

УДК 539.4

М.В. Банников¹, А.Ю. Федорова¹, А.И. Терехина², О.А. Плехов¹¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия²Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФРАКТАЛЬНЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ РОСТА УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ И ДИССИПАЦИИ ЭНЕРГИИ В ЕЕ ВЕРШИНЕ

Статья посвящена исследованию зарождения и распространения усталостных трещин в титановых сплавах методом инфракрасной термографии при циклической нагрузке и с помощью анализа поверхности разрушения. Проведены две серии экспериментов на плоских гладких и на образцах с предварительно выращенной усталостной трещиной. Исследована пространственная и временная эволюция температуры в вершине трещины, определена форма пластической деформации и интенсивность тепловыделения. На основании результатов сравнительного анализа экспериментальных данных и уравнений линейной механики разрушения показано, что пространственная форма и характер диссипации тепла в зоне вершины трещины не соответствуют простой теоретической модели. В работе экспериментально получен эффект охлаждения за счет упругой деформации материала, а также исследованы особенности распределения напряжений в вершине трещины. Высокоскоростная съемка (на частоте 1 кГц) позволила определить интенсивность и форму зоны рассеиваемой энергии из-за пластической деформации в вершине трещины, а также сравнить скорость диссипации энергии для различных уровней напряжения. Разрушенные образцы исследовались с помощью электронного микроскопа и интерферометра New View для определения скейлинговых закономерностей образования и роста трещины. Полученные результаты позволяют нам проверить существующие модели неупругой деформации в вершине трещины, а также улучшить методы контроля накопления микрповреждений в процессе усталостного деформирования.

Ключевые слова: усталость, диссипация энергии, термоупругий эффект, инфракрасная термография, фрактография.

M.V. Bannikov¹, A.Y. Fedorova¹, A.I. Terekhina², O.A. Plekhov¹

¹Institute of Continuous Media Mechanics UrB RAS, Perm, Russian Federation

²Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

EXPERIMENTAL STUDY OF FRACTAL PROPERTIES OF FATIGUE CRACK GROWTH AND ENERGY DISSIPATION IN CRACK TIP

Paper is devoted to investigation of initiation and propagation of cracks in titanium alloys by infrared thermography study of heat generation under cyclic loading and fractography analyses of fracture surface. Two series of experiments on flat smooth specimens and flat specimens with preliminary grown fatigue crack are carried out. Spatial and time temperature evolution into crack tip is investigated, the shape and dissipative intensity at crack process zone are estimated. Based on a result of comparative analysis of the experimental data and the linear fracture mechanics equations it is shown that the spatial distribution and character of heat dissipation zone into the crack tip doesn't correspond to the conventional models. High-speed shooting (at a frequency of 1 kHz) allowed us to determine the intensity and shape of zone of energy dissipation caused by plastic deformation at the crack tip, as well as to compare the rate of energy dissipation for different stress levels. Fractured specimens were analyzed by interferometer microscope and SEM to verify the existing models of inelastic deformation at the crack tip and to improve methods of monitoring of damage accumulation during fatigue test.

Keywords: fatigue, energy dissipation, thermo elasticity effect, infrared thermography, fractography.

Введение

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 [2–3], так и для исследования закономерностей преобразования и накопления энергии в процессе деформирования [4–9]. 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.

1. Материалы и условия эксперимента

В работе исследованы особенности процесса тепловыделения при циклическом нагружении образцов титана ОТ-4 с частотами от 1 до 10 Гц [7]. Квазистатические испытания исследуемого материала позволяют определить его механические характеристики: модуль Юнга 64 ГПа, $\sigma_{0,2}=683$ МПа, $\sigma_{\text{в}}=790$ МПа.

Химический состав сплава ОТ-4

Элемент	Весовой, %
Al	3,68
Ti	95,1
Mn	1,22

Испытания проводились на растяжной 100 кН сервогидравлической машине Vi-00-100. Для определения величины локальной деформации во время эксперимента использовался осевой экстензометр Vi-06-304 с погрешностью $\pm 1,5$ мкм, установленный на берегах трещины. Исследуемые образцы изготавливались из листа толщиной 3 мм, размеры рабочей зоны 200×55 мм. Для получения начальной трещины образец был предварительно ослаблен тремя перекрывающимися отверстиями в центре рабочей зоны диаметром 4 и 3 мм, геометрия представлена на рис. 1.

