

УДК 536.55

**А.И. Терехина², А.Ю. Федорова¹,
М.В. Банников¹, О.А. Плехов^{1,2}**

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОЦЕНКИ ПРЕДЕЛА ВЫНОСЛИВОСТИ МАТЕРИАЛА ПО ДАННЫМ ИНФРАКРАСНОЙ ТЕРМОГРАФИИ

Представлены результаты экспериментального исследования процессов диссипации энергии при квазистатическом нагружении титанового сплава ВТ6 с использованием данных инфракрасной термографии. Методика инфракрасного сканирования, изначально эффективно развивающаяся как метод неразрушающего контроля, основана на измерении интенсивности электромагнитного излучения материала в инфракрасном диапазоне длин волн. Инфракрасная термография позволяет регистрировать изменение температуры поверхности образца, рассчитывать мощность внутренних источников диссипации энергии и разрабатывать методики оценки перехода материала в критическое состояние. В данной работе на основе метода инфракрасной термографии было показано, что отклонение от линейной зависимости температуры от напряжения, соответствующего классической теории термоупругости, наблюдается при напряжениях существенно ниже предела пропорциональности материала. На основании полученных данных была предложена методика определения порога диссипации энергии при квазистатическом деформировании и высказано предположение о связи этого напряжения с пределом усталости материала. Предел усталости, рассчитанный по данным инфракрасной термографии при квазистатическом нагружении образцов, сравнивался со справочным значением предела усталости, полученным из циклических испытаний. Было показано, что предлагаемый метод с достаточной точностью может использоваться для оценки предела усталости материала по данным температурного поля поверхности образца при квазистатических испытаниях. Анализ полученных данных позволяет сделать вывод о том, что достигнутая в настоящее время точность измерения температуры делает возможной регистрацию диссипации тепла, вызванную процессами микропластичности и, как следствие, позволяет разрабатывать новые методы прогнозирования поведения материала при длительных (циклических) воздействиях.

Ключевые слова: инфракрасная термография, микропластичность металлов, предел усталости.

**A.I. Terekhina², A.Yu. Fedorova¹,
M.V. Bannikov¹, O.A. Plekhov¹**

¹Institute of continuous media mechanics Ural Branch of RAS,
Perm, Russian Federation

²Perm National Research Polytechnic University, Perm,
Russian Federation

A DEVELOPMENT OF A METHOD FOR ESTIMATION OF THE ENDURANCE LIMIT OF THE MATERIAL USING INFRARED THERMOGRAPHY DATA

The experimental study of energy dissipation processes in titanium alloy Ti-6Al-4V under the quasi-static tension was carried out based on infrared thermography technique. The infrared scanning technique initially developed as method of nondestructive testing is based on measuring the intensity of electromagnetic radiation of material in infrared wavelength. Infrared thermography allows one to detect temperature changes on the surface of the sample, to calculate the power dissipation energy of internal sources and to develop a methodology for assessing the critical state transition of the material. In this paper, it has been shown that the deviation from the linear temperature evolution on the applied stress, corresponding to the classical theory of thermoelasticity, can be observed for stress significantly below the yield stress of the material. Based on obtained data the technique of determining the threshold of energy dissipation for quasi-static deformation was proposed and connection between this tension and the fatigue limit of the material was suggested. Fatigue limit calculated according to the infrared thermography for quasi-static loading of the samples was compared with the reference value of the fatigue limit obtained from cyclic tests. It has been shown with sufficient accuracy that the proposed method could be used to estimate the fatigue limit of the material by the temperature field of the sample surface in quasi-static tests.

The analysis of the experimental data allows us to conclude that the temperature measurement accuracy achieved at the present time allows one to register the heat dissipation caused by the microplasticity processes and, as a consequence, to develop a new method for forecast the material behaviour under long (cyclic) loading.

Key words: infrared thermography, microplasticity, endurance limit.

Введение

В последние десятилетия многими авторами активно исследуются процессы диссипации тепла, вызванные эволюцией структуры материала при его деформировании. Методика инфракрасного сканирования, основанная на измерении интенсивности электромагнитного излучения материала в инфракрасном диапазоне, позволяет регистрировать изменение температуры поверхности образца, рассчитывать мощность внутренних источников диссипации энергии и разрабатывать методики оценки перехода материала в критическое состояние [1].

