

Терехина А.И., Костина А.А., Плехов О.А. Оценка нормальных и касательных напряжений в деформируемых металлах по данным инфракрасной термографии // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2016. – № 3. – С. 241–251. DOI: 10.15593/perm.mech/2016.3.16

Terekhina A.I., Kostina A.A., Plekhov O.A. Normal and shear stresses estimation in deformed metals based on infrared thermography data. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2016. No. 3. Pp. 241-251. DOI: 10.15593/perm.mech/2016.3.16



**ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА**

**№ 3, 2016**

**PNRPU MECHANICS BULLETIN**

<http://vestnik.pstu.ru/mechanics/about/inf/>



DOI: 10.15593/perm.mech/2016.3.16

УДК 539.382.2

## **ОЦЕНКА НОРМАЛЬНЫХ И КАСАТЕЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ДЕФОРМИРУЕМЫХ МЕТАЛЛАХ ПО ДАННЫМ ИНФРАКРАСНОЙ ТЕРМОГРАФИИ**

**А.И. Терехина, А.А. Костина, О.А. Плехов**

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

### **О СТАТЬЕ**

Получена: 22 марта 2016 г.

Принята: 29 июля 2016 г.

Опубликована: 30 сентября 2016 г.

#### *Ключевые слова:*

инфракрасная  
термография,  
термический анализ  
напряжений,  
метод конечных  
элементов

### **АННОТАЦИЯ**

Работа посвящена разработке и реализации численно-экспериментального метода оценки компонент тензоров напряжений и деформаций на основе инфракрасной термографии в процессе деформирования металлов. Инфракрасная термография является бесконтактным методом визуализации и измерения температурных полей объектов на основе их инфракрасного излучения и используется как успешный метод неразрушающего контроля. В результате работы создан программный комплекс, позволяющий на основе сопоставления результатов решения краевой задачи и данных измерения изменения температуры образца, вызванных термоупругим эффектом, проводить оценку отдельных компонент тензоров напряжений и деформаций. Для верификации предложенной методики проведена серия экспериментов на квазистатическое растяжение образцов из конструкционной стали 8Х18Н10 и титанового сплава ВТ1-0 с концентраторами напряжений. В результате показано, что в отличие от аналогичных подходов (например, TSA-Thermal Stress Analysis) метод позволяет получить дополнительную информацию о напряжённо-деформируемом состоянии материала и провести более детальную оценку степени критичности состояния конструкции.

Методика предлагаемого комплекса основана на экспериментальном измерении первого инварианта тензора напряжений с использованием техники инфракрасного сканирования и его последующим пересчетом для определения граничных условий для исследуемой области образца или конструкции, что позволит определить все компоненты тензора напряжений в любой точке исследуемой области на основе численного решения соответствующей краевой задачи.

Особенностью разрабатываемого подхода является незначительные вычислительные затраты для определения компонент тензора напряжений, что позволяет применять данную методику при анализе широкого класса инженерных конструкций в режиме реального времени.

© ПНИПУ

© Терехина Алена Ильинична – аспирантка, e-mail: [terekhina.a@icmm.ru](mailto:terekhina.a@icmm.ru)

Костина Анастасия Андреевна – аспирантка, e-mail: [kostina@icmm.ru](mailto:kostina@icmm.ru)

Плехов Олег Анатольевич – доктор физико-математических наук, e-mail: [poa@icmm.ru](mailto:poa@icmm.ru)

Alena I. Terekhina – PhD student, e-mail: [terekhina.a@icmm.ru](mailto:terekhina.a@icmm.ru)

Anastasiia A. Kostina – PhD student, e-mail: [kostina.a@icmm.ru](mailto:kostina.a@icmm.ru)

Oleg A. Plekhov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, e-mail: [poa@icmm.ru](mailto:poa@icmm.ru)

## NORMAL AND SHEAR STRESSES ESTIMATION IN DEFORMED METALS BASED ON INFRARED THERMOGRAPHY DATA

A.I. Terekhina, A.A. Kostina, O.A. Plekhov

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

---

### ARTICLE INFO

Received: 22 March 2016  
Accepted: 29 July 2016  
Published: 30 September 2016

#### Keywords:

infrared thermography,  
thermal stress analysis,  
finite element method

### ABSTRACT

The work is dedicated to the development and implementation of numerical-experimental method of evaluation of the stress and strain components on the base of infrared thermography. The infrared thermography is a non-contact method of visualization and measurement of temperature fields of objects. It could be used as a method of non-destructive testing. A program complex which could be used for the evaluation of the individual components of stress and strain is developed on the base of the solution of the boundary value problem and data of the sample temperature change caused by the thermoelastic effect. In order to verify the proposed method, a series of experiments on quasi-static tensile of specimens from structural steel 8X18H10 and titanium alloy VT1-0 with the stress concentrators were carried out. As a result, it is shown that in contrast to the similar approaches (e.g., TSA-Thermal Stress Analysis) the method allows us to obtain additional information about stress-deformed state of the material and to conduct a more detailed assessment of the degree of the critical state of the structure.

The methodology of the proposed method is based on the experimental measurement of the first invariant of the stress tensor using the infrared scanning technique and its subsequent recalculation to determine boundary conditions. This allows us to identify all stress components at any point in the considered area of specimens or construction on the base of the numerical solution of the corresponding boundary value problem.