На начальном этапе эксперимента с помощью повышенной нагрузки ((215±238) МПа, частота нагружения 20 Гц) создавалась усталостная трещина длиной 5 мм. В процессе регистрации эволюции поля

температуры нагрузка уменьшалась с целью замедления скорости распространения трещины (менее 1 мм/мин) и детального исследования процессов генерации тепла в ее вершине.

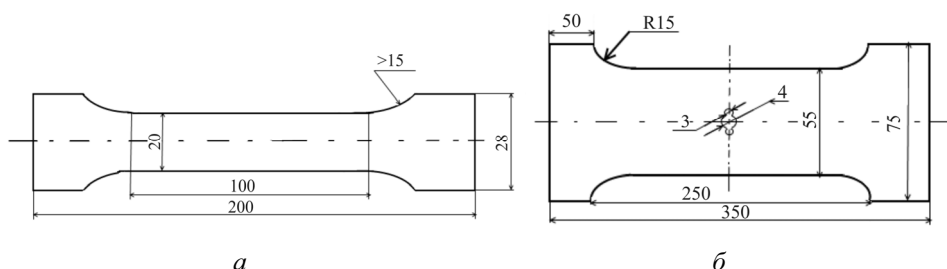


Рис. 1. Геометрия исследуемых образцов для изучения: эффекта термоупругости (а); тепловых эффектов в вершине трещины (б)



Рис. 2. Внешний вид экспериментальной установки: 1 – инфракрасная камера FLIR SC 5000; 2 – захваты сервогидравлической нагружающей машины Vi-00-100; 3 – исследуемый образец

Исследование поля температур осуществлялось инфракрасной камерой FLIR SC 5000 (частота съемки до 20 кГц, пространственное разрешение до $2 \cdot 10^{-4}$ м). Поверхность образцов полировалась в не-

сколько этапов абразивной бумагой (на завершающей стадии полировки размер абразивных частиц не превышал 3 мкм), перед экспериментом полированная поверхность покрывалась тонким слоем аморфного углерода.

2. Теоретическое описание изменения температуры металла в процессе циклического деформирования

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

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

где W – ширина образца; a – полудлина трещины.

Эволюция температуры T при циклическом деформировании $\sigma = \sigma_A + \Delta\sigma \sin(\omega t)$ в предположении однородности ее распределения, в отсутствие структурных переходов и пластической деформации, может быть описана уравнением Кельвина

$$\operatorname{Log} T_t = - \frac{\beta(1-2\nu)\omega}{\rho c} \Delta\sigma \cos \omega t, \quad (2)$$

где β – коэффициент температурного расширения; ρ – плотность; c – удельная теплоемкость; ν – коэффициент Пуассона; ω – угловая частота нагружения; $(.)_t$ – производная по времени.

Решение уравнения (2) имеет вид

$$T = T_0 \exp \left[- \frac{\beta(1-2\nu)}{\rho c} \Delta\sigma \sin \omega t \right], \quad (3)$$

разложение в ряд соотношения (3) с учетом малости соотношения, стоящего в показателе экспоненты, дает следующие соотношения для амплитуды первой и второй гармоники:

$$A_1 = T_0 \frac{\beta(1-2\nu)}{\rho c} \Delta\sigma, \quad A_2 = \frac{T_0}{4} \left(\frac{\beta(1-2\nu)}{\rho c} \right)^2 \Delta\sigma^2. \quad (4)$$

Анализ соотношений (3), (4) позволяет сделать вывод о том, что в классическом случае (соотношения (3)) амплитуда второй гармоники имеет порядок 10^{-6} и практически не может наблюдаться экспериментально, амплитуды первой и второй гармоник не зависят от частоты и являются линейными функциями амплитуды напряжения и квадрата амплитуды напряжения соответственно.

