

05

Исследование скорости диссипации энергии в вершине усталостной трещины

© А.Ю. Изюмова, О.А. Плехов, А.Н. Вшивков, А.А. Прохоров,
С.В. Уваров

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
Пермский государственный национальный исследовательский
университет, Пермь
E-mail: roa@icmm.ru

Поступило в Редакцию 5 мая 2014 г.

Проведен анализ термодинамики распространения усталостных трещин в пластических материалах на примере стали 8Х18Н10. Разработано оригинальное устройство, позволяющее измерять, на основе эффекта Пельтье, скорость диссипации энергии пластической деформации в вершине трещины в процессе ее распространения. В результате экспериментов показано, что при постоянной амплитуде напряжения скорость распространения усталостной трещины является линейной функцией произведения скорости диссипации энергии и текущей длины трещины.

Один из самых известных и широко используемых законов роста усталостной трещины был экспериментально установлен в 1961 году Парисом [1]. Вслед за этим было получено как большое число экспериментальных подтверждений данного закона, так и отклонений, требующих его модификации. Среди них можно отметить введение эффективного коэффициента интенсивности напряжений, предложенное Элбером (Elber) в 1970 году [2], учет зависимости скорости распространения трещины от ее текущей длины [3], усложнение степенной зависимости скорости распространения от амплитуды коэффициента интенсивности напряжения, например, закон Формана (Forman) [4], учет промежуточных асимптотик процесса, введение в рассмотрение фрактальных характеристик поверхности трещины [5].

Значительное внимание было уделено поиску других характеристик процесса, отличных от коэффициента интенсивности напряжения, учитывающих процесс пластической деформации в вершине трещины в металлах. Исследованию термодинамики усталостных трещин был по-

связан ряд экспериментальных и теоретических работ, среди которых, по мнению авторов, можно выделить следующие [6–9].

Опуская математические преобразования, баланс энергии при распространении трещины может быть записан в виде:

$$\frac{da}{dN} = \frac{W_p - Q}{\Lambda - J}, \quad (1)$$

где a — длина трещины, N — число циклов, W_p — мощность пластической работы, Q — мощность диссипации тепла, Λ — энергия, затрачиваемая на образование новой поверхности и на разрушение материала в зоне процесса (все энергии рассчитаны для одного полного цикла деформирования), J — энергетический J -интеграл.

В первом приближении величины, стоящие в правой части соотношения (1), могут быть выражены через мощность теплового потока. Используя гипотезу Тейлора о малости величины накопленной энергии в металлах в процессе пластического деформирования, можно записать

$$\beta = \frac{W_p - Q}{W_p}.$$

Величина, определяющая сопротивление материала распространению трещины (Λ), может быть оценена критической величиной J -интеграла — J_c [10]. Величина J -интеграла аналогичным образом может быть связана со скоростью генерации тепла, например при помощи соотношения Райса

$$J \sim \frac{1}{t(l-a)} W_p \sim \frac{1}{t(l-a)\beta} Q$$

(где tl — площадь поперечного сечения образца). В результате соотношение для скорости распространения усталостной трещины может быть записано в виде

$$\frac{da}{dN} = \frac{1-\beta}{\beta} \frac{Q}{J_c - f(a, Q)}. \quad (2)$$

С ростом трещины величина J -интеграла растет как за счет уменьшения знаменателя в соотношении Райса, так и за счет увеличения площади петли гистерезиса (скорости диссипации энергии). Это приводит к уменьшению значения знаменателя ($J_c - J$) в соотношении (1) и росту скорости трещины. Следовательно, в первом приближении

можно записать, что в стационарном режиме распространения скорость усталостной трещины пропорциональна произведению скорости диссипации энергии и текущей длине трещины:

$$\frac{da}{dN} = Qa. \quad (3)$$

В данной работе проведено прямое измерение тепловой мощности источника в вершине усталостной трещины с помощью оригинального датчика, принцип действия которого основан на эффекте Пельтье. Разработанный датчик можно использовать как для калибровки результатов инфракрасных измерений, так и для непосредственного измерения мощности тепловых потоков при проведении механических испытаний металлов.