Универсальность метода инфракрасной термографии, изначально эффективно развивающегося как метод неразрушающего контроля, позволяет активно применять его при проведении механических испытаний в лабораторных условиях для исследования закономерностей преобразования и накопления энергии в процессе деформирования [2–4].

Целью данной работы являлось экспериментальное исследование процессов диссипации энергии в титановом сплаве ВТ6 при квазистатическом растяжении с целью определения момента начала активации процессов микропластичности и оценки усталостных характеристик материала. В основу работы положена гипотеза о том, что процессы микропластичности, играющие определяющую роль в условиях усталостного разрушения материала [5], могут приводить к существенному отклонению термоупругого отклика материала при квазистатическом растяжении в упругой области. Аналогичное предположение было высказано в работе [6]. В данном исследовании условия эксперимента были существенно изменены с целью приближения процесса деформирования к адиабатическим условиям и, как следствие, повышения точности определения эволюции температуры образца.

В результате была предложена методика определения порога диссипации энергии при квазистатическом деформировании и высказано предположение о связи этого напряжения с пределом усталости материала. Предложенная методика имеет ряд преимуществ перед стандартными способами определения предела усталости материала, например по данным механических испытаний на изгиб, кручение или растяжение-сжатие.

Несмотря на существующую погрешность в точности определения предела усталости, методику можно использовать в качестве экспресс-оценки данной величины без проведения длительных циклических испытаний.

1. Материалы и условия эксперимента

Экспериментальное исследование эволюции температуры было проведено на плоских образцах титанового сплава ВТ6 при квазистатическом одноосном растяжении. Механические испытания проводились на 100 кН сервогидравлической машине Vi-00-100 при комнатной температуре (20 °С). Исследуемые образцы изготавливались из листа толщиной 3 мм. Геометрия образцов соответствовала ГОСТ 1497–84, размеры рабочей области образца 3×20×100 мм (рис. 1).

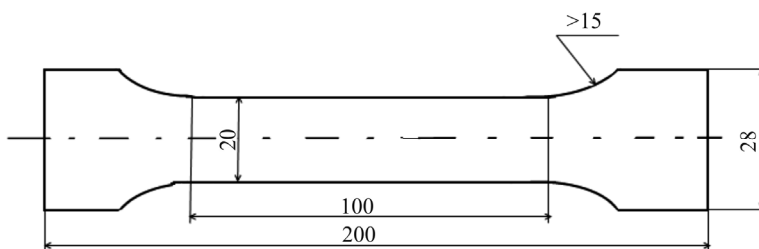


Рис. 1. Геометрия исследуемых образцов (все размеры указаны в миллиметрах)

Зависимость напряжения от деформации при квазистатическом деформировании со скоростью деформации 10^{-4} с^{-1} представлена на рис. 2. Анализ данных (см. рис. 2) позволяет определить механические характеристики материала: модуль Юнга ($E = 64 \text{ ГПа}$), предел текучести ($\sigma_{0,2} = 683 \text{ МПа}$), предел прочности ($\sigma_B = 790 \text{ МПа}$).

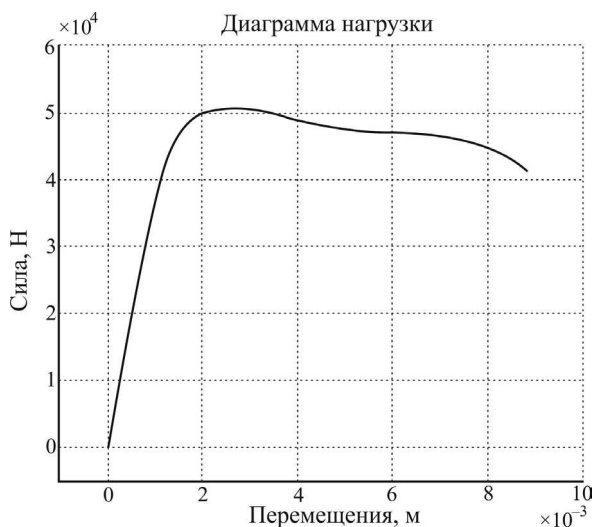


Рис. 2. Зависимость усилия, приложенного к образцу, от перемещения захватов

Для исследования процесса пластического течения при малых напряжениях и связанных с ним эффектов диссипации энергии была предложена следующая программа эксперимента. Образец подвергался предварительной нагрузке и выдерживался в течение трех секунд для установления термодинамического равновесия и выбора возможных люфтов нагружающей системы на начальной стадии деформирования.