В настоящее время высказываются предположения о том, что эффект термоупругости является существенно нелинейным [1]. Заметный вклад в зависимость температуры от времени вносит процесс изменения упругих свойств материала от температуры. В предположении зависимости упругих модулей материала от температуры (λ_T , μ_T) изменение температуры описывается уравнением

$$\begin{aligned} \text{Log} T_t = & \left(-\frac{\beta(1-2\nu)}{\rho c} + \lambda_T \frac{\sigma_0}{(3\lambda+2\mu)^2 \rho c} + 2\mu_T \frac{\sigma_0(1,5\lambda^2+2\lambda\mu+\mu^2)}{\mu^2(3\lambda+2\mu)^2 \rho c} \right) \times \\ & \times \Delta\sigma\omega\cos\omega t + \left(\frac{\lambda_T}{2(3\lambda+2\mu)^2 \rho c} + \mu_T \frac{(1,5\lambda^2+2\lambda\mu+\mu^2)}{\mu^2(3\lambda+2\mu)^2 \rho c} \right) \Delta\sigma^2\omega\sin 2\omega t. \end{aligned} \quad (5)$$

Анализ поведения амплитуд первой и второй гармоник проводился численно в предположении линейной зависимости упругих свойств материала от температуры. Величины дифференциалов упругих свойств λ_T , μ_T подбирались из условия совпадения спектров зависимости температуры от времени для одного из экспериментов (при амплитуде напряжений 160 МПа и частоте 1 Гц) и использовались для остальных условий экспериментов. При расчетах принимались следующие значения физических констант: $\beta=1\times 10^{-5}$ – коэффициент температурного расширения; $\rho=4300$ кг/м³; $c=500$ Дж/(кг·К); $\nu=0,34$, коэффициенты зависимости упругих свойств от температуры получились соответственно: $\lambda_T=-9,4\times 10^7$ Па/К, $\mu_T=-4,6\times 10^7$ Па/К.

Радиус зоны пластической деформации на поверхности пластины

$$r_p = k \frac{K^2}{\sigma_y^2}, \quad (6)$$

где k – коэффициент, зависящий от вида напряженного состояния и принимаемой модели пластической деформации; σ_y – напряжение течения.

Форму зоны пластической деформации в вершине трещины при квазистатическом растяжении можно описать соотношениями:

с учетом критерия Мизеса

$$r_p(\theta) = \frac{1}{4\pi} \frac{K^2}{\sigma_y^2} (1 + \cos(\theta) + 3\sin^2(\theta)), \quad (7)$$

с учетом критерия Треска–Сен-Венана

$$r_p(\theta) = \frac{1}{2\pi} \frac{K^2}{\sigma_y^2} \cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \left(1 + \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)^2. \quad (8)$$

3. Результаты экспериментального исследования изменения температуры от напряжения

На рис. 3 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 Гц. Данные датчика перемещения, закрепленного на берегах трещины, позволяют утверждать, что раскрытие берегов трещины изменяется синфазно с приложенным напряжением.

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. 4. 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.

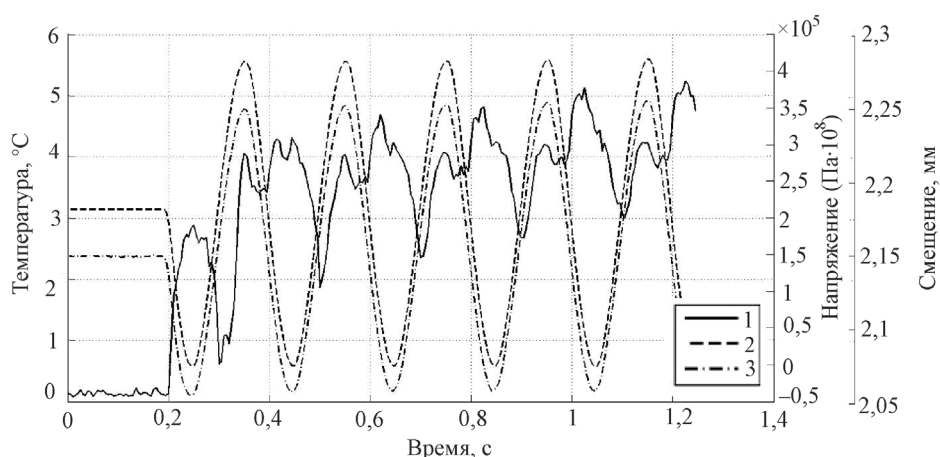


Рис. 3. Изменение максимальной температуры в вершине трещины (1), напряжения (2) и раскрытия трещины (3) в процессе нагружения при амплитуде напряжения 212 МПа, среднем напряжении 212 МПа и частоте 5 Гц

