

УДК 536.55

А.Ю. Федорова, М.В. Банников, О.А. Плехов

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

**ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ИНФРАКРАСНОЙ ТЕРМОГРАФИИ
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЛИНЕЙНОЙ
МЕХАНИКИ ТРЕЩИН**

В работе экспериментально исследуется генерация тепла в вершине усталостной трещины при циклическом нагружении методом инфракрасной термографии. Проведена серия экспериментов на образцах с предварительно выращенной усталостной трещиной. Исследовано пространственное и временное изменение температуры в вершине трещины. Предложен способ математической обработки экспериментальных данных для расчета мощности источника тепла в зоне пластической деформации в вершине трещины, включающий блок, осуществляющий компенсацию относительного движения образца и камеры. В результате определены значение J-интеграла и коэффициента интенсивности напряжения в вершине трещины в случае развития значительной области пластической деформации.

Ключевые слова: усталостная трещина, диссипация тепла, инфракрасная термография.

A.Yu. Fedorova, M.V. Bannikov, O.A. Plekhov

Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, Perm, Russian Federation

**INFRARED THERMOGRAPHY APPLICATION TO DETERMINE
THE LINEAR MECHANICS CRACKS PARAMETERS**

Heat generation in fatigue crack tip under cycling load was experimentally investigated in this work by infrared thermography. The set of experiments was carried out using the samples with pre-grown fatigue crack. The spatial and time temperature evolution at the crack tip was studied. A mathematical algorithm of experimental data was realized to obtain heat power of source caused by the plastic deformation region at crack tip. The algorithm includes the part of relative motion compensation. As a result of the presented work, J-integral and stress intensity factor was obtained for cracks with pronounced the plastic zone.

Keywords: fatigue crack, heat dissipation, infrared thermography.

Введение

В последние десятилетия многими авторами активно исследуются процессы диссипации тепла, вызванные эволюцией структуры материала при циклическом деформировании материалов. В результате на

сегодняшний момент достоверно известно, что в условиях циклического деформирования усталостные трещины зарождаются в местах локализации пластической деформации на поверхности материала [1]. Процессы локализации деформации сопровождаются интенсивным выделением тепла, что делает возможным их раннее обнаружение методами инфракрасной термографии [2].

Универсальность метода инфракрасной термографии позволяет применять его при проведении механических испытаний с целью получения детальной информации о процессе зарождения и распространения усталостных трещин [3–5].

Особенно важным является исследование процесса диссипации тепла в вершине трещины, что позволяет разрабатывать методы определения параметров линейной механики разрушения в широком диапазоне интенсивностей напряжений. Сложность данной задачи определяется необходимостью экспериментального исследования процессов локализации пластической деформации в области сложной геометрии и анализом решений нелинейных задач теории пластичности.

Целью данной работы являлась разработка экспериментальной методики измерения поля температур в вершине трещины с высоким температурным и пространственным разрешением, разработка математических методов обработки экспериментальных данных, позволяющих определить величину коэффициента интенсивности напряжений и J -интеграла. В работе экспериментально получены значения теплоты, обусловленной пластической деформацией материала, и исследованы особенности распределения температур в вершине трещины.

1. Материалы и условия эксперимента

Экспериментальное исследование процесса изменения температуры в вершине усталостной трещины было проведено на плоских образцах титанового сплава ВТ-6. Для изучения тепловых эффектов в вершине трещины образцы были предварительно ослаблены отверстиями. Геометрия образцов представлена на рис. 1. Механические испытания проводились на 100 кН сервогидравлической машине Ви-00-100. Условия испытаний соответствуют условиям эксперимента, описанным в [6]. В эксперименте использовалась инфракрасная камера CEDIP Silver 450M. Спектральный диапазон камеры 3–5 мкм. Максимальный размер кадра 320×256 точек, пространственная чувствитель-

ность составляет 10^{-4} м. Минимальная погрешность измерения температуры 25 мК при температуре образца 300 К.