Затем образец растягивался со скоростью деформации 10^{-2} с^{-1} до напряжения порядка 0,9 от предела пропорциональности материала. Программа эксперимента представлена на рис. 3.

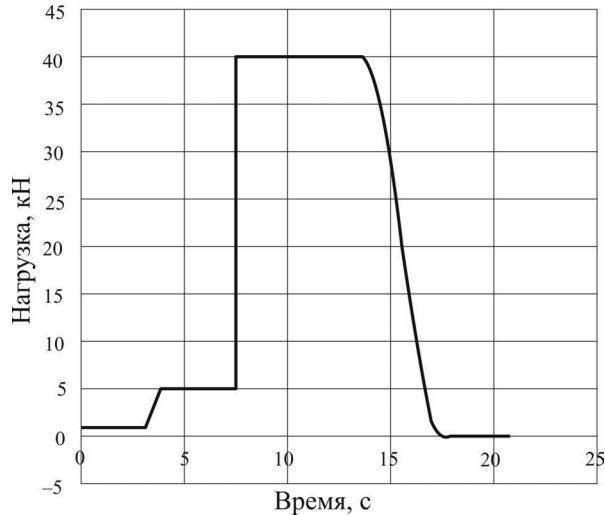


Рис. 3. Этапы нагружения образца при квазистатических испытаниях

Для оценки предела усталости материала по данным диссипации энергии при квазистатическом нагружении были испытаны три образца. Принимая во внимание, что эксперимент проводился при напряжениях, не превышающих 0,9 от предела пропорциональности материала, для каждого образца проводилось по пять циклов нагружения.

Для записи эволюции поля температур применялась инфракрасная камера FLIR SC 5000. Спектральный диапазон камеры 3–5 мкм. Максимальный размер кадра 320×256 точек, пространственная чувствительность составляет 10^{-4} м. Минимальная погрешность измерения температуры 25 мК при температуре образца 300 К. Для калибровки камеры использовалась стандартная калибровочная таблица. Запись поля температуры проводилась с частотами от 100 до 200 Гц. В процессе эксперимента захваты и образец экранировались теплозащитным экраном от внешних источников тепла.

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

2. Изменение температуры образца в процессе эксперимента

На рис. 4 представлена зависимость температуры образца от времени в процессе квазистатического нагружения.

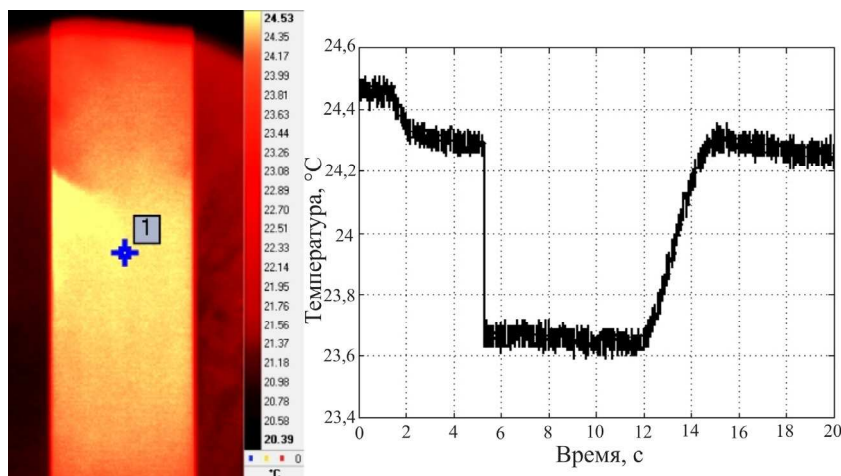


Рис. 4. Изменение температуры образца в процессе квазистатического нагружения

На начальном участке температура падает в результате приложения к образцу нагрузки 5 кН (см. этапы нагружения на рис. 2), затем образец выдерживается при данной нагрузке в течение трех секунд. Температура образца существенно не изменялась в течение этого промежутка времени, что позволяет говорить о слабом влиянии процессов теплообмена с окружающей средой и захватами в исследуемом диапазоне температур.