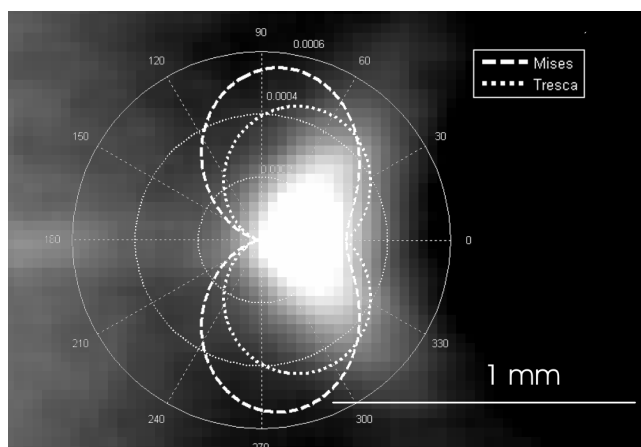


Рис. 4. Форма зоны интенсивной диссипации энергии в вершине усталостной трещины на первом цикле деформирования и зоны пластической деформации, построенных по критериям Мизеса и Треска–Сен-Венана

Метод инфракрасной термографии позволяет с высокой точностью визуализировать зону интенсивной диссипации энергии в вершине усталостной трещины (см. рис. 4). Распределение температуры в вершине трещины в процессе деформирования может отличаться от формы 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. 4 показано сравне-

ние 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 мм, 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.

4. Фрактальные особенности роста усталостной трещины

Рост усталостной трещины описывается законом Пэриса:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m, \quad (9)$$

где da/dN – скорость роста трещины; ΔK – размах коэффициента интенсивности напряжений; C и m константы, зависящие от свойств материала.

В рамках этого соотношения, построены кинетические кривые роста трещины, которые представлены в логарифмических координатах на рис. 5.

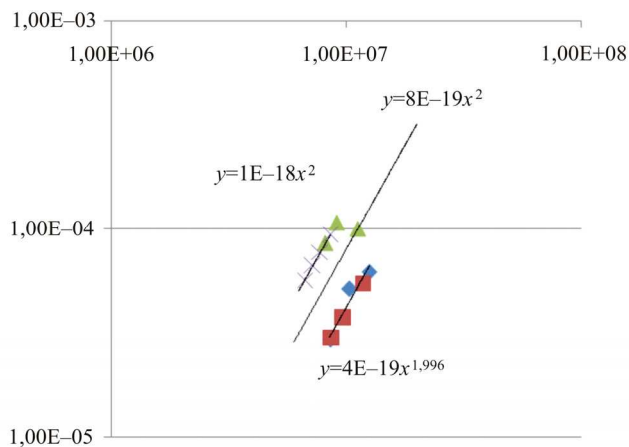


Рис. 5. Кинетические кривые роста усталостных трещин в титановом сплаве ОТ-4

В то время, как коэффициент C зависит от механических свойств материала и условий нагружения, о коэффициенте m ряд ученых имеет свое мнение. Так, в работах [10–13] его связывают с фрактальным рос-

том трещины. В работе [13] коэффициент m представлен следующим образом:

$$m = \frac{2D}{2-D}, \quad 1 < D < 2, \quad (10)$$

где D – фрактальная размерность. В настоящей работе проверено данное соотношение, и для определения фрактальной размерности трещины D использовалась технология RS-анализа. Эта методика позволяет определить значение коэффициента Херста, который связан с фрактальной размерностью по следующей формуле:

$$D = 2 - H. \quad (11)$$

Технология RS-анализа заключается в следующем [14]:

– исследуемый ряд длиной N ($X_k: k = 1, \dots, n$) делится на K непересекающихся блоков,

– далее вычисляются отношения $R(t_i, d)/S(t_i, d)$ для каждого блока, где R – размах накопленных сумм для каждого блока; S – корень из среднеквадратичного отклонения для каждого блока.

