 2\Delta$ –
длина модельной трещины.



Фиг. 1. Схемы нагружения; поля напряжений; раскрытие трещин (CTOD)

2. Диаграммы квазихрупкого разрушения



Фиг. 2. $\sigma - \varepsilon$ диаграмма
упруго пластического мат.

σ_Y - напряжения текучести,
 ε_1 - предельное удлинение

$$\frac{1}{r} \int_0^r \sigma_y(x, 0) dx \leq \sigma_Y \quad (1)$$

$$2\nu(x, 0) \leq \delta, \quad -\Delta \leq x < 0 \quad (2)$$

r - диаметр зерна, $2\nu = 2\nu(x, 0)$ - **CTOD**

$$\sigma_y(x, 0) \cong K_I / (2\pi x)^{1/2} + O(1), \quad (3)$$

$$K_I = K_{I\infty} + K_{I\Delta} > 0, \quad K_{I\infty} > 0, \quad K_{I\Delta} < 0$$

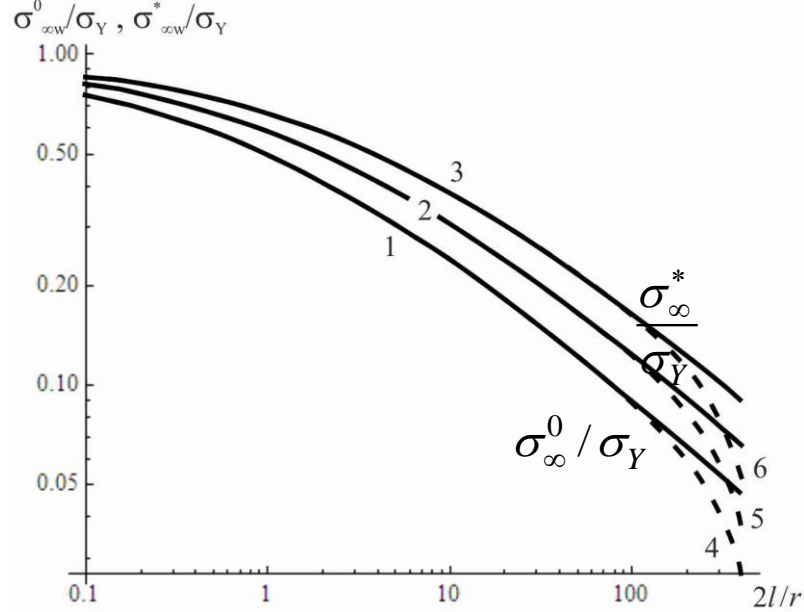
$$\sigma_y(x, 0) = \frac{K_{I\infty} + K_{I\Delta}}{\sqrt{2\pi x}} + \sigma_\infty = \frac{\sigma_\infty}{\sqrt{x}} \sqrt{\frac{l}{2}} + \frac{2\sigma_\infty \sqrt{\Delta}}{\pi \sqrt{x}} + \sigma_\infty \quad (4)$$

$$2\nu(-x) \cong \frac{\eta + 1}{G} K_I \sqrt{\frac{-x}{2\pi}} + O(-x), \quad K_I > 0 \quad (5)$$

