

4. Wang L.L., Porter R.S., Stidham H.D., Hsu S.I. Raman spectroscopic characteristic of the morphology of polyethylene reactor powder. // *Macromolecules*. 1991. V. 24, № 18. P. 5535-5538.
5. Марихин В.А. Структурные основы высокой прочности и жесткости частично-кристаллических полимеров: Дис. ... докт. физ.-мат. наук. Л., ФТИ им. А.Ф. Иоффе АН СССР, 1991, 445 с.
6. Марихин В.А., Мясникова Л.П. Надмолекулярная структура полимеров. Л.: Химия, 1977. 240 с.
7. Васильева В.В. Структурные превращения и характеристики механических свойств при ориентационном вытягивании полиэтиленовых нитей: Дис. ... к. т. н. СПб, СПГУТД, 2004, 183 с.

УДК 620.178.3

ДЕФОРМАЦИОННАЯ СТРУКТУРА ВБЛИЗИ ВЕРШИНЫ УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ СМЕШАННОГО ТИПА (I+II)

Кибиткина В. В., Плешанов В. С., Лебедева Н. А., Панин В. Е.

*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия,
vvk@ispms.tsc.ru*

Предложен алгоритм анализа деформационной структуры вблизи вершины усталостной трещины. Приведены типичные поля векторов необратимых смещений, измеренные вблизи вершины усталостной трещины. На основе сравнения этих полей смещений с векторными полями, полученными из уравнений линейной упругой механики разрушения, показан способ идентификации моды трещины и различие их деформационных структур. Показано, что деформационная структура вблизи вершины реальной усталостной трещины может быть представлена в виде совокупности мод I и II, каждая из которых может быть полной и/или неполной.

Большинство изделий работает при циклических напряжениях ниже предела текучести. Однако, в результате накопления повреждений в материале, происходит формирование и развитие несплошностей, которые, в конечном итоге, приводят к разрушению. Скорость роста трещин зависит от свойств материала, в частности от порогового значения коэффициента интенсивности напряжений (КИН) и его критического значения, а также от геометрии изделия (образца) и условий нагружения. Развитие усталости всегда сопровождается необратимой деформацией на разных масштабных уровнях. Пластическая деформация перед вершиной усталостной трещины играет особую роль.

Сравнительно недавно в России (г.Томск) был разработан опико-телевизионный метод, позволяющий измерять (вычислять) смещения участков поверхности материала на основе обработки оптических изображений, последовательно зафиксированных в процессе его нагружения [1,2]. Результатом измерения является поле векторов необратимых смещений элементарных участков исследуемой поверхности $\vec{u}(x,y)$. Термин "поле смещений" по своему смыслу приближается к понятию "смещения точек поверхности" [1], когда размер элементарного участка стремится к нулю. На основе математи-

ческой обработки измеренного векторного поля можно получить распределение компонент тензора пластической деформации и главного пластического сдвига.

Оптико-телевизионный метод имеет высокую разрешающую способность (плотность векторов смещений $1,5 \times 10^3 - 3 \times 10^5 \text{ мм}^{-2}$), позволяет измерять широкий диапазон амплитуд смещений (0,2–15 мкм) при приемлемой погрешности. Чувствительность метода зависит от используемого оптического увеличения микроскопа. Метод и структурная схема его технической реализации близки методу Digital Image Correlation, развиваемому за рубежом [4].

В течение нескольких лет проводились экспериментальные исследования процесса накопления усталостных повреждений в металлических сплавах с различными видами концентраторов напряжений (отверстие, сварной шов, соединение внахлест) при циклическом растяжении. Пластическая деформация, сопутствующая развитию усталостной трещины, измерялась с помощью оптико-телевизионного измерительного комплекса TOMSC.

