

05

## **Экспериментальное исследование генерации тепла в вершине усталостной трещины**

© А.И. Терёхина, М.В. Банников, О.А. Плехов, Э.В. Плехова

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

Поступило в Редакцию 3 марта 2012 г.

Экспериментально исследуется генерация тепла в вершине усталостной трещины в титане ВТ-6 при циклическом нагружении с использованием метода инфракрасной термографии. Исследовано пространственное и временное изменение температуры в вершине трещины, определены форма и интенсивность зоны диссипации тепла. В результате сравнения полученных экспериментальных данных с соотношениями линейной теории упругости показано несоответствие формы зоны пластической деформации и динамики тепловыделения в вершине трещины линейным теоретическим моделям. Полученные результаты также показали несоответствие во времени максимумов приложенных напряжений и интенсивности тепловыделения в вершине усталостной трещины.

Диссипация тепла, вызванная эволюцией структуры материала при циклическом деформировании, является объектом интенсивных исследований на протяжении последних десятилетий. В настоящее время достоверно известно, что в условиях циклического деформирования процессы локализации деформации сопровождаются интенсивным выделением тепла, что делает возможным их раннее обнаружение методами инфракрасной термографии [1].

Благодаря своей универсальности метод инфракрасной термографии в последнее время активно применяется при проведении механических испытаний как с целью получения детальной информации о процессе зарождения и распространения усталостных трещин [2–4], так и для исследования закономерностей преобразования и накопления энергии в процессе деформирования [5–8]. Возможности метода инфракрасной термографии позволяют в режиме реального времени исследовать

процессы изменения температуры, вызванные термоупругостью и локализацией деформации в вершине трещины, а также эффектами трения на берегах трещины в процессе ее распространения.

Данная работа посвящена исследованию термоупругого и термопластического эффектов в вершине трещины, распространяющейся под действием растягивающего циклического напряжения, приложенного по нормали к плоскости трещины. В работе экспериментально получены эффекты охлаждения, вызванные упругой деформацией материала в вершине трещины, и исследованы особенности распределения напряжений в вершине трещины. Высокоскоростная съемка позволила определить интенсивность и форму зоны диссипации энергии, вызванную локализацией пластической деформации в вершине трещины, а также сопоставить интенсивность диссипации энергии для различных уровней напряжения.

В работе исследованы особенности процесса тепловыделения при циклическом нагружении образцов титана ВТ-6 с частотами от 1 до 10 Hz. Квазистатические испытания исследуемого материала позволяют определить его механические характеристики: модуль Юнга 64 GPa, предел текучести  $\sigma_{0,2} = 683$  МПа, предел прочности  $\sigma_b = 790$  МПа. Испытания проводились на 100 kN сервогидравлической машине Vi-00-100. Для определения величины локальной деформации во время эксперимента использовался осевой экстензометр — Vi-06-304 с погрешностью  $\pm 1.5 \mu\text{m}$ , установленный на берегах трещины. Исследуемые образцы изготавливались из листа толщиной 3 mm, размеры рабочей зоны  $200 \times 55$  mm. Для получения начальной трещины образец был предварительно ослаблен тремя перекрывающимися отверстиями в центре рабочей зоны диаметром 4 и 3 mm (для крайних отверстий). На начальном этапе эксперимента с помощью повышенной нагрузки ( $215 \pm 238$  МПа, частота нагружения 20 Hz) создавалась усталостная трещина длиной 5 mm. В процессе регистрации эволюции поля температуры нагрузка уменьшалась с целью замедления скорости распространения трещины (менее 1 mm/min) и детального исследования процессов генерации тепла в ее вершине.

Исследование поля температур осуществлялось инфракрасной камерой FLIR SC 5000 (частота съемки до 20 kHz, пространственное разрешение до  $2 \cdot 10^{-4}$  m). Поверхность образцов полировалась в несколько этапов абразивной бумагой (на завершающей стадии полировки размер

абразивных частиц не превышал  $3 \mu\text{m}$ ), перед экспериментом полированная поверхность покрывалась тонким слоем аморфного углерода.

В вершине усталостной трещины происходит интенсивная диссипация энергии, вызванная локализацией пластической деформации. Характерный размер зоны диссипации энергии, в рамках линейной механики разрушения, определяется величиной коэффициента интенсивности напряжений. Величину коэффициента интенсивности напряжений с учетом геометрии образца можно оценить, используя выражение

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} \sec \left( \frac{\pi a}{W} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

где  $W$  — ширина образца,  $a$  — полудлина трещины,  $\tau$  — напряжение в рабочей части образца. Радиус зоны пластической деформации на поверхности пластины равен

$$r_p = k \frac{K^2}{\sigma_y^2}, \quad (2)$$

где  $k$  — коэффициент, зависящий от вида напряженного состояния и принимаемой модели пластической деформации,  $\sigma_y$  — напряжение течения.