На основном этапе эксперимента к образцу прикладывается нагрузка 40 кН с максимально возможной для данной испытательной машины скоростью деформирования (10^{-2} с^{-1}). Температура образца резко уменьшается в результате термоупругого эффекта. Выбранный временной масштаб (см. рис. 4) не позволяет судить о линейности изменения температуры на данном этапе. Детальное исследование эволюции температуры на данном участке позволяет определить величину напряжения, соответствующую началу процесса диссипации тепла.

Заключительный участок изменения температуры соответствует разгрузке образца (см. рис. 4).

3. Методика оценки предела усталости материала по данным квазистатического нагружения

Разработка методик для определения предела усталости материала, характеризующего, согласно классическим представлениям, наибольшее значения амплитуды напряжения в процессе циклического нагружения, при котором не происходит разрушения образца в течение сколь угодно большого числа циклов, имеет большое практическое значение. Обычно предел усталости пропорционален пределу прочности материала $\sigma_f = \sigma_s / 2$, для цветных металлов соотношение имеет вид $\sigma_f = \sigma_s / 3$.

Значение предела усталости материала обычно связывается с пороговым значением напряжения, при котором процессы микропластичности становятся существенными с термодинамической и структурной точки зрения, но еще не влияют на макроскопический механический отклик образца [5]. Определение данной величины является, безусловно, важным с инженерной точки зрения как на этапе проектирования, так и в процессе эксплуатации конструкции для оценки ее текущего состояния. При этом разработка новых конструкционных материалов требует создания методов быстрой оценки предела усталости, позволяющих вести направленный поиск структурных и химических трансформаций материала с целью получения заданных свойств.

Современные методики инфракрасного сканирования позволяют с достаточной точностью выявлять изменения температурного поля, которые могут быть вызваны эволюцией структуры материала. Разрабатываемая методика позволяет по данным инфракрасной термографии рассчитать значение напряжения, при котором на графике эволюции температуры образца от времени наблюдается отклонение от линейной зависимости, предсказываемое линейной теорией термоупругости (рис. 5).

Эволюция температуры согласно линейной теории упругости может быть описана уравнением

$$\Delta T = \frac{\alpha \cdot T_0}{\rho c} \Delta \sigma_{ii}, \quad (1)$$

где ΔT – изменение температуры образца, К; T_0 – начальная температура, при которой проводился эксперимент, К; $\Delta \sigma_{ii}$ – изменения глав-

ных напряжений, Па; α – коэффициент температурного расширения, $1/K$; ρ – плотность, $кг/м^3$; c – удельная теплоемкость, $Дж/(кг \cdot K)$.

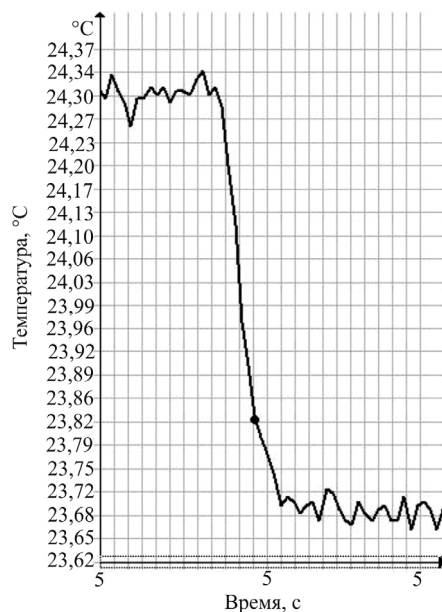


Рис. 5. Изменение температуры образца в процессе квазистатического нагружения

Выражая из соотношения (1) напряжение с учетом одноосного напряженного состояния, получим