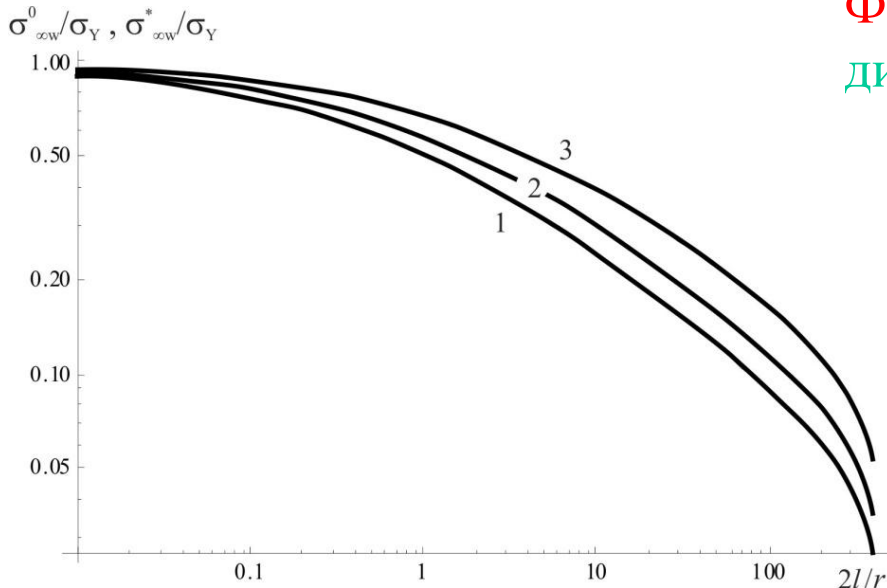
$$\sigma_\infty^* = \sigma_\infty^* [l^*, \sigma_Y, (\varepsilon_1 - \varepsilon_0) / \varepsilon_0], \quad \Delta^* = \Delta^* [l^*, \sigma_Y, (\varepsilon_1 - \varepsilon_0) / \varepsilon_0] \quad (6)$$

$$\sigma_\infty^0 = \sigma_\infty^0(l_0, \sigma_Y), \quad \Delta = 0; \quad \sigma_\infty^0 / \sigma_Y = \left(\sqrt{2l_0 / r} + 1 \right)^{-1} \quad (7)$$

$$\frac{\sigma_\infty^*}{\sigma_Y} = \left[\left(1 - \frac{5}{8\pi} \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_0}{\varepsilon_0} \right) \sqrt{\frac{2l^*}{r}} + 1 \right]^{-1}, \quad \Delta^* = \frac{5^2}{2^9} \left(\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_0}{\varepsilon_0} \right)^2 \left(\frac{\sigma_\infty^*}{\sigma_Y} \right)^2 l^*, \quad 2l^* = 2l_0 + 2\Delta^* \quad (8)$$



Фиг. 3. Диаграммы разрушения (пары кривых 1-2, 1-3, 4-5, 4-6)



пара кривых 1-3 представляет однородный материал;
пара кривых 1-2 представляет биматериал

Фиг. 4. Диаграммы разрушения биматериала ($w/r = 500$)

№ 1, 2, 3 ширина образца $w/r = \infty$

№ 4, 5, 6 ширина образца $w/r = 500$

№ 1, 4: $(\varepsilon_1 - \varepsilon_0) / \varepsilon_0 \equiv 0$ хрупкое разрушение

№ 2, 5: $(\varepsilon_1 - \varepsilon_0) / \varepsilon_0 = 1.5$ квазихрупкое разр.

№ 3, 6: $(\varepsilon_1 - \varepsilon_0) / \varepsilon_0 = 2.5$ квазихрупкое разр.

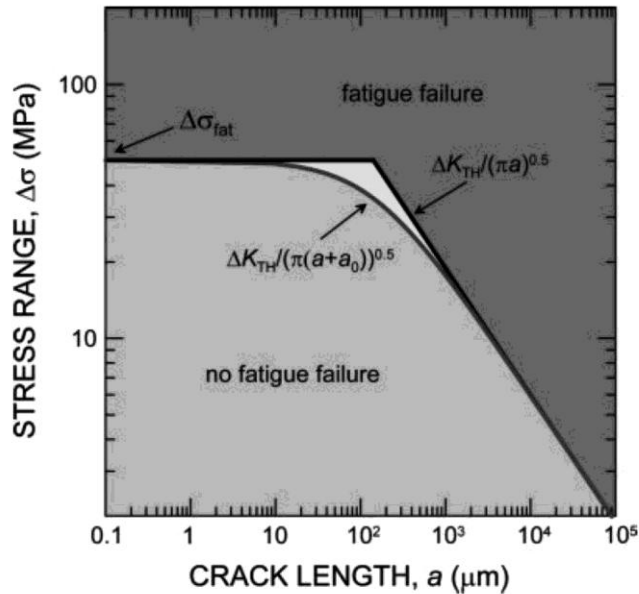
Критический КИН $\neq const$

$$K_I^* = \sigma_{\infty}^* \sqrt{\pi l^*} \neq const, K_I^* \approx const \text{ at } l_0 \rightarrow \infty$$

$$r = \frac{2}{\pi} \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_Y} \right)^2 \left(1 - \frac{5}{8\pi} \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_0}{\varepsilon_0} \right)^2 \quad (9)$$