$$t_i = \left[\frac{N}{K} \right] (i-1) + 1. \quad (12)$$

Здесь t_i – первые точки блоков, удовлетворяющие неравенству $(t_i - 1) + d \leq N$, где d – количество элементов в блоке.

$$R(t_i, d) = \max\{0, W(t_i, 1), \dots, W(t_i, d)\} - \min\{0, W(t_i, 1), \dots, W(t_i, d)\}, \quad (13)$$

где

$$W(t_i, k) = \sum_{j=1}^k X_{t_i+j-1} - k \left(\frac{1}{d} \sum_{j=1}^d X_{t_i+j-1} \right), \quad k = \overline{1, d}. \quad (14)$$

Затем находится значение дисперсии $S^2(t_i, d)$ для каждого блока, т.е. для $X_{t_i}, \dots, X_{t_i+d-1}$. Отсюда для каждого блока вычисляются значения R/S ;

– после этого изменяем количество элементов d в блоке, т.е. $d_{i+1} = m \cdot d_i$, где $m > 1$; для получения достоверного результата начальное количество элементов в блоке d_0 берется равным 10, увеличение d ведется до тех пор, пока количество блоков будет не менее 6. Для каждого d повторяется процедура нахождения отношения $R(t_i, d)/S(t_i, d)$;

– используя полученные результаты, можно строить график зависимости $\log(R(t_i, d)/S(t_i, d))$ относительно $\log d$ (рис. 6);

– применяется метод наименьших квадратов для определения углового коэффициента прямой, проходящей максимально близко к полученной зависимости, угловой коэффициент для данной прямой будет определять показатель Херста.

Исследуемые профили были получены с помощью цифрового интерферометра-профилометра New View, который позволяет получать 3-мерные картины профилей поверхности с точностью по горизонтали 0,5 мкм и по вертикали 1 нм. Из данных 3-мерных профилей вырезались 1-мерные, которые впоследствии анализировались R/S-методом. В результате вычислений получено следующее значение фрактальной размерности: $D = 1,01 \pm 0,01$, которое при подстановке в формулу (10) дает близкий к экспериментальному показатель t .

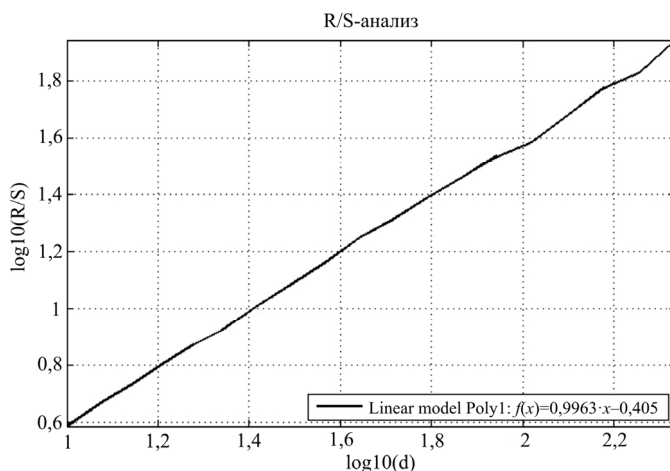


Рис. 6. Зависимость R/S от количества элементов в блоке d в логарифмических координатах

Заключение

Получены соотношения, описывающие изменение температуры на поверхности образца в процессе одноосного циклического деформирования с учетом линейного и нелинейного термоупругого эффекта. Исследование процессов изменения температуры при циклическом деформировании в титановом сплаве ОТ-4 на гладких образцах показало, что обратимое изменение температуры при упругом деформировании может достигать одного градуса

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.

Экспериментально показано, что зона пластической деформации не совпадает с предсказаниями линейной механики разрушения, а максимум тепловыделения достигается на нисходящей ветви нагружения.

Рассчитана фрактальная размерность профиля трещины, которая может быть представлена в кинетическом уравнении для роста усталостной трещины и согласуется с экспериментальными данными для сплава титана ОТ-4

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 12-01-31145 мол_а).