Механические испытания проводились на 100 кН сервогидравлической машине Ви-00-100 в режиме растяжение–сжатие с ненулевым средним напряжением ($R = -0.03$). Результаты квазистатических испытаний исследуемого материала позволяют определить его механические характеристики: модуль Юнга 196 ГПа, $\sigma_{0.2} = 160$ МПа, $\sigma_B = 490$ МПа, удлинение при разрушении 40%.

В работе исследованы особенности процесса тепловыделения в вершине трещины при циклическом нагружении образцов стали 8X18H10 с частотой 10 Hz. Исследуемые образцы изготавливались из листа толщиной 3 mm. Размеры рабочей области образца — $3 \times 55 \times 250$ mm. Усталостная трещина инициировалась из отверстия в центре образца приложением к образцу высокой амплитуды напряжения и высокой частоты нагружения (трещина инициировалась при амплитуде напряжения 238 МПа и частоте нагружения 20 Hz). При достижении трещиной длины более 20 mm амплитуда напряжения уменьшалась для понижения скорости распространения трещины и детального изучения процессов диссипации энергии в ее вершине.

Для расчета мощности потока тепла использовался элемент Пельтье МТ 2.6-0.8-263 размером $50 \times 50 \times 3.9$ mm. Элемент Пельтье одновременно перекрывал обе вершины распространяющейся трещины и позволял измерять интегральную величину теплотока. Одна часть элемента приводилась в непосредственный контакт с образцом, вторая поддерживалась при температуре окружающей среды за счет жидкостной системы охлаждения.

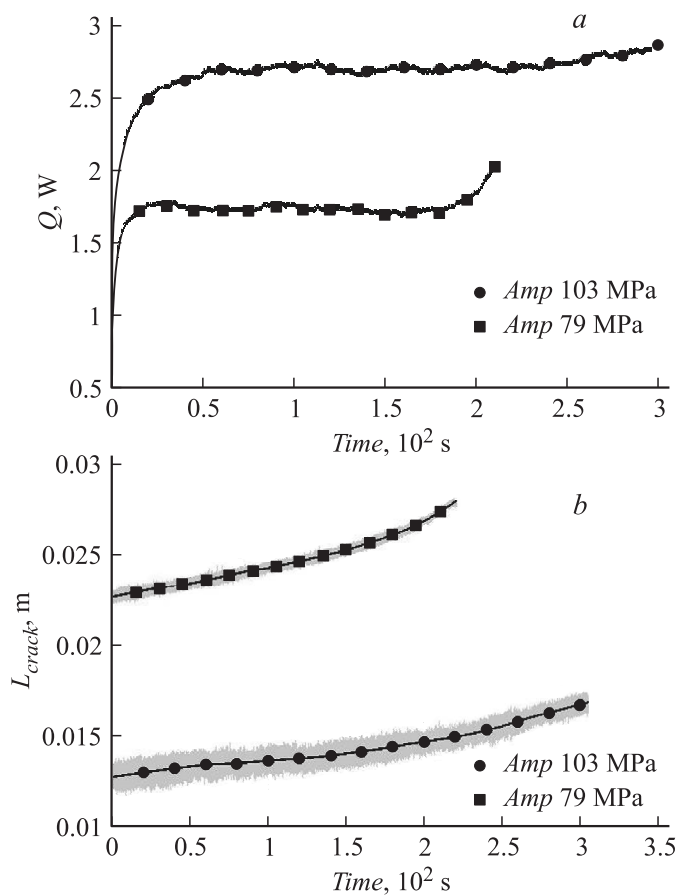


Рис. 1. Зависимость скорости диссипации энергии в вершине трещины (а) и длины усталостной трещины (b) в стали 8X18N10 от времени при амплитуде приложенного напряжения 79 и 103 МПа. Кривые серого цвета — экспериментальные данные, кривые с маркерами — осредненные данные.

На рис. 1, а представлена эволюция скорости диссипации энергии в вершине трещины. Характерная зависимость длины усталостной трещины при постоянной амплитуде приложенного напряжения представлена на рис. 1, b.