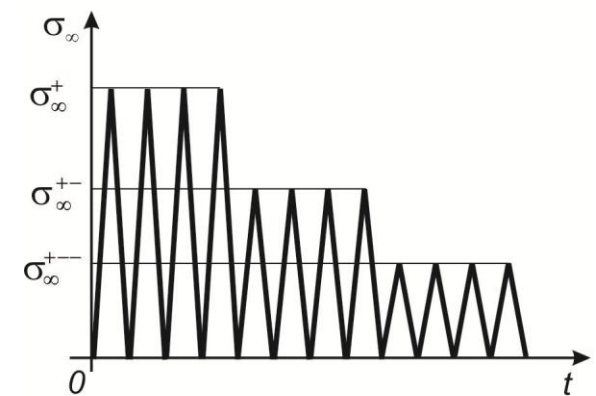
Фундаментальные параметры: $\sigma - \varepsilon$ диаграмма, критический КИН K_{IC} .

3. Диаграммы квазихрупкого разрушения при усталости

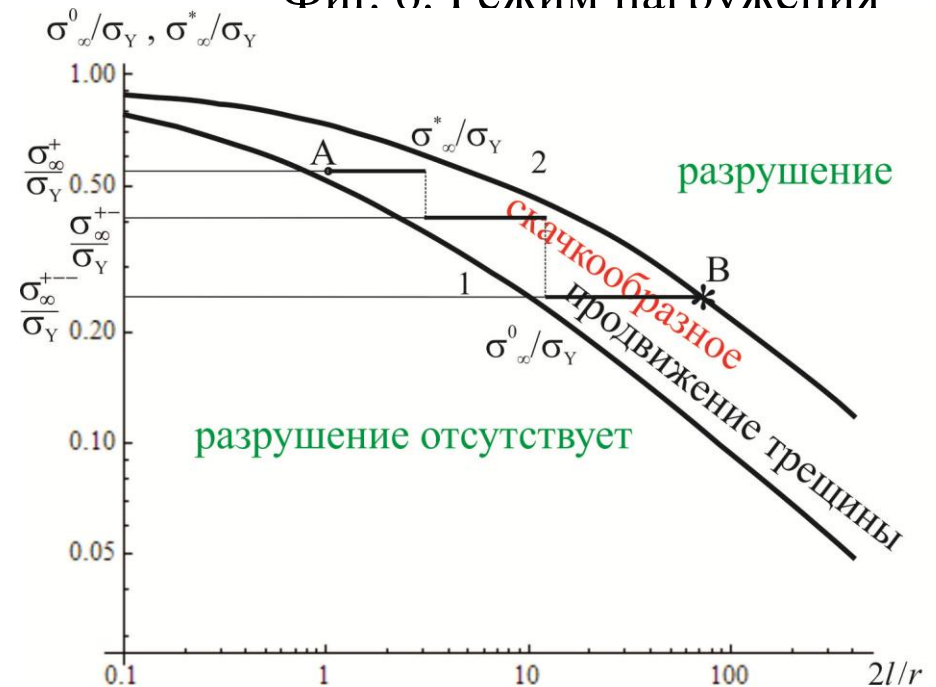


Фиг. 5. Диаграмма Kitagawa-Takahashi (1976) состоит из одной кривой и имеет одно предельное значение

Модель Stouffer, Williams (1979) имеет гипотетические элементы усталости



Фиг. 6. Режим нагружения



Фиг. 7. Пара кривых разделяет плоскость на три подобласти, кривая $\sigma_{\infty}^*/\sigma_Y$ трансформируется. Диаграмма имеет два предельных значения