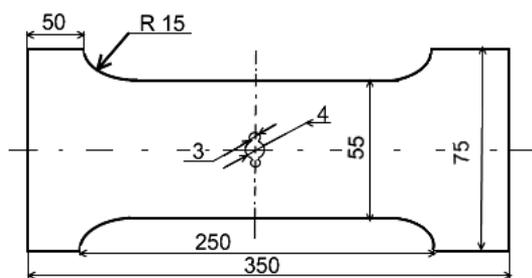


Рис. 1. Геометрия исследуемых образцов

2. Обработка экспериментальных данных

В связи с наличием относительного перемещения образца и объектива инфракрасной камеры при циклических испытаниях существует проблема компенсации движения с целью дальнейшего получения корректных данных температуры в заданной точке образца, а именно в вершине трещины. Компенсация относительного перемещения может быть выполнена на основе следующего алгоритма. Для получения неподвижного инфракрасного изображения ко всем кадрам фильма было применено дискретное Фурье-преобразование сигнала температуры:

$$FrameNext(k_x, k_y) = \int_{-\infty}^{\infty} dx \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_y y)} frameNext(x, y) dy, \quad (1)$$

$$Frame1(k_x, k_y) = \int_{-\infty}^{\infty} dx \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k_x x + k_y y)} frame1(x, y) dy, \quad (2)$$

$$frameNext(x, y) = \int \frac{dk_x dk_y}{(2\pi)^2} e^{-i\vec{k}\vec{x}} (FrameNext(k_x, k_y) Frame1(k_x, k_y)), \quad (3)$$

где в качестве ядра использовался пространственно и температурно не изменяющийся на протяжении всего фильма фрагмент изображения ($frame1(x, y)$) с первого кадра фильма (рис. 2) («опорный фрагмент»).

Выражение (1) представляет собой прямое Фурье-преобразование участка изображения ($FrameNext(x, y)$) каждого последующего кадра, выражение (2) определяет Фурье-преобразование участка с первого кадра фильма, выражение (3) определяет положение выбранного фрагмента на последующих кадрах фильма.

Зависимость координаты «опорного фрагмента» от времени определяет абсолютное значение перемещения каждой точки изображения и позволяет провести компенсацию движения. В результате работы программы были получены неподвижные инфракрасные изображения образца с изменяющимся с течением времени съемки значением температуры.

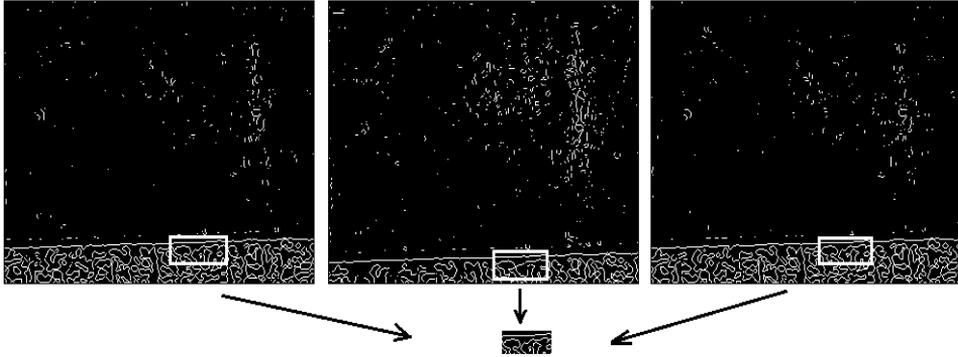


Рис. 2. Осуществление алгоритма компенсации движения по контурному изображению температуры

Для увеличения точности данных и исключения влияния случайных колебаний окружающей температуры пространственно неподвижный сигнал температуры образца обрабатывался на основе двумерного дискретного преобразования Фурье со стандартным ядром Гаусса. Выражение для определения температуры имело вид

$$T(x, y) = \int \frac{dk_x dk_y}{(2\pi)^2} e^{-i\vec{k}\vec{x}} \left(\widehat{T}(k_x, k_y) \widehat{f}(k_x, k_y) \right), \quad (4)$$

где $f(x, y) = \frac{v^2}{\pi} e^{-v^2(x^2+y^2)}$ – ядро Гаусса; $\widehat{f}(k_x, k_y)$ – прямое Фурье-преобразование ядра Гаусса; $\widehat{T}(k_x, k_y)$ – прямое Фурье-преобразование температуры.

Исходное распределение температуры и распределение температуры, полученное в результате использования соотношения (4), представлены на рис. 3.