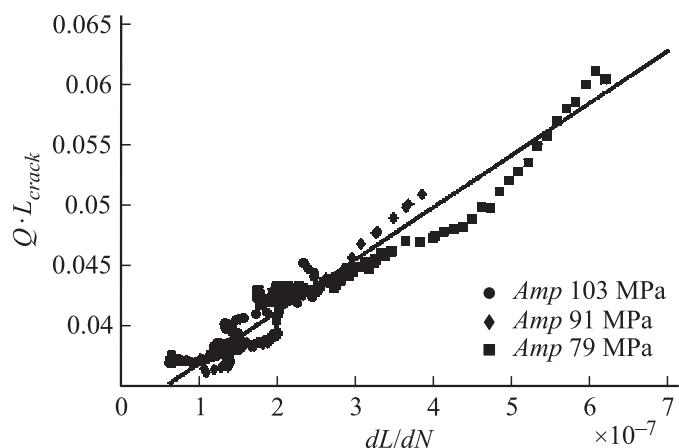


Рис. 2. Зависимость произведения скорости диссипации энергии на длину усталостной трещины от скорости ее распространения для различных амплитуд приложенного напряжения (79, 91, 103 МПа).

На зависимости скорости диссипации от времени можно выделить 3 характерных участка, соответствующих различным режимам распространения трещины. На начальном участке трещина движется в области интенсивно деформированного материала, созданного в процессе иницирования трещины. Второй участок трещины соответствует выходу на стационарный режим распространения, который соответствует режиму Париса, и при существенном увеличении длины трещины наблюдается ускорение трещины и переход в нестационарный режим распространения, сопровождающийся интенсивным тепловыделением.

На рис. 2 представлены результаты анализа экспериментальных данных для 3 различных амплитуд напряжения. Анализ представленных результатов позволяет сделать вывод о линейной зависимости между скоростью распространения усталостной трещины и произведением скорости диссипации энергии на текущую длину трещины.

Таким образом, использование данного подхода позволило детально исследовать процессы распространения усталостных трещин в стали 8X18N10 при постоянной амплитуде напряжений. Анализ полученных результатов позволяет высказать гипотезу о линейной зависимости

между скоростью усталостной трещины и произведением скорости диссипации энергии в ее вершине на ее текущую длину. Предложенное соотношение использует величину энергии диссипации, которая более объективно отражает процессы, происходящие при распространении усталостной трещины, в отличие от величины коэффициента интенсивности напряжений, являющегося результатом решения линейно-упругой задачи для тела с бесконечно тонким разрезом.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ 14-01-96005 и 14-01-00122.

Список литературы

- [1] *Paris P.C., Gomez M.P., Anderson W.E.* // The Trend in Engineering. 1961. N 13. P. 9–14.
- [2] *Elber W.* // Eng. Fracture Mech. 1970. N 2. P. 37–45.
- [3] *Jones R., Molent L., Pitt S.* // International J. Fatigue. 2008. N 30. P. 1873–1880.
- [4] *Forman R.G., Kearney V.E., Eagle R.M.* // J. Basic Eng. ASME. 1967. V. 89. N 3. P. 459–464.
- [5] *Paggi M., Plekhov O.* // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part C: Journal of Mechanical Engineering Science 0954406213515643, first on-line published on December 12, 2013 as doi: 10.1177/0954406213515643.
- [6] *Izumi Y., Fine M. E., Mura T.* // Int. J. Fracture. 1981. N 17. P. 15–25.
- [7] *Liaw P.K.* // Engineering Fracture Mechanics. 1985. V. 22. N 2. P. 237–245.
- [8] *Chudnovsky A., Moet A.* // J. Materials Science. 1985. N 20. P. 630–635.
- [9] *Ikeda S., Izumi Y., Fine M.E.* // Engineering Fracture Mechanics. 1977. N 9. P. 123–136.
- [10] *Плехов О.А., Наймарк О.Б., Saintier N., Palin-Luc T.* // ЖТФ. 2009. Т. 79. В. 8. С. 56–62.