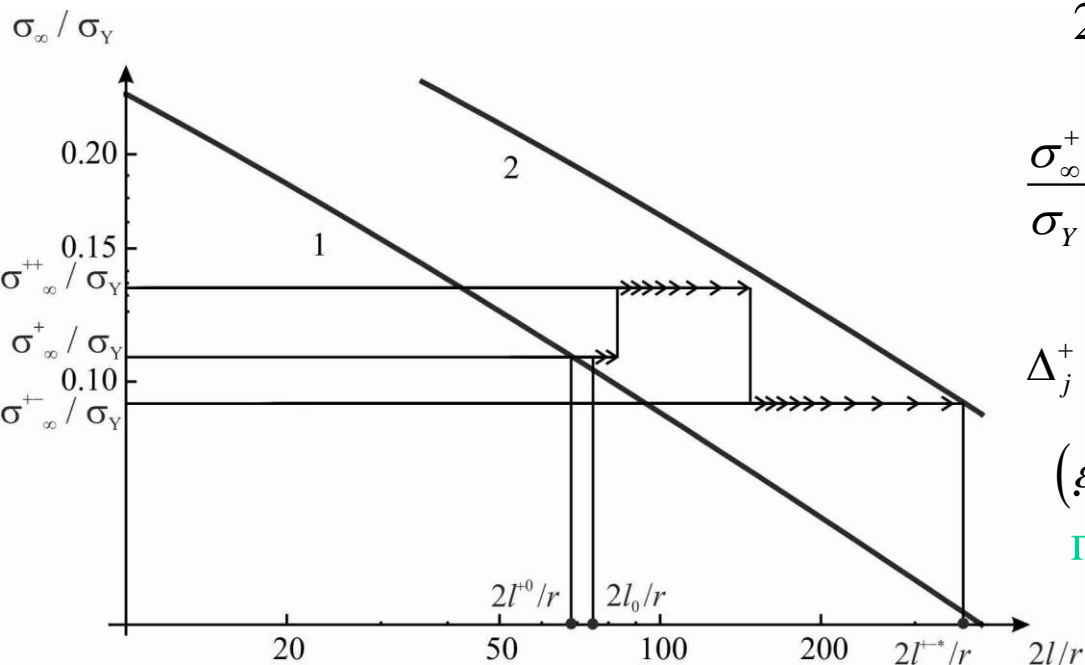
$$\sigma_{\infty}^0 / \sigma_Y < \sigma_{\infty}^+ / \sigma_Y < \sigma_{\infty}^* / \sigma_Y; \sigma_{\infty}^+ - \text{амплитуда} \quad (10)$$

$$\frac{\sigma_{\infty}^0}{\sigma_Y} < \frac{\sigma_{\infty}^+}{\sigma_Y} < \frac{\sigma_{\infty}^{*(s)}}{\sigma_Y}, 1 \leq s_j \leq N_j - 1, j = 1, 2, \dots, j^* - 1, \sigma_{\infty}^0 < \sigma_{\infty}^{*(s)} < \dots < \sigma_{\infty}^{*(2)} < \sigma_{\infty}^{*(1)} = \sigma_{\infty}^*; \quad (11)$$

$$\sigma_{\infty}^+ / \sigma_Y \geq \sigma_{\infty}^{*(s)} / \sigma_Y, s_j = N_j, j = 1, 2, \dots, j^*, \sigma_{\infty}^0 < \sigma_{\infty}^{*(s)}$$

$$N^* = 1 + \sum_1^{j^*-1} N_j, N_j \geq 2, j = 1, 2, \dots, j^* - 1, N_{j^*} = 1, \quad N^* - \text{критич. циклов} \quad (12)$$