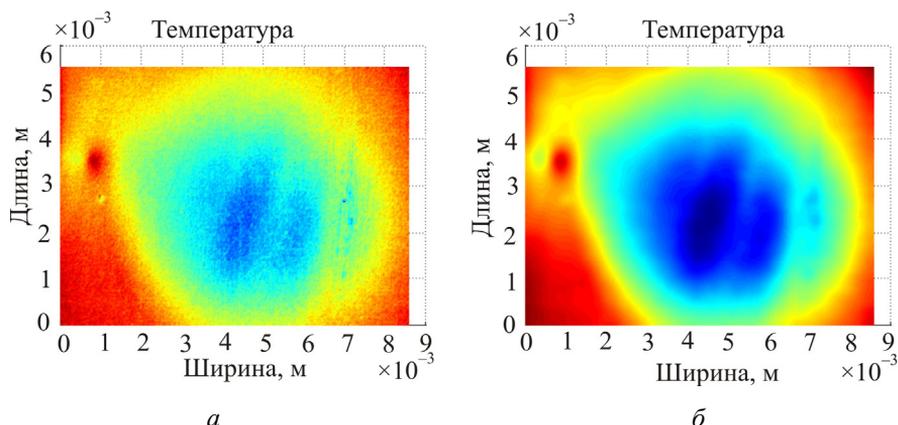


Рис. 3. Поле температур до (а) и после обработки (б)

В процессе обработки данных для исключения влияния инфракрасного излучения со стороны объектива камеры на определяемое поле температур образца из всего фильма вычитался первый кадр и формировалась трехмерная матрица данных (поверхность температур на каждом кадре фильма).

На рис. 4 представлено инфракрасное изображение приращения температуры на поверхности образца при распространении трещины после осуществления всех этапов обработки сигнала.

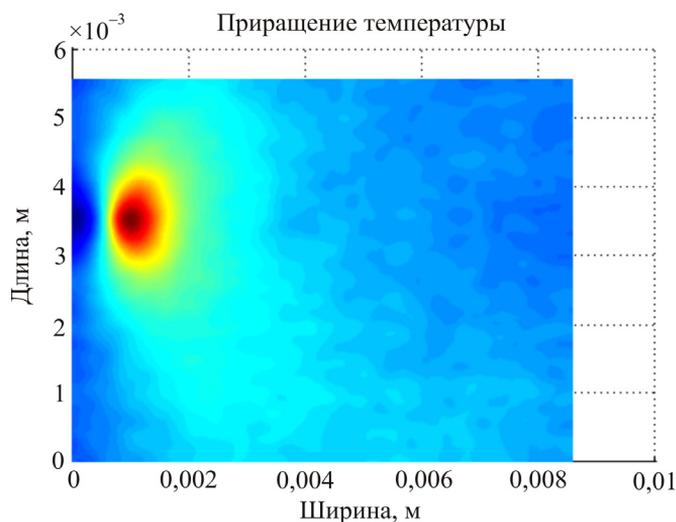


Рис. 4. Поле температур после всех этапов обработки сигнала

3. Определение количества теплоты в вершине трещины, выделившегося в процессе пластической деформации

Значение удельной мощности источника тепла в вершине трещины может быть определено при помощи следующего соотношения [7]:

$$\rho c \left(\dot{\theta} + \frac{\theta}{\tau} \right) - k \Delta \theta = s, \quad (5)$$

где θ – температура; ρ – плотность (4505 кг/м³); c – теплоемкость (540 Дж/(кг·К)); k – теплопроводность (18,85 Вт/(м·К)); s – искомая мощность источника тепла (Вт/м³); τ – константа, связанная с потерями тепла в результате теплообмена с окружающей средой (10³ Дж/(м³·К)).

Полученное значение удельной мощности источника тепла интегрировалось по времени, в течение которого наблюдалась зона пластической деформации. В результате был построен профиль удельного значения теплоты, выделяющейся за время пластической деформации (рис. 5).