Форму зоны пластической деформации в вершине трещины при квазистатическом растяжении можно описать соотношениями: с учетом критерия Мизеса

$$r_p(\theta) = \frac{1}{4\pi} \frac{K^2}{\sigma_y^2} (1 + \cos(\theta) + 3 \sin^2(\theta)), \quad (3)$$

с учетом критерия Треска–Сен-Венана

$$r_p(\theta) = \frac{1}{2\pi} \frac{K^2}{\sigma_y^2} \cos^2 \left( \frac{\theta}{2} \right) \left( 1 + \sin \left( \frac{\theta}{2} \right) \right)^2, \quad (4)$$

где  $\theta$  — угол полярной системы координат (начало системы координат совпадает с вершиной трещины, полярная ось — с направлением ее распространения).

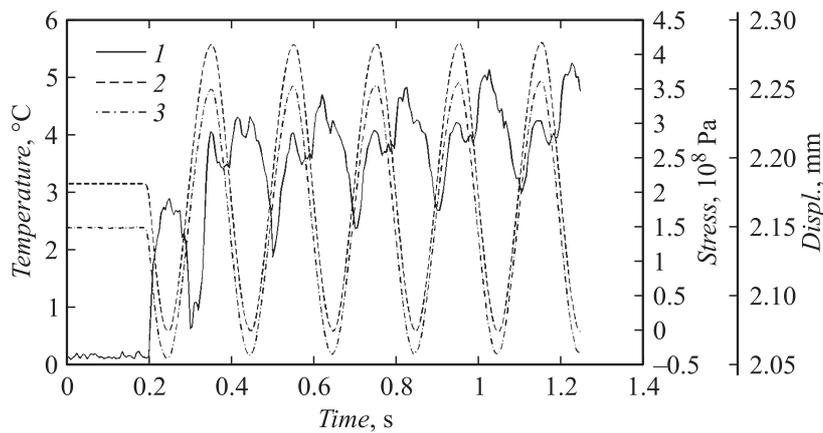
Анализ термических эффектов в вершине трещины осложняется тем, что при приложении нормальной нагрузки к плоскости трещины



**Рис. 1.** Распределение температуры в вершине и на берегах усталостной трещины при циклическом деформировании.

траектория ее распространения не всегда является строго прямолинейной. Появление точки перегиба на траектории трещины приводит к существенному тепловыделению на ее берегах (рис. 1). По-видимому, берега трещины сдвигаются относительно друг друга и вызывают появление зоны трения и/или пластической деформации, что соответствует гипотезе закрытия трещины, используемой в некоторых моделях линейной механики разрушения.

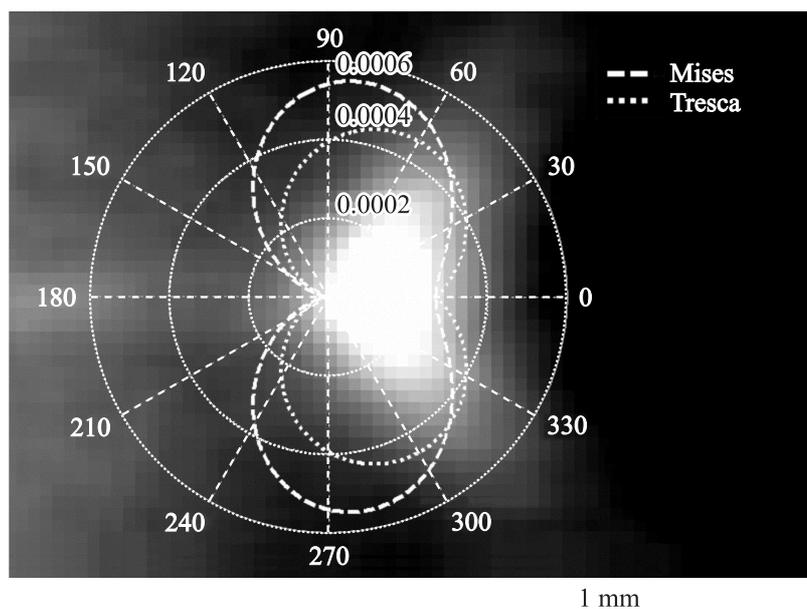
На рис. 2 показано изменение максимальной температуры в вершине трещины, напряжения и раскрытия трещины в процессе нагружения при амплитуде напряжения 212 МПа, среднем напряжении 212 МПа и частоте 5 Hz. Данные датчика перемещения, закрепленного на берегах трещины, позволяют утверждать, что раскрытие берегов трещины изменяется синфазно с приложенным напряжением.