$$2l_j = 2l_{j-1} + 2\Delta_j, j = 1, 2, \dots, j^* \quad (13)$$

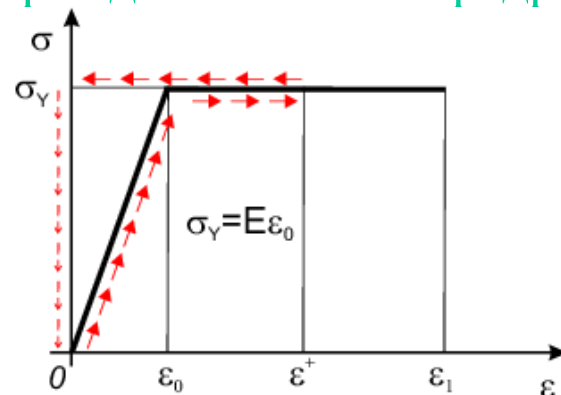


$$\frac{\sigma_{\infty}^+}{\sigma_Y} = \left[\left(1 - \frac{5}{8\pi} \frac{\varepsilon_{j-1}^+ - \varepsilon_0}{\varepsilon_0} \right) \sqrt{\frac{2l_{j-1}}{r} + 1} \right]^{-1}, \quad (14)$$

$$\Delta_j^+ = \frac{5^2}{2^9} \left(\frac{\varepsilon_{j-1}^+ - \varepsilon_0}{\varepsilon_0} \right)^2 \left(\frac{\sigma_{\infty}^+}{\sigma_Y} \right)^2 l_{j-1}, j = 1, 2, \dots, j^*$$

$(\varepsilon_{j-1}^+ - \varepsilon_0) / \varepsilon_0$ - накопление

повреждений в зоне предразрушения



Фиг. 8. Скачкообразное подрастание трещин при усталости (переменное нагружение)

Fig. 2.

Δ_j^+ - скачок вершины трещины (длина зоны предразрушения)

N_j - число циклов, $0,2 \leq C \leq 1$ - константы Коффина (1954)

$$(N_j)^C = (\varepsilon_1 - \varepsilon_0) / (\varepsilon_{j-1}^+ - \varepsilon_0), j = 1, 2, \dots, j^* - 1 \quad (15)$$

Длина продвижения вершины трещины Δ_j^+

$$V = \frac{\Delta_j^+ / r}{N_j} = \frac{5^2}{2^9} \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_1 - \varepsilon_0} \right)^{1/C} \left(\frac{\varepsilon_{j-1}^+ - \varepsilon_0}{\varepsilon_0} \right)^{2+1/C} \left(\frac{\sigma_\infty^+}{\sigma_Y} \right)^2 \frac{l_{j-1}}{r}, j = 1, 2, \dots, j^* - 1 \quad (16)$$

V - Средняя скорость. Кривые Пэриса (1961)?

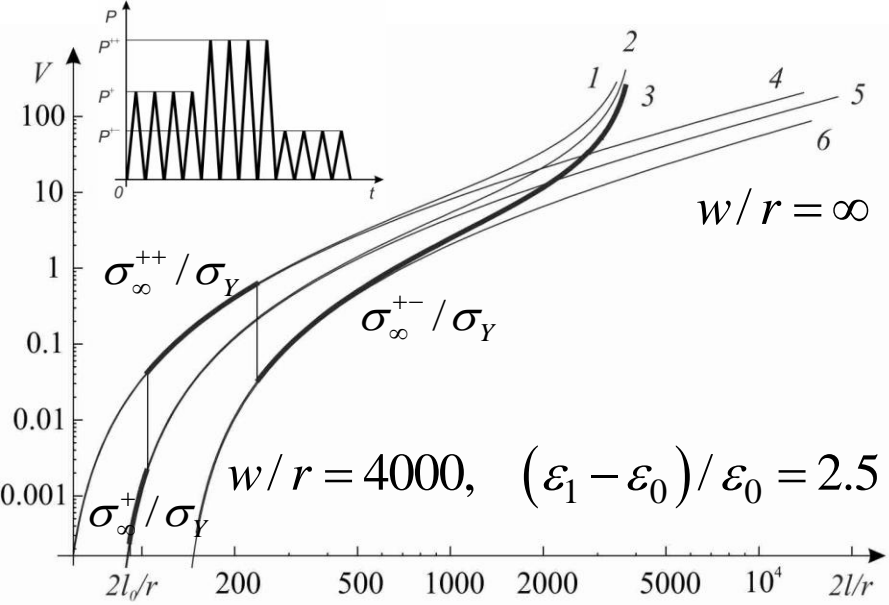
$$V = \frac{\Delta_{j,w}^+ / r}{N_j} = \frac{5^2}{2^9} \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_1 - \varepsilon_0} \right)^{1/C} \left[Y^+ \left(\frac{l_{j-1}}{w} \right) \frac{\sigma_{\infty w}^+}{\sigma_Y} \right]^2 \frac{l_{j-1}}{r} \times \quad (17)$$