Библиографический список

1. Вавилов В.П. Динамическая тепловая томография (обзор) // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2006. – Т. 72, № 3. – С. 26–36.
2. Fatigue crack initiation and growth in a 35CrMo4 steel investigated by infrared thermography / O. Plekhov, T. Palin-Luc, O. Naimark, S. Uvarov, N. Saintier // Fatigue and fracture of engineering materials and structures. – 2005. – Vol. 28, iss. 1. – P. 169–178
3. Theoretical analysis, infrared and structural investigation of energy dissipation in metals under quasi-static and cyclic loading / O. Plekhov, N. Saintier, T. Palin-Luc, S. Uvarov, O. Naimark // Material Science and Engineering A. – 2007. – Vol. 462, no. 1. – P. 367–370.
4. Плехов О.А. Экспериментальное исследование термодинамики пластического деформирования методом инфракрасной термографии // ЖТФ. – 2011. – Т. 81, вып. 2. – С. 144–146.
5. Oliferuk W., Maj M., Raniecki B. Experimental analysis of energy storage rate components during tensile deformation of polycrystals // Materials Science and Engineering A. – 2004. – Vol. 374. – P. 77–81.

6. Плехов О.А., Santier N., Наймарк О.Б. Экспериментальное исследование накопления и диссипации энергии при упруго пластическом переходе // ЖТФ. – 2007. – Т. 77. – Вып. 9 – С. 1236–1238.

7. Экспериментальное исследование генерации тепла в вершине усталостной трещины / А.И. Терехина, М.В. Банников, О.А. Плехов, Э.В. Плехова // Письма в ЖТФ. – 2012. – Т. 38. – Вып. 16.

8. Экспериментальное исследование аномалий диссипации энергии в нанокрокристаллическом титане при циклическом нагружении / О. Плехов, О. Наймарк, И. Семенова, Р. Валиев [и др.] // ПЖТФ. – 2008. – Т. 34, вып. 13. – С. 33–40.

9. Исследование особенностей диссипации и накопления энергии в нанокристаллическом титане при квазистатическом и динамическом нагружении / О.А. Плехов, В.В. Чудинов, В.А. Леонтьев, О.Б. Наймарк // Вычислительная механика сплошных сред. – 2008. – Т. 1, № 4. – С. 69–78.

10. Walker K. The effect of stress ratio during crack propagation and fatigue for 2024-T3 and 7075-T6 Aluminium // Effects of environments and complex load history on fatigue life. ASTM STP 462. – Philadelphia, PA, 1970. – P. 1–14.

11. Carpinteri A., Paggi M. Self-similarity and crack growth instability in the correlation between the Paris' constants // Eng. fracture mech. – 2007. – No. 74. – P. 1041–1053.

12. Wnuk M.P., Yavari A. On estimation stress intensity factors and modulus of cohesion for fractal cracks // Eng. fracture mech. – 2003. – No. 70. – P. 1659–1674.

13. Paggi M., Carpinteri A. Fractal and multifractal approaches for the analysis of crack-size dependent scaling laws in fatigue // Chaos, Solitons and Fractals. – 2009. – No. 40. – P. 1136–1145.

14. Rose O. Estimation of the Hurst Parameter of Long-Range Dependent Time Series. Report. No. 137. February 1996. – Institute of Computer Science, University of Wurzburg, Germany, 1996.

References

1. Vavilov V.P. Dinamicheskaya teplovaya tomografiya (obzor) [Dynamic thermal tomography (Review)]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*. 2006, vol. 72, no. 3, pp. 26–36.

2. Plekhov O., Palin-Luc T., Naimark O., Uvarov S., Saintier N. Fatigue crack initiation and growth in a 35CrMo4 steel investigated by infrared thermography. *Fatigue and fracture of engineering materials and structures*, 2005, vol. 28, iss. 1, pp. 169-178

3. Plekhov O., Saintier N., Palin-Luc T., Uvarov S., Naimark O. Theoretical analysis, infrared and structural investigation of energy dissipation in metals under quasi-static and cyclic loading. *Material Science and Engineering A*, 2007, vol. 462, no. 1, pp. 367-370.

4. Plekhov O.A. Experimental study of thermodynamics of plastic deformation by infrared thermography. *Technical Physics*, February 2011, vol. 56, iss. 2, pp. 301-304.