**Рис. 2.** Изменение максимальной температуры в вершине трещины (1), напряжения (2) и раскрытия трещины (3) в процессе нагружения при амплитуде напряжения 212 МПа, среднем напряжении 212 МПа и частоте 5 Hz.

Анализ температурных данных позволяет утверждать, что максимум приложенных напряжений и максимум интенсивности тепловыделения в вершине усталостной трещины не совпадают во времени. В начале эксперимента образец нагружен средним напряжением и находится в состоянии термодинамического равновесия. На каждом цикле нагружения наблюдается участок падения температуры, вызванный термоупругим эффектом, переходящий в участок роста температуры, вызванный локальным переходом через предел пропорциональности и образованием зоны пластического деформирования. При падении напряжения тепловыделение в вершине трещины продолжается. Геометрия зоны пластического деформирования представлена на рис. 3. При уменьшении напряжения в вершине трещины тепловыделение возрастает и температура достигает максимума практически при нулевом напряжении. Затем в начале следующего цикла температура падает за счет термоупругого эффекта и процесс продолжается.

Метод инфракрасной термографии позволяет с высокой точностью визуализировать зону интенсивной диссипации энергии в вершине усталостной трещины (рис. 3). Распределение температуры в вершине трещины в процессе деформирования может отличаться от формы



**Рис. 3.** Форма зоны интенсивной диссипации энергии в вершине усталостной трещины на первом цикле деформирования и зоны пластической деформации, построенные по критериям Мизеса и Треска–Сен-Венана.

зоны пластических деформаций из-за процессов теплопроводности, поэтому для анализа геометрии области интенсивного тепловыделения, вызванного пластической деформацией, логично использовать только первый цикл деформирования. На рис. 3 показано сравнение наблюдаемой формы зоны интенсивной диссипации энергии на первом цикле деформирования и классических решений (3), (4) для формы зоны пластической деформации в вершине трещины (в расчетах использовались следующие данные: половина длины трещины 4 mm, приложенное напряжение 300 МПа). Анализ результатов позволяет сделать вывод только о качественном соответствии формы зоны пластической деформации в вершине усталостной трещины моделям Мизеса и Треска–Сен-Венана.

Показано, что процесс тепловыделения носит существенно нелинейный характер. Использование метода инфракрасной термографии позволяет эффективно исследовать процессы, связанные как с локализацией пластической деформации в вершине трещины, так и с трением на ее берегах. На данном этапе исследований экспериментально показано, что зона пластической деформации не совпадает с предсказаниями линейной механики разрушения, а максимум тепловыделения достигается на нисходящей ветви нагружения.

Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ 11-01-00153-а, 11-01-96005-р\_урал\_а.

## Список литературы

- [1] *Вавилов В.П.* // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2006. Т. 72. № 3. С. 26–36.
- [2] *Plekhov O., Palin-Luc T., Naimark O., Uvarov S., Saintier N.* // Fatigue and fracture of engineering materials and structures. 2005. V. 28. Iss. 1. P. 169–178.
- [3] *Plekhov O., Saintier N., Palin-Luc T., Uvarov S., Naimark O.* // Material Science and Engineering. A. 2007. V. 462. N 1. P. 367–370.
- [4] *Плехов О.А.* // ЖТФ. 2011. Т. 81. В. 2. С. 144–146.
- [5] *Oljferuk W., Maj M., Raniecki B.* // Materials Science and Engineering. A. 2004. V. 374. P. 77–81.
- [6] *Плехов О.А., Saintier N., Наймарк О.Б.* // ЖТФ. 2007. Т. 77. В. 9. С. 1236–1238.
- [7] *Плехов О., Наймарк О., Семёнова И., Валиев Р., Saintier N., Palen-Luc T.* // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. В. 13. С. 33–40.
- [8] *Плехов О.А., Чудинов В.В., Леонтьев В.А., Наймарк О.Б.* // Вычислительная механика сплошных сред. 2008. Т. 1. № 4. С. 69–78.