$$\sigma = \frac{\Delta T \cdot \rho}{\alpha \cdot T_0}. \quad (2)$$

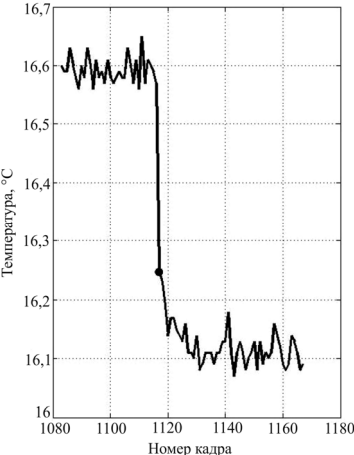
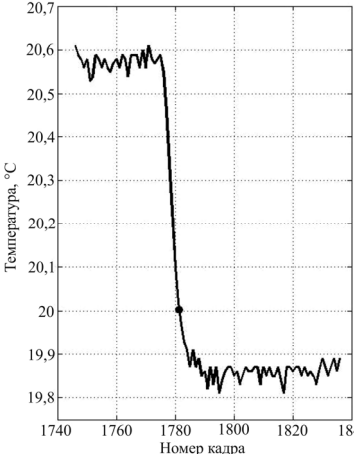
На рис. 5 представлено изменение температуры при увеличении нагрузки от 5 до 40 кН. Точкой обозначен излом, соответствующий моменту перехода материала через предел усталости, который характеризуется окончанием области термоупругости и возникновением первых признаков пластичности.

Подставляя в формулу (2) значение температуры в точке перелома и значения физических констант, получаем значение предела усталости. В таблице представлены экспериментально оцененные и табличные значения пределов усталости для исследованных образцов.

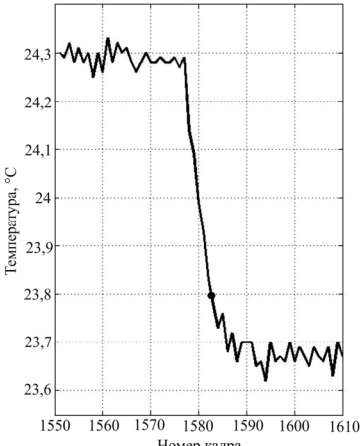
Анализ результатов, представленных в таблице, показывает, что предложенная методика позволяет оценить предел усталости с точно-

стью порядка 10 %. Полученное значение предела усталости материала (493 ± 28) МПа хорошо коррелирует с табличным значением для данного материала, полученным при симметричном цикле нагружения $\sigma_{-1} = 514$ МПа.

Значения предела усталости для исследованных образцов

| Номер образца | Эволюция температуры | Оценка предела усталости по данным эксперимента | Предел усталости из справочных данных |
|---------------|---|---|---------------------------------------|
| Образец № 1 |  | $\sigma_{-1} = 491$ МПа | $\sigma_{-1} = 514$ МПа |
| Образец № 2 |  | $\sigma_{-1} = 478$ МПа | $\sigma_{-1} = 514$ МПа |

Окончание таблицы

| Номер образца | Эволюция температуры | Оценка предела усталости по данным эксперимента | Предел усталости из справочных данных |
|---------------|---|---|---------------------------------------|
| Образец № 3 |  | $\sigma_{-1} = 510$ МПа | $\sigma_{-1} = 514$ МПа |

Выводы

В работе описано экспериментальное исследование процессов диссипации энергии при квазистатическом растяжении титанового сплава ВТ6. Предложенная программа нагружения позволяет минимизировать теплообмен образца с окружающей средой и определить значение напряжения, соответствующего началу структурно-индуцированного тепловыделения в образце.

В результате показано, что линейная зависимость изменения температуры, предсказываемая линейной теорией термоупругости, нарушается при напряжениях существенно ниже предела пропорциональности. На основе гипотезы о связи предела усталости материала и напряжения активации процессов микропластичности [5] предложена методика оценки предела усталости материала по данным инфракрасной термографии.

Предел усталости, рассчитанный по данным инфракрасной термографии при квазистатическом нагружении образцов сравнивался со справочным значением предела усталости, полученным из циклических испытаний. Было показано, что предлагаемый метод с достаточной точностью может использоваться для оценки предела усталости материала по данным температурного поля образца при квазистатических испытаниях.

Работа выполнена при частичной поддержке федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (контракт №8753) и гранта РФФИ 11-01-00153а.