Было обнаружено, что на мезомасштабном уровне многоцикловая усталость металла представляет собой пятистадийный процесс. Он включает в себя стадию деформационного упрочнения и формирования усталостных трещин (I), квазихрупкий рост доминирующей трещины (II), ее хрупко-пластическое развитие (III), образование магистральной трещины (IV), зоны пластической вытяжки и разрушение (V). Особое внимание уделялось измерению пластической деформации перед вершиной трещины, которая связана с текущими значениями КИН и определяет скорость ее развития.

Длительность стадий и скорости необратимых смещений изменяются в широком диапазоне. Вид векторного поля перед вершиной трещины подобен векторным полям, предсказываемым линейной упругой механикой разрушения, что позволяет идентифицировать моду трещины (I, II, I+II). Однако, деформационная структура вблизи вершины трещины, как оказалось, существенно отличается от структуры, предсказываемой данной теорией.

Типичный вид поля векторов смещений перед вершиной трещины нормального отрыва (мода I) и распределение удельных (нормированных на один цикл приращения нагрузки ΔN) значений главного пластического сдвига $\gamma_{pl}(x, y)$ показаны на рис. 1.

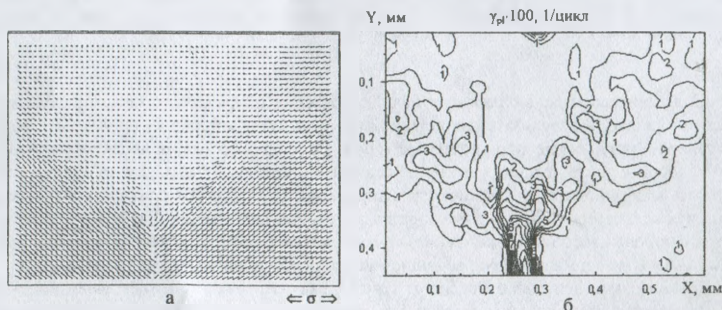


Рис.1. Типичное поле смещений перед вершиной усталостной трещины нормального отрыва (тип I, а) и соответствующее распределение главного пластического сдвига γ_{pl} (б). $N=66 \cdot 10^3$, $\Delta N=10^3$. Сварное соединение стали 10Г2С.

Степень накопления повреждений в локальных областях материала можно количественно характеризовать главным пластическим сдвигом γ_{pl} , который не зависит от выбора системы координат [3,5] и определяет деформационную структуру вблизи вершины трещины. Он рассчитывается по формуле (1):

$$\gamma_{pl} = \sqrt{(\epsilon_{xx} - \epsilon_{yy})^2 + 4\epsilon_{xy}^2} / \Delta N, \quad (1)$$

где: ϵ_{xx} , ϵ_{yy} , ϵ_{xy} – компоненты тензора пластической деформации, ΔN – приращение циклической нагрузки.

Видно, что смещения приблизительно симметричны относительно линии трещины, а их амплитуда уменьшается при удалении от вершины к краю образца. Под действием внешней растягивающей силы берега трещины раскрываются, а вследствие действия максимальных касательных напряжений перед вершиной трещины образуются две боковые полосы пластичности. Угол между границами полос пластичности в эксперименте составлял $\pm(45-60^\circ)$.

Таким образом, деформационная структура вблизи вершины усталостной трещины характеризуется локальной зоной непосредственно перед вершиной (ЗТ) и двумя боковыми полосами пластичности, где значения $\gamma_{pl}(x,y)$ в несколько раз ниже. Это соответствует схеме нагружения (циклическое растяжение), и хорошо согласуется с известными литературными данными [6]. Зависимости средних значений $\gamma_{pl}(v)$ в полосах пластичности от циклической нагрузки для сварного соединения стали 10Г2С могут быть приблизительно описаны формулой $\gamma_{pl} = \gamma_0 \exp(\beta v)$, где $\gamma_0 = 5 \cdot 10^{-8}$, $\beta = 8,3$, а v – циклическое отношение ($v = N/N_{max}$). Значения γ_{pl} в целом экспоненциально растут, начиная с третьей стадии и вплоть до разрушения, изменяются приблизительно на три порядка и для обеих вершин трещины примерно равны [7].