$$\times \left\{ \frac{8\pi}{5} \left[1 - \left(\frac{\sigma_Y}{\sigma_{\infty w}^+} - \frac{1}{1 - 2l_{j-1}/w} \right) \sqrt{\frac{r}{2l_{j-1}}} \frac{1}{Y^+(l_{j-1}/w)} \right] \right\}^{2+1/C}, j = 1, 2, \dots, j^* - 1$$

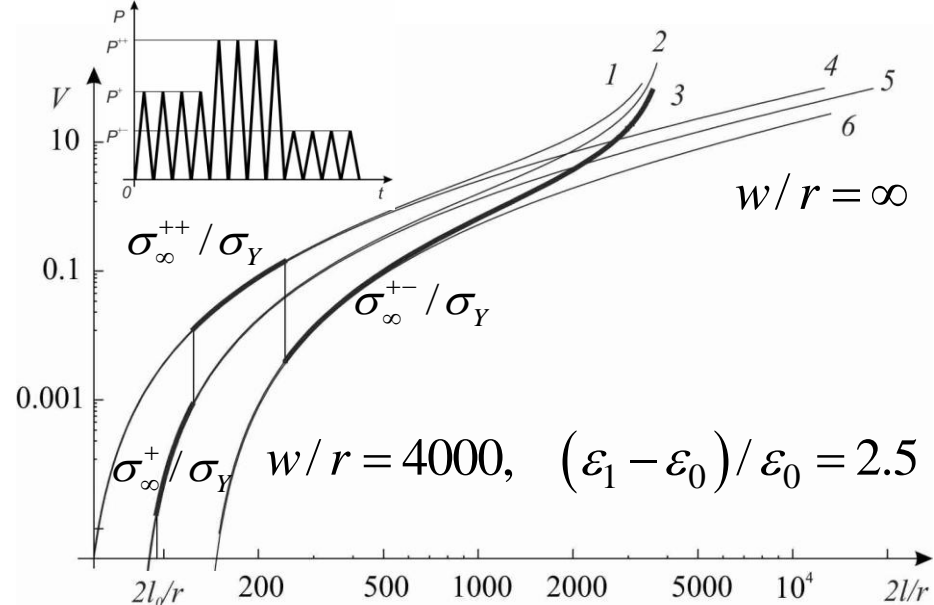
I. начало $2l_j \approx 2l^{+0}$ ($2l_j > 2l^{+0}$)

Стадии II. основная $2l_j \approx l^{+0} + l^{+*}$, Кривые Пэриса (1961)

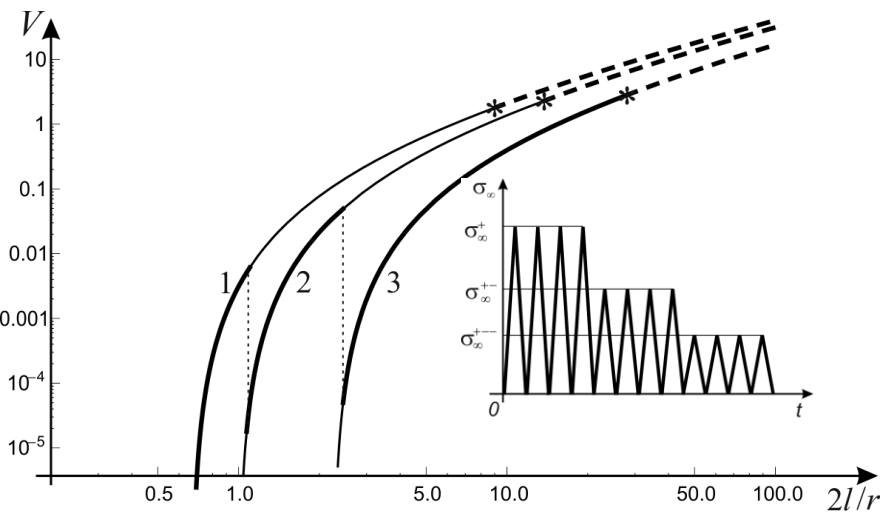
III. окончание $2l_j \approx 2l_{j^*} = 2l^{+*}$