Библиографический список

1. Вавилов В.П. Динамическая тепловая томография (обзор) // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2006. – Т. 72, № 3. – С. 26–36.
2. Luong M.P. Infrared thermographics scanning of fatigue in metals // Nuclear Engineering and Design. – 1995. – No. 158. – P. 363–376
3. Fatigue crack initiation and growth in a 35CrMo4 steel investigated by infrared thermography / O. Plekhov, T. Palin-Luc, O. Naimark, S. Uvarov, N. Saintier [et al.] // Fatigue and fracture of engineering materials and structures. – 2005. – Vol. 28. – Iss. 1. – P. 169–178.
4. 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 Sci. Engn. – 2007. – Vol. 462. – No. 1. – P. 367–370.
5. Doudard C., Hild F., Calloch S. A probabilistic model for multi-axial high cycle fatigue // Fatigue Fract. Engn. Mat. Struct. – 2007. – No. 30. – P. 107–114.
6. Матвиенко Ю.Г., Авраменко В.Г. Динамика температурного поля в пластически деформируемом металле. Сообщение I. Гладкий образец // Деформация и разрушение материалов. – 2009. – № 9. – С. 7–12.
7. Risitano G., Risitano A., Clienti C. Determination of the fatigue limit by semi static tests // Convegno Nazionale IGF XXI, Cassino (FR), Italia, 13–15 June, 2011. – P. 322–330.
8. Geraci A., La Rosa G., Risitano A. The infrared thermography in mechanical applications // CRES Symposium, Catania Italy, (1984) // ATA Ingegneria Automotoristica. – 1985. – No. 38(8–9).
9. Luong M.P. Fatigue limit evaluation of metals using an infrared thermographic technique // Mechanics of Materials. – 1988. – No. 28. – P. 155–163.
10. Risitano A., Risitano G. Cumulative damage evaluation of steel using infrared thermography // Theoret. App. Fracture Mech. – 2010. – No. 54. – P. 82–90.

References

1. Vavilov V.P. Dinamicheskaya teplovaya tomografiya (obzor) [Dynamic heat tomography (review)]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2006, vol. 72, no. 3, pp. 26–36.
2. Luong M.P. Infrared thermographics scanning of fatigue in metals. *Nuclear Engineering and Design*, 1995, no. 158, pp. 363–376.
3. 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.
4. 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. *Mat. Sci. Engin.*, 2007, vol. 462, no. 1, pp. 367–370.
5. Doudard C., Hild F., Calloch S. A probabilistic model for multiaxial high cycle fatigue. *Fatigue Fracture Engn. Mat. Struct.*, 2007, no. 30, pp. 107–114.
6. Matvienko V.P., Avramenko V.G. Dynamica temperaturnogo polya obrazca v plastichesky deformiruemom metalle. I. Gladkiy obrazec [Dynamics of the temperature field in plastically deformed metal. I. Smooth specimen]. *Deformation and fracture of materials*, 2009, no. 9, pp. 7–12.
7. Risitano G., Risitano A., Clienti C. Determination of the fatigue limit by semi static tests. *Convegno Nazionale IGF XXI*, Cassino (FR), Italia, 13–15 June, 2011, pp. 322–330.
8. Geraci A., La Rosa G., Risitano A. The infrared theroigraphy in mechanical applications, *In: CRES Symposium*, Catania Italy, (1984); published in: *ATA Ingegneria Automotoristica*, 1985, 38(8–9).
9. Luong M.P. Fatigue limit evaluation of metals using an infrared thermographic technique, *Mechanics of Materials*, 1988, no. 28, pp. 155–163.
10. Risitano A., Risitano G. Cumulative damage evaluation of steel using infrared thermography. *Theoret. App. Fract. Mech.*, 2010, no. 54, pp. 82–90.

Об авторах

Терехина Алена Ильинична (Пермь, Россия) – студентка Пермского национального исследовательского политехнического университета (614013, г. Пермь, ул. Профессора Поздеева, 11, e-mail: tai_mm_90@mail.ru).

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

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

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

About the authors

Terekhina Alena Ilinichna (Perm, Russian Federation) – student, Perm National Research Polytechnic University (1, Prof. Pozdeeva st., Perm, 614013, Russian Federation, e-mail: tai_mm_90@mail.ru).

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

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

Plekhov Oleg Anatolyevich (Perm, Russian Federation) – Doctor in Physics and Mathematics Sci., Senior Researcher Fellow ICMM UB RAS (1, Acad. Koroleva st., Perm, 614013, Russian Federation, e-mail: poa@icmm.ru).

Получено 20.11.2012