Исследования механизма многоциклового усталости соединенных внахлест пластин показали, что развитие трещины может сопровождаться продольными сдвигами ее берегов. При этом перед ее вершиной регистрируется аккомодационное пластическое течение, подобное незамкнутому вихрю (рис. 2,а). При расчете γ_{pl} принималось, что течение плавно изменяет свое направление. Тогда векторное поле можно записать в полярной системе координат в виде (2):

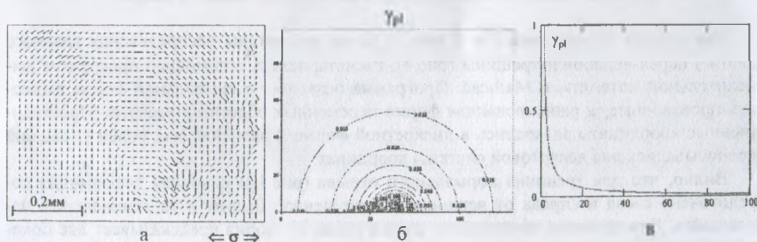


Рис.2. Поле смещений перед вершиной трещины поперечного сдвига (мода II, а), соответствующее распределение γ_{pl} (б) и его поведение в радиальном направлении (в). $N=285 \cdot 10^3$, $\Delta N=0,3 \cdot 10^3$. Соединенные внахлест пластины алюминиевого сплава Д16АТ.

$$\vec{u}(x, y) = u_0 \vec{e}_\theta. \quad (2)$$

Здесь $u_0=1$ мкм. Из (1) и (2) можно рассчитать $\gamma_{pl}(x,y)$. Видно (рис.2,б), что деформационная структура трещины моды II обладает радиальной симметрией, а значения γ_{pl} быстро убывают при удалении от вершины трещины (рис.2,в). Поэтому можно считать, что структура вершины трещины поперечного сдвига включает в себя зону непосредст-

венно перед вершиной, где скорость накопления повреждений очень высока, смежную область, где повреждения материала, по крайней мере, на порядок меньше и периферийную. Формула (2) не учитывает уменьшения амплитуды сдвигов при удалении от вершины трещины.

На основе модели [5] в работе [8] были построены поля упругих смещений (рис.3) перед вершиной трещины типов I, II и (I+II). Видно, что для моды I (рис. 3,а) точки поверхности смещаются под некоторым углом к оси растягивающей внешней силы. Этот угол максимален вдоль линии трещины и стремится к нулю при удалении от нее, где влияние трещины уменьшается. Перед вершиной трещины моды II (рис.3,б) под действием сдвига, поперечного фронту трещины, упругие смещения интегрально имеют характер незамкнутого вихря, что отражает аккомодационный поворот материала. Амплитуда смещений возрастает при удалении от вершины трещины пропорционально \sqrt{r} , что связано с накоплением упругих суммарных смещений.

Таким образом, вид полей смещений, регистрируемых в эксперименте, в целом подобен полям смещений мод I и II, предсказываемым теорией. Это позволяет идентифицировать моду трещины (I, II, I+II). Однако, для полей необратимых смещений отсутствует фактор \sqrt{r} , и при удалении от вершины трещины амплитуды смещений постепенно уменьшаются до нуля.

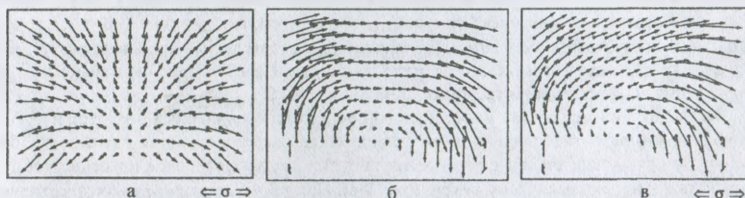


Рис.3. Упругие поля смещений перед вершиной трещины нормального отрыва (а, мода I), поперечного сдвига (б, мода II) и смешанного типа (в, мода I+II). $K_{II}/K_I = 2$ (теория).