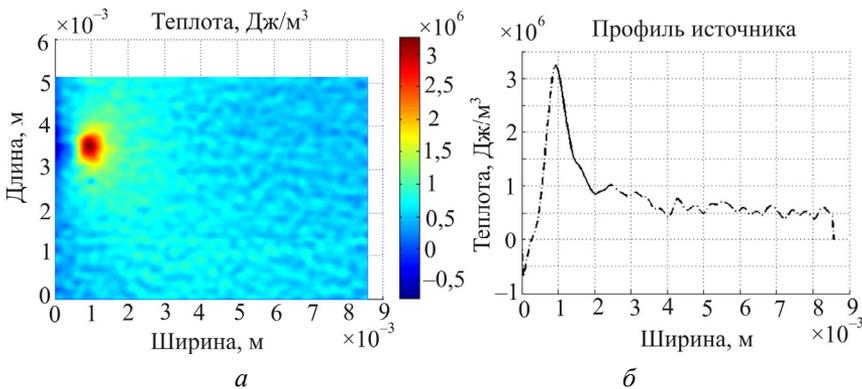


Рис. 5. Удельная теплота (Дж/м³), выделившаяся за время пластической деформации (а), и ее профиль в области вершины трещины (б)

Разработанный алгоритм позволяет провести исследование эволюции процесса диссипации тепла в вершине трещины. На рис. 6 представлен график зависимости приращения температур, теплоты и напряжений от 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. При уменьшении напряжения в вершине трещины тепловыделение возрастает и температура достигает максимума уже при падающем напряжении. Затем, в начале следующего цикла, температура падает за счет термоупругого эффекта и процесс повторяется. Анализ данных, представленных на рис. 6, позволяет утверждать, что максимум приложенных напряжений и максимум интенсивности тепловыделения в вершине усталостной трещины не совпадают во времени. Наблюдаемый эффект показывает, что при циклической деформации существует запаздывание температурной реакции образца на изменяющееся нагружение.

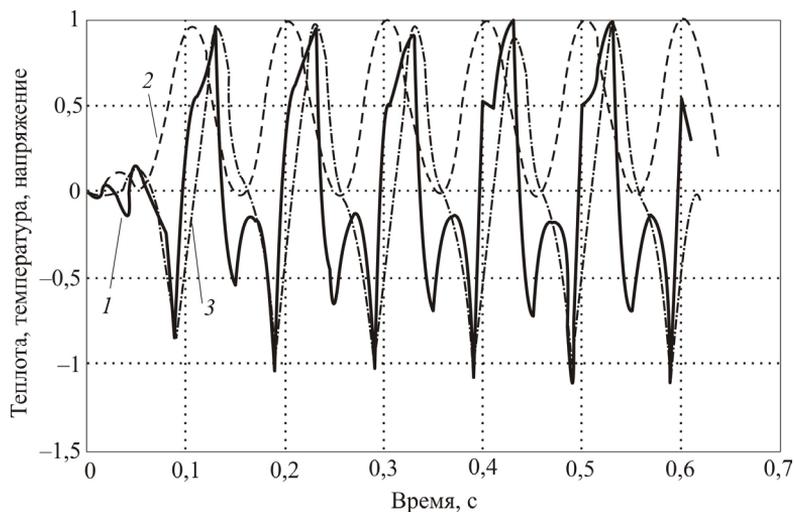


Рис. 6. Изменение теплоты (1), напряжения (2) и приращения температуры в вершине трещины (3) в процессе нагружения

Полученные данные о скорости диссипации тепла в вершине трещины позволяют разработать метод определения значений J -интеграла и коэффициента интенсивности напряжения, а также предложить критерий критического состояния материала, основанный на экспериментально наблюдаемом размере зоны пластической деформации.

Как известно из HRR-решения, энергия, выделившаяся в вершине трещины W_p [8], имеет сингулярность $1/r$ и пропорциональна значению J -интеграла:

$$W_p = m_1 \frac{J(x)}{r(x)},$$

где $r(x)$ – расстояние от вершины трещины; m_1 – коэффициент, связанный со свойствами материала образца и видом нагружения; $J(x)$ – энергетический J -интеграл.

Для простоты на первоначальном этапе предположим, что вся энергия, выделившаяся в вершине трещины, расходуется на генерацию тепла. Тогда, исходя из экспериментально полученных данных, можно рассчитать значение J -интеграла и коэффициента интенсивности напряжений по формулам

$$J(x) = \frac{Qr(x)}{m_1}, \quad (6)$$

$$K = \sqrt{\frac{EJ(x)}{1-\nu^2}}, \quad (7)$$

где $\nu = 0,32$ – коэффициент Пуассона; $E = 220$ ГПа – модуль Юнга.

$$K_{Theor} = P \sqrt{\pi l \sec\left(\frac{\alpha\pi}{2}\right)}, \quad (8)$$

где P – растягивающая сила; l – полудлина трещины; $\alpha = 2l/h$, где h – ширина образца (м).

