

О РАЗВИТИИ ВЯЗКОГО РАЗРУШЕНИЯ КАК САМООРГАНИЗАЦИИ С ВЫРОЖДЕНИЕМ РАЗМЕРНОСТИ

М.А.Штремель, А.М.Авдеенко, Е.И.Кузько

Московский институт стали и сплавов,
101000, Москва, Россия
(Поступило в Редакцию 23 мая 1995 г.)

Условие макроразрушения определяется микроструктурой. Однако его связь с размещением и «свойствами» элементов (ямки вязкого излома, фасетки скола или разрушения по границам зерна) известна лишь на уровне корреляций. Всегда наблюдаем, но не описан переход от разрушения элемента микроструктуры через многие трещины мезомасштаба к одной макротрещине, подавляющей рост остальных. Например, вязкое разрушение начинается с образования пор на включениях — независимо друг от друга и в достаточно большом макроразмере — и продолжается как слияние пор с образованием нескольких очаговых трещин. У каждой трещины есть зона разгрузки, где рождение пор прекратилось и периметр, где оно продолжается [1]. При суперпозиции полей трещин наибольшая из них «закрывает своей тенью» остальные, останавливая их рост. Объемный процесс вырождается: далее поры возникают и сливаются лишь в плоскости — у фронта единственной макротрещины. Причина этого вырождения размерности — дальное действие: подавление роста в зоне разгрузки. Ориентировку двумерной трещине задает извне приложенное напряжение. Аналогично распространяется трещина зернограницного разрушения или скола в поликристалле: стационарным процессом управляет критерий присоединения новых фасеток к фронту макротрещины [2], но до того происходит формирование такой трещины с подавлением ветвления — вырождение размерности.

Такая же нестационарная стадия есть и при старте любой «заранее наведенной» (в иных условиях) трещины. В силу вырождения размерности от дальнего действия и наличия ориентирующего напряжения попытки описать разрушение в микроструктуре как перколяцию [3] (по узлам, связям или плакетам) не дали критерий макроразрушения в зависимости от критериев рождения и слияния элементов. В задаче разрушения перколяция — динамическая (условие слияния двух данных пор зависит от уже произошедших слияний), ориентированная (критерий слияния зависит от расположения пары пор по отношению как к оси нагружения извне, так и к ориентировке уже слившихся пор относительно этой оси) и, наконец, в процессе есть дальнее действие (через поля напряжений и деформаций).

Способы анализа ориентированной динамической перколяции с дальним действием, приводящей к вырождению размерности во внешнем поле нам неизвестны. Наблюдать же такой процесс можно, измеряя рельеф вязкого излома. При стационарном развитии единственной макротрещины путем вскрытия и присоединения пор к ее фронту период

и амплитуда рельефа будут порядка расстояния L_0 (в объеме) между «действующими» порами, независимо от пройденного пути, тогда как на стадии зарождения случайное слияние ближайших пор дает поверхность с существенно большей амплитудой рельефа. При испытании цилиндрического образца на растяжение размер зоны старта виден и непосредственно, если сопоставить макрорельеф дна «чашки» излома с его ответной половиной: разность их высот $h(r)$ указывает величину пластического удлинения периферии образца в шейке после разделения материала в этой точке. Стационарное распространение трещины с неизменной деформацией перед фронтом даст линейное изменение $h(r)$.

В работе исследовались статистические характеристики поверхности разрушения, полученной при одноосном растяжении (при 293 К) цилиндрических образцов (диаметр 5 мм, расчетная длина 70 мм) среднеуглеродистой стали 38ХНЗМФА (закалка с 870 °С в масло, отпуск 570 °С, 1 h). Напряжение разрушения составляло 1.26 ГПа, полное удлинение до разрушения 9.5%, сужение 32%, равномерное сужение 8.0%.

Излом имел форму чашки с дном диаметром 2 мм и конусом среза по периметру. Рельеф дна чашки измерялся лазерным профилографом [4]. Пучок света диаметром 5 мкм от гелий-неонового лазера, отраженный от поверхности трещины, собирался объективом профилографа. Электронно-оптический блок определял по расфокусировке отклонение освещаемой точки поверхности от «нулевого» уровня по высоте, компенсировал ее и вводил в ПЭВМ высоту полной компенсации. Погрешность определения рельефа $\pm 5 \mu\text{m}$ по каждой из трех координат. Сканирование вдоль двадцати диаметров на длине $L = 2100 \mu\text{m}$ с шагом $l_0 = 7 \mu\text{m}$ на каждой из половинок излома дало $N = 12\,000$ точек отсчета. Наибольший размах рельефа по высоте достигал 1093 мкм.

Усредненные по двадцати линиям высоты профилей рельефа $h(r)$ для прямой ($i = 1$) и ответной ($i = 2$) половин изломов приведены на рис. 1. Здесь и далее текущая координата r отсчитывается от оси образца и изменяется в пределах $[-L/2; L/2]$. Вычисленное как разность двух профилей среднее раскрытие $\Delta h(r) = h_1(r) - h_2(r)$ представлено на рис. 2. Зависимость среднего раскрытия от расстояния до оси образца позволяет судить о динамике развития трещины.

Раскрытие трещины $\Delta h(r)$ оказалось наибольшим на оси образца (206 мкм) и в прилегающей области (в радиусе до 0.1 мм), являющейся, по-видимому, зоной зарождения. До $r_0 \leq 0.4 \text{ mm}$ простирается зона I «стационарного отрыва» в «донной» трещине: $\Delta h(r)$ падает линейно. Так же меняется раскрытие $\Delta h(r)$ в зоне III ($r_0 > 0.8 \text{ mm}$) «стационарного среза». Не ясно увеличение раскрытия в зоне II ($0.4 \text{ mm} < r_0 < 0.8 \text{ mm}$) — при переходе от донной трещины I к откосу III.