Для модели трещин мод I и II (рис.3) были рассчитаны распределения главного сдвига γ перед вершиной трещины (рис.4). Расчеты велись с помощью программы вычислительной математики Mathcad. Программа позволяет в символьной форме вычислять производные, а ранжированная форма переменных облегчает расчеты. Пространственные координаты задавались в дискретной форме. Уравнения для полей смещений переписывались для декартовой системы координат.

Видно, что для трещины нормального отрыва (рис.4,а) основная деформация сосредоточена слева и справа от вершины и постепенно убывает в тангенциальном направлении. Для трещины поперечного сдвига (мода II) теория предсказывает две боковые полосы локализации деформации вблизи направления максимальных касательных напряжений, где значения γ максимальны (рис.4,б).

Отсюда следует, что структура трещины типов I и II, предсказываемая линейной упругой механикой разрушения, не соответствует деформационной структуре трещины, измеряемой в эксперименте.

В условиях простой схемы нагружения (циклическое растяжение), наряду с модой I, часто регистрируется комплексный характер полей смещений. Неоднородность свойств материала (например, сварной шов) и/или условия испытания (например, фреттинг-коррозия) усиливают влияние дополнительной моды разрушения.

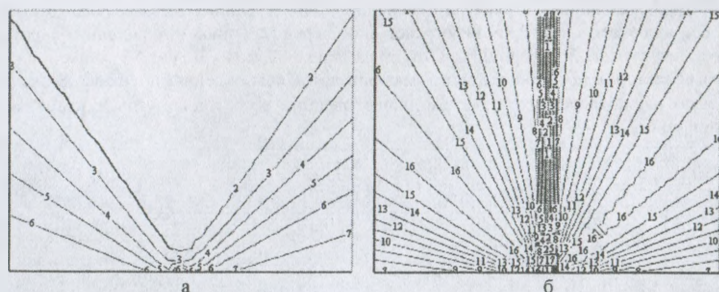


Рис. 4. Распределение главного сдвига $\gamma(x,y)$ перед вершиной трещины моды I (а) и II (б).

На основе свойств симметрии (асимметрии) упругих полей базовых мод I и II (теория) можно разложить поле смещений смешанной моды (I+II) на базовые векторные поля [8]. Такой подход применим и для неупругих малых смещений. На рис. 5 показан пример работы алгоритма. Видно, что раскрытие трещины (мода I) сопровождается аккомодационным пластическим течением перед ее вершиной (мода II).

Учет моды II позволяет скорректировать значение деформационного параметра трещиностойкости – раскрытие вершины трещины. Это соответствует параметру CTOD (crack tip opening displacement), используемому за рубежом. Этот параметр связан с текущими значениями КИН. Сравнивая его с критическим значением КИН K_{IC} , можно оценить механическое состояние тела с трещиной.

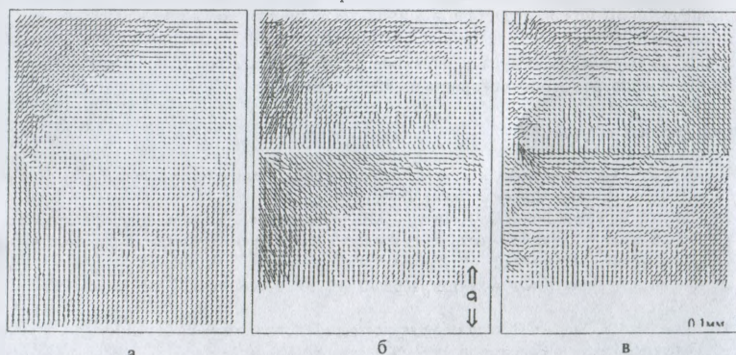


Рис. 5. Поле смещений перед вершиной усталостной трещины (а) и его разложение на базовые моды (б, в). $N = 58,5 \times 10^3$, $\Delta N = 2 \times 10^3$. Сварное соединение стали 10Г2С.