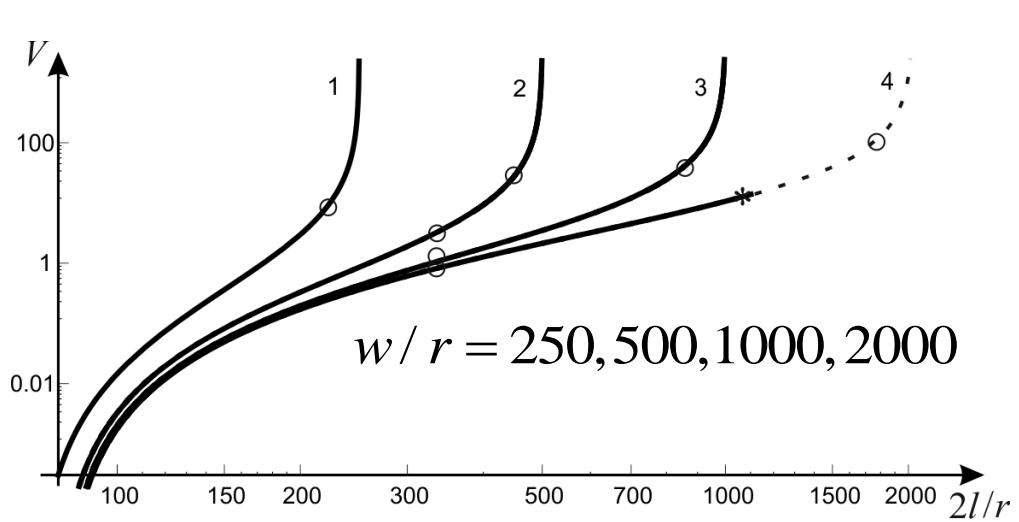
Фиг. 9. Скорость продвижения вершины трещины (линейное суммирование)



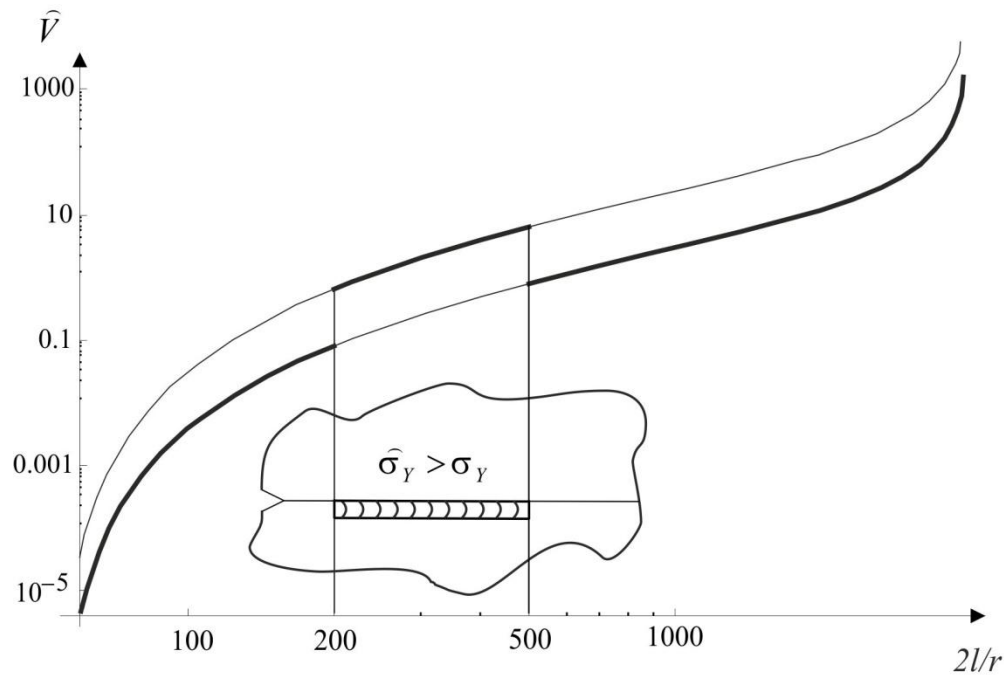
Фиг. 10. Скорость продвижения вершины трещины (нелинейное суммирование)