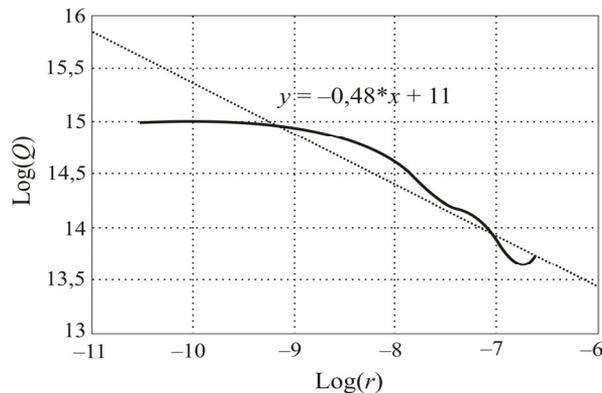


Рис. 7. Зависимость теплоты от расстояния в области пластической деформации в логарифмических координатах (1) и линейная аппроксимация (2)

На рис. 7 в логарифмических координатах представлена зависимость теплоты от расстояния, рассчитанного от вершины трещины. Зависимость имеет наклон $1/\sqrt{r}$, отличающийся от теоретически предсказанного наклона $1/r$ (соотношение (6)).

Значения J -интеграла, рассчитанные по формулам (6)–(8), и коэффициента интенсивности напряжения представлены на рис. 8, 9.

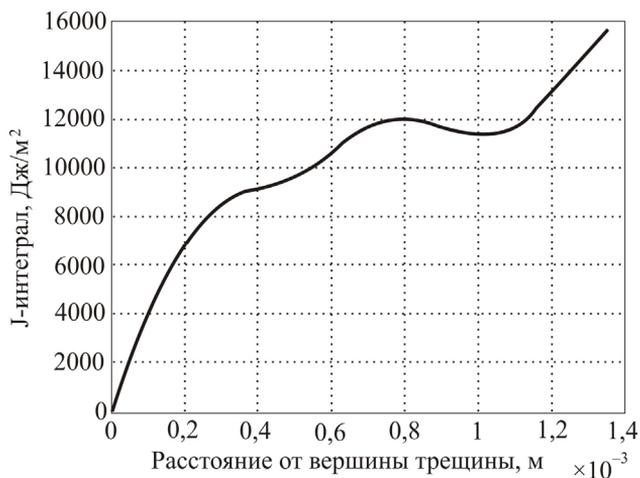


Рис. 8. Зависимость J -интеграла от расстояния от вершины трещины

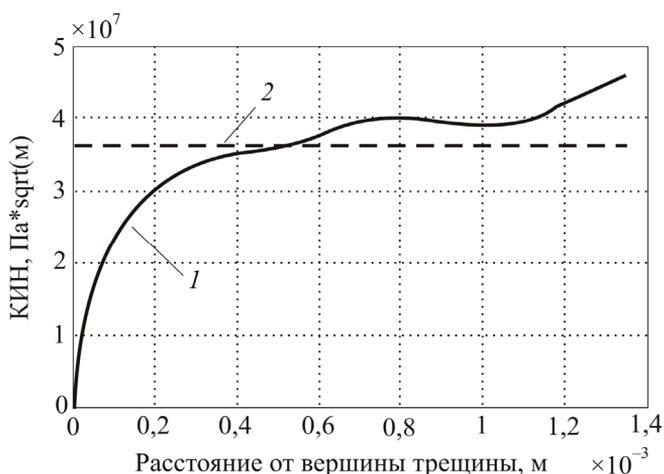


Рис. 9. Зависимость коэффициента интенсивности напряжения от расстояния от вершины трещины; 1 – теоретический КИН, 2 – экспериментальный КИН

Анализ данных представленных на рис. 8, 9 позволяет утверждать, что среднее значение экспериментального КИН, полученного по значению теплоты, на расстоянии от 0,2 до 1,2 мм приблизительно равно теоретическому значению КИН, рассчитанного исходя из геометрических характеристик образца и длины трещины. Это позволяет использовать соотношения (6)–(8) для определения критического состояния трещины с выраженной зоной пластической деформации.