5. Oliferuk W., Maj M., Raniecki B. Experimental analysis of energy storage rate components during tensile deformation of polycrystals. *Materials Science and Engineering A*, 2004, vol. 374, pp. 77-81.

6. Plekhov O.A., Saintier N., Naimark O.B. Experimentalnoe issledovanie nakopleniya i dissipacii energii pri uprugom plasticheskom perehode [Experimental study of the accumulation and dissipation of energy in elastic-plastic transition]. *Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki*, 2007, vol. 77, iss. 9, pp. 1236-1238.

7. Terexhina A.,I., Bannikov M.V., Plekhov O.A., Plekhova E.V. Experimental study of heat generation at the vertex of a fatigue crack. *Technical Physics Letters*, August 2012, vol. 38, iss. 8, pp. 736-738

8. Plekhov O.A., Naimark O.B., Valiev R.Z., Semenova I.P., Saintier N., Palin-Luc T. Experimental investigations of anomalous energy absorption in nanocrystalline titanium under cyclic loading conditions. *Technical Physics Letters*, July 2008, vol. 34, iss. 7, pp. 557-560.

9. Plekhov O., Chudinov V., Leont'ev V., Naimark O., Experimental investigations of the laws of energy dissipation during dynamic deformation of nanocrystalline titanium. *Technical Physics Letters*, January 2009, vol. 35, iss. 1, pp 92-95

10. Walker K. The effect of stress ratio during crack propagation and fatigue for 2024-T3 and 7075-T6 Aluminium. In: Effects of environments and complex and complex load history on fatigue life. ASTM STP 462. Philadelphia, PA; (1970), pp. 1-14.

11. Carpinteri A., Paggi M. Self-similarity and crack growth instability in the correlation between the Paris' constants. *Eng Fracture Mech.*, 2007, no. 74, pp. 1041-1053.

12. Wnuk M.P., Yavari A. On estimation stress intensity factors and modulus of cohesion for fractal cracks. *Eng. fracture mech.*, 2003, 70, pp. 1659-1674.

13. Paggi M., Carpinteri A., Fractal and multifractal approaches for the analysis of crack-size dependent scaling laws in fatigue. *Chaos, Solitons and Fractals*, 2009, no. 40, pp. 1136-1145.

14. Rose O. Estimation of the Hurst Parameter of Long-Range Dependent Time Series. Report No. 137. February 1996. Institute of Computer Science, University of Wurzburg, Germany.

Об авторах

Банников Михаил Владимирович (Пермь, Россия) – аспирант лаборатории физических основ прочности Института механики сплошных сред УрО РАН (614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1, e-mail: mbannikov@icmm.ru).

Федорова Анастасия Юрьевна (Пермь, Россия) – аспирант лаборатории физических основ прочности Института механики сплошных сред УрО РАН (614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1, e-mail: fedorova@icmm.ru).

Терехина Алена Игоревна (Пермь, Россия) – студентка Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: tai_mm_90@mail.ru).

Плехов Олег Анатольевич (Пермь, Россия) – доктор физико-математических наук Института механики сплошных сред УрО РАН (614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1, e-mail: roa@icmm.ru).

About the authors

Bannikov Mikhail Vladimirovich (Perm, Russian Federation) – postgraduate student in laboratory of physical foundations of strength, Institute of Continuous Media Mechanics, Ural Branch of Russian Academy of Sciences (1, Akademik Korolev st., 614013, Perm, Russian Federation, e-mail: mbannikov@icmm.ru).

Fedorova Anastasia Yurievna (Perm, Russian Federation) – post-graduate student in laboratory of physical foundations of strength, Institute of Continuous Media Mechanics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (1, Akademik Korolev st., 614013, Perm, Russian Federation, e-mail: fedorova@icmm.ru).

Terekhina Alyona Igorevna (Perm, Russian Federation) – student, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., 614990, Perm, Russian Federation, e-mail: tai_mm_90@mail.ru).

Plekhov Oleg Anatol'evich (Perm, Russian Federation) – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Institute of Continuous Media Mechanics, Ural Branch of Russian Academy of Sciences (1, Akademik Korolev st., 614013, Perm, Russian Federation, e-mail: poa@icmm.ru).

Получено 28.02.13