Фиг. 11.

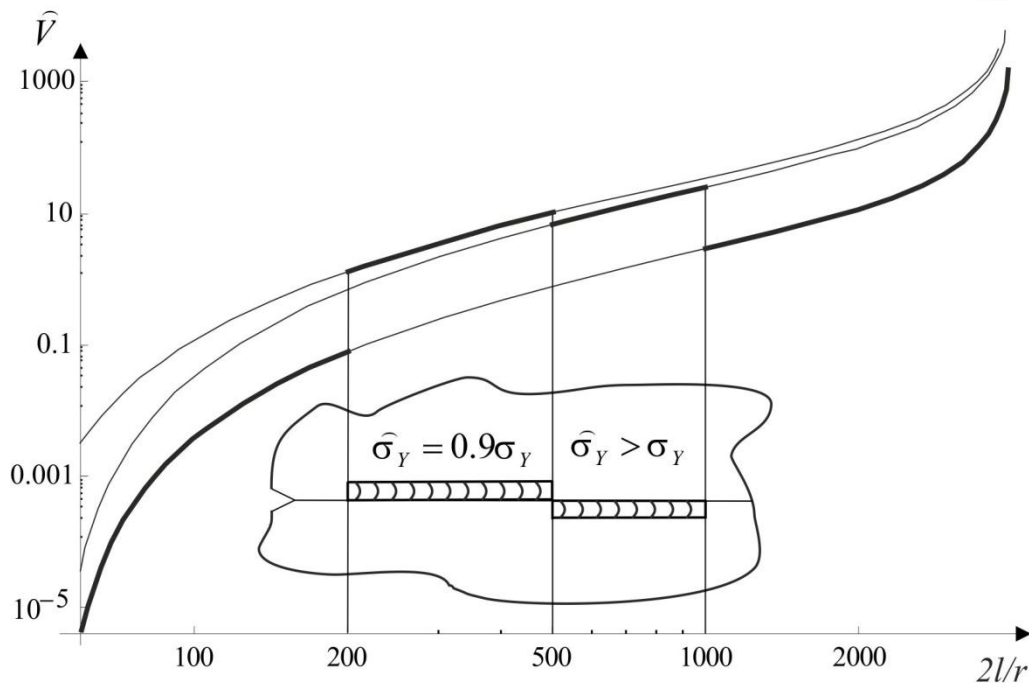


Фиг. 12.



Длина скачка $\Delta_j^+ / 2$
 для биматериала.

Фиг. 12. $\hat{\sigma}_Y < \sigma_Y$ $w/r = 4000$



Фундаментальные параметры: $\sigma - \varepsilon$
 диаграмма, критический КИН K_{IC}
 и постоянные Коффина C .

Фиг. 13. $\hat{\sigma}_Y = 0.9\sigma_Y$ $\hat{\sigma}_Y > \sigma_Y$

$w/r = 4000$

4. Заключение

Предложенная модель позволяет оценить **накопление повреждений при усталости**, учитывая охрупчивание материала, и описать все стадии развития процесса продвижения вершин трещин. **Основные параметры:** $\sigma - \varepsilon$ диаграмма, постоянные Коффина и критический КИН материала.

Спасибо