Заключение

В представленной работе экспериментально исследованы эффекты диссипации тепла в вершине трещины. В процессе обработки данных реализованы оригинальные алгоритмы компенсации движения образца при циклическом деформировании, а также найдены ключевые характеристики, связанные с процессами тепловыделения в вершине трещины, которые позволили предложить методику определения текущих значений J -интеграла и коэффициента интенсивности напряжений по данным инфракрасной термографии.

Область применимости данной методики существенно шире ранее предложенных методов определения коэффициента интенсивности напряжений, основанных на применении соотношений линейной термоупругости. Совокупность разработанных математических алгоритмов и методика проведения эксперимента существенно повышает точность получаемых результатов по сравнению с ранее опубликованными работами [8] и позволяет надеяться на разработку инженерных методов анализа текущего состояния трещин в реальных конструкциях в широком диапазоне приложенных напряжений.

Библиографический список

1. Шанявский А.А. Безопасное усталостное разрушение элементов авиаконструкций. Синергетика в инженерных приложениях. – Уфа, 2003. – 803 с.
2. Вавилов В.П. Динамическая тепловая томография // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2006. – Т. 72, № 3. – С. 26–36.
3. Luong M.P. Infrared thermographics scanning of fatigue in metals // Nuclear Engineering and Design. – 1995. – No. 158. – P. 363–376.
4. 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.

5. 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.

6. Банников М.В., Терехина А.И., Плехов О.А. Экспериментальное исследование особенностей процесса генерации тепла в вершине усталостной трещины // *Вестник ПГТУ. Механика*. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2011. – № 2. – С. 14–27.

7. Плехов О. А. Экспериментальное исследование термодинамики пластического деформирования методом инфракрасной термографии // *Журнал технической физики*. – 2011. – Т. 81, Вып. 2. – С. 143–146.

8. Nagahisa Ogasawara, Masaki Shiratori. Application of infrared thermography to fracture mechanics // *SPIE Digital Library*. Vol. 3056. 0277-786X/97, available at. – URL: <http://spiedl.org/terms>.

References

1. Shanyavskiy A.A. Bezopasnoe ustalostnoe razrushenie elementov aviakonstrukcii. Sinergetika v inzhenernih prilozheniyah [Safe fatigue damage of aircraft construction elements. Synergetics in engineering applications]. Ufa, 2003. 803 p.

2. Vavilov V.P. Dinamicheskaya teplovaya tomografiya (obzor) [Dynamic heat tomography (review)]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2006, Vol. 72, no. 3, pp. 26–36.

3. Luong M.P. Infrared thermographics scanning of fatigue in metals, *Nuclear Engineering and Design*. 1995. No. 158. P. 363–376.

4. 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*. Vol. 28, Is. 1, 2005, pp. 169–178.

5. 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*. 2007, Vol. 462, no. 1, pp. 367–370.

6. Bannikov M., Terekhina A., Plekhov O. Experimental investigation of features of the heat generation process in fatigue crack tip [Experimental-

noe issledovanie osobennostey generacii tepla v vershine ustalostnoy treschiny]. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta. Mehanika*, 2011, 2, pp. 14–27.

7. Plekhov O. Experimentalnoe issledovanie termodinamiki plasticheskogo deformirovaniya metodom infrakrasnoy termografii [Experimental investigation of thermodynamics of the plastic deformation by infrared thermography]. *Zhurnal tehniceskoy fiziki*, 2011, 81 – 2, 143–146 p.

8. Nagahisa Ogasawara, Masaki Shiratori. Application of infrared thermography to fracture mechanics, *SPIE Digital Library*. Vol. 3056. 0277-786X/97, available at: <http://spiedl.org/terms>.

Об авторах

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

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

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

About the authors

Plekhov Oleg Anatolyevich (Perm, Russian Federation) – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Senior Research Fellow ICMM UB RAS (614013, 1, Acad. Koroleva street, Perm, Russian Federation, e-mail: roa@icmm.ru).

Fedorova Anastasia Yuryevna (Perm, Russian Federation) – Ph. D. student ICMM UB RAS ((614013, 1, Acad. Koroleva street, Perm, Russian Federation, e-mail: fedorova@icmm.ru).

Bannikov Michael Vladimirovich (Perm, Russian Federation) – Ph. D. student ICMM UB RAS (614013, 1, Acad. Koroleva street, Perm, Russian Federation, e-mail: mbannikov@icmm.ru).

Получено 15.05.2012