Реально в эксперименте встречаются как полная, так и неполная моды усталостных трещин I и II. Неполной модой будем называть векторное поле соответствующего типа (I или II), развивающееся лишь по одну сторону от вершины трещины (рис. 6). Развитие трещины по неполной моде связано не столько с ее ветвлением, сколько со сложным напряженным состоянием перед ее вершиной и неоднородностью металла, обуславливающие неодинаковую скорость накопления повреждений слева или справа от вершины трещины.

Деформационная структура неполной моды трещины нормального отрыва (рис.6,а) включает в себя зону непосредственно перед вершиной и лишь одну боковую полосу пластической деформации. Структура неполной моды II (рис.6,б) образует некоторый сектор, в пределах которого накапливаются повреждения материала. В экспериментах наблюдалось, что с ростом длины трещины возрастает и угол "сектора" неполной моды II.

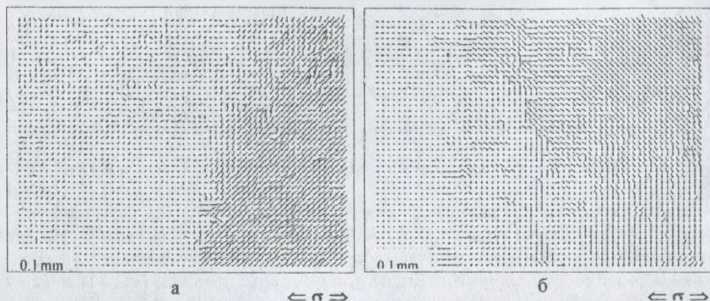


Рис. 6. Поля смещений перед вершиной трещины, соответствующие неполной моде I (а) и II (б). $N=112 \cdot 10^3$, $\Delta N=6 \cdot 10^3$ (а); $N=277 \cdot 10^3$, $\Delta N=10^3$ (б). Соединенные внахлест пластины алюминиевого сплава Д16АТ.

Таким образом, деформационную структуру вблизи вершины реальной усталостной трещины можно представить в виде совокупности мод I и II, каждая из которых может быть полной и/или неполной. Это позволит более точно оценивать пространственное распределение повреждений перед вершиной трещины и вклад каждой моды в накопление повреждений и скорость развития трещины.

Список литературы

1. Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов. Т. 1. / Под ред. В.Е. Панина. – Новосибирск: Наука, 1995. – 298 с.
2. Панин В.Е., Плешанов В.С., Кибиткин В.В., Сапожников С.В. Анализ полей векторов смещений и диагностика усталостного разрушения алюминиевого сплава на мезоуровне // Дефектоскопия. – 1998. – №2. – С. 80 – 87.
3. Филин А.П. Прикладная механика твердого деформируемого тела. – М.: Наука, 1975. – Т.1. – 832 с.
4. Zili S., Jed S., Stephen R. Measuring Microscopic Deformations with Digital Image Correlation, Optics and Lasers in Engineering, 1997, N27, pp. 409–428.
5. Хеллан К. Введение в механику разрушения. М.: Мир, 1988. 364 с.
6. Механика разрушения и прочность материалов: Справ. пособие. Т. 4. / Под ред. В.В. Панасюка. Киев: Наукова думка, 1990. – 680 с.
7. Плешанов В.С., Панин В.Е., Кибиткин В.В., Лебедева Н.А. Эволюция мезоструктуры и кинетика накопления усталостных повреждений в сварных соединениях конструкционной стали в условиях, близких к плоскому напряженному состоянию // Физическая мезомеханика. – 2001. – Т.4. – №6. – С. 105 – 117.
8. Кибиткин В.В., Лебедева Н.А., Плешанов В.С. Выделение базовых мод разрушения при развитии усталостной трещины по смешанному типу // Физическая мезомеханика. – 2004. – Т.7. – №2. – С. 35 – 39.