Special feature of the developed approach is a small computational cost for the determination of the stress components, which allows using this technique in the analysis of a wide class of engineering structures in real time.

© PNRPU

---

## Введение

В настоящее время методы инфракрасного сканирования активно применяются при исследовании различных задач механики сплошных сред. Инфракрасные технологии неразрушающего контроля эффективны при выявлении дефектов в элементах конструкций [1, 2], оценке термодинамических и механических характеристик материала [3, 4], усталостных свойств материала [5]. Широко распространено применение инфракрасной термографии для оценки скорости изменения и величины накопленной энергии с целью верификации энергетических критериев разрушения металлов при усталостных и квазистатических испытаниях [6, 7, 8]. В механике усталостного разрушения термография является эффективным инструментом для исследования поведения материала в условиях многоциклового усталости [9, 10], проведения механических испытаний с целью получения детальной информации о процессе зарождения и распространения усталостных трещин [11, 12]. Возможности метода инфракрасной термографии позволяют в режиме реального времени исследовать процессы изменения температуры на поверхности образца, вызванные локализацией упругих и пластических деформации в вершине трещины, а также трением на ее берегах в процессе ее распространения [13].

Сравнительно малоисследованной областью применения метода инфракрасной термографии является анализ механических напряжений в конструкциях [14]. Хорошо известно, что механические деформации приводят к изменению температуры материала. В работе [15] описана процедура контроля размера литого ядра в сварном точечном со-

единении с помощью анализа термоупругих напряжений, рассчитанных по данным распределения температуры в области сварного соединения. Авторы, регистрируя распределение температуры, определяют изменение суммы главных напряжений.

В настоящее время одним из наиболее известных приложений, используемых для анализа термических напряжений, является Thermal Stress Analyser (TheSA) © [16]. Использование данного метода позволяет проводить оценку первого инварианта тензора напряжений для широкого класса конструкционных материалов. В 1997 году в работе [17] впервые был предложен алгоритм, позволяющий провести оценку компонент тензора напряжений на основе сопоставления данных численного моделирования и результатов расчёта первого инварианта тензора напряжений на основе температурных измерений. Целью нашей работы является развитие данного алгоритма и создание программного комплекса, позволяющего проводить расчёт нормальных и касательных напряжений в процессе деформирования металлических материалов в областях концентраторов напряжений.

Для верификации предложенных алгоритмов и иллюстрации эффективности метода проведено экспериментальное исследование распределения температуры в плоских образцах из конструкционной стали 8X18H10 и титанового сплава ВТ1-0 с концентраторами напряжений.

## 1. Материал и условия эксперимента

Экспериментальное исследование проводилось на плоских образцах с размером рабочей части  $150 \times 36 \times 3$  мм, изготовленных из конструкционной стали 8X18H10 и титанового сплава ВТ1-0. Геометрия образцов (все размеры представлены в миллиметрах) изображена на рис. 1.

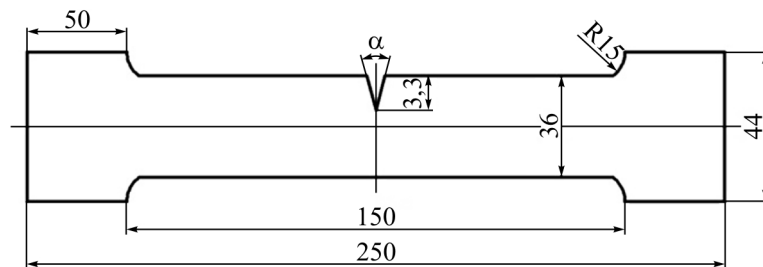


Рис. 1. Геометрия образцов, угол  $\alpha = 30^\circ$   
 Fig. 1. Geometry of samples, angle  $\alpha = 30^\circ$

Механические испытания проводились на 100 кН сервогидравлической испытательной машине Vi-00-100, обеспечивающей одноосное квазистатическое растяжение образцов с заданной скоростью (10–25 кН/с), амплитуда нагружения варьировалась от 4 до 6 кН. Амплитуда напряжений варьировалась для обеспечения пренебрежимо малого размера зоны пластической деформации (нагрева образца) в вершине концентратора напряжения. Для записи эволюции поля температур использовалась инфракрасная камера FLIR SC5000. Спектральный диапазон камеры 3–5 мкм. Максимальный размер кадра  $320 \times 256$  точек. Чувствительность камеры  $< 25$  мК при температуре образца 300 К. Испытания проводились при комнатной температуре.

Существуют практические ограничения измерения температуры по данным инфракрасного излучения, связанные с измерением поверхностной температуры образца и влиянием величины спектрального коэффициента излучения поверхности на результа-

ты измерений [18]. Для решения этих проблем поверхность образцов была предварительно обработана с целью приближения спектрального коэффициента излучения к коэффициенту излучения абсолютно чёрного тела. На начальной стадии обработки поверхность образцов полировалась абразивной бумагой (на завершающей стадии полировки размер абразивных частиц не превышал 20 мкм), затем поверхность покрывалась тонким слоем аморфного углерода. При расчёте