С целью исследования закономерностей формирования рельефа в процессе развития трещины производился спектральный анализ поверхности разрушения. Так как разделение на зоны носит приближенный характер, анализ поверхности производился для регулярного разбиения — весь интервал изменения r разделялся на $2m = 20$ участков длиной $L_0 = 105 \mu\text{m}$ и в интервалах $[-L_j; L_j]$, $L_j = jL_1$, $j = 2 \dots m$



Рис. 1. Прямая и ответная половины изломов после усреднения по направлениям.

1 — сторона 1, 2 — сторона 2.

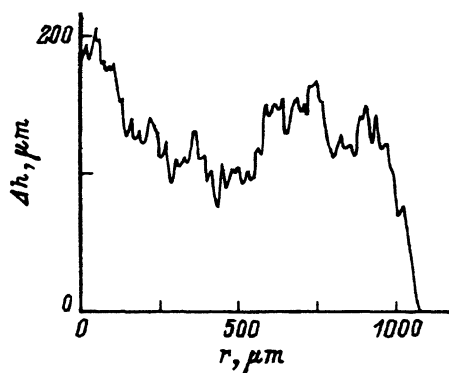


Рис. 2. Эффективное раскрытие щели Δh .

(рис. 2) вычислялись Фурье-образы высоты:

$$c_j^2(k) = \frac{1}{L_j} \left(\int_{-L_j}^{L_j} h(r) \sin(kr) dr \right)^2 + \frac{1}{L_j} \left(\int_{-L_j}^{L_j} h(r) \cos(kr) dr \right)^2, \quad j = 2 \dots m,$$

где волновым векторам $k = \pi n / L_j$ ($1 \leq n \leq L_j / l_0$) соответствовали длины волн от $2l_0 = 14 \mu\text{m}$ до диаметра области наблюдения $2L_j$.

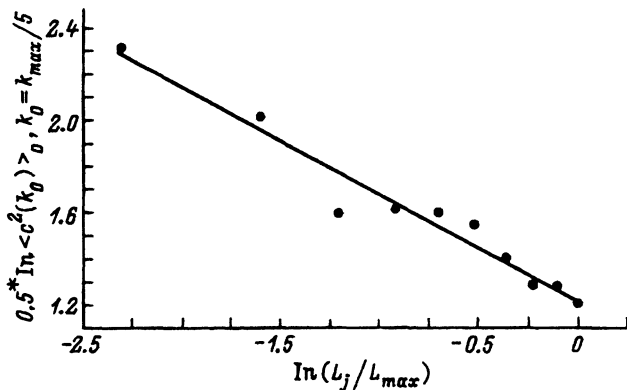


Рис. 3. Изменение амплитуды частотной моды с ростом интервала.

$\alpha = -0.4613 \pm 0.0359$.

Фурье-образы высоты вычислялись вдоль каждого из $8m = 80$ радиусов в отдельности, после чего по этим значениям определялось их среднеквадратичное $\langle c_j^2(k) \rangle$. Затем гармоники $c_j'^2(k)$ в том же интервале рассчитывались для усредненного по всем радиусам профиля $h(r) = (h_1(r) + h_2(r))/2$. Разность $\langle c_j^2(k) \rangle_0 = \langle c_j^2(k) \rangle - c_j'^2(k)$, описывает собственно микрорельеф излома.

Функции $\langle c_j^2(k) \rangle_0$ аппроксимировались (каждая в собственном диапазоне $\pi n/L_j \leq k \leq \pi n/l_0$) соотношением $\langle c_j^2(k) \rangle_0 \sim k^{-2D}$, где D — фрактальная размерность одномерного рельефа вдоль пути его распространения. Изменение амплитуды $\langle c_j^2(k_0) \rangle_0$ при $k_0 = k_{\max}/5$ с ростом интервала L_j приведено на рис. 3.

Квадрат амплитуды частотной моды $\langle c_j^2(k_0) \rangle_0$ эволюционирует по скейлинговому закону $\langle c_j^2(k_0) \rangle_0 \sim (2L_j/L)^{-2\kappa}$. Критический индекс $\kappa = -0.461 \pm 0.036$ и в пределах ошибки аппроксимации нечувствителен к абсолютной величине моды k_0 в пределах от $k_0 = k_{\max}/5$ до $k_0 = k_{\max}$. Очевидно, что при $L_0 \rightarrow \infty$ $\langle c_j^2(k_0) \rangle_0 \rightarrow 0$, т. е. трещина эволюционирует к компактному двумерному кластеру, сглаживаясь вдоль «классической» траектории [5].

Таким образом, сопоставление макрорельефа и изменений микрорельефа выявляет два этапа самоорганизации разрушения: почти изотропного зарождения и ориентированного распространения магистральной трещины. Вырождение трещины к компактному двумерному кластеру осуществляется по скейлинговым законам.

Список литературы

- [1] Броек Д. Основы механики разрушения. М. (1980). 368 с.
- [2] Штремель М.А. ФММ 62, 4, 807 (1982).
- [3] Приезжев А.Б., Терлецкий С.А. ФТТ 31, 4, 125 (1989).
- [4] Кузько Е.И., Кудря А.В., Стариков С.В. Завод. лаб. 58, 9, 63 (1992).
- [5] Авдеенко А.М. Инженерно-физические проблемы новой техники. М. (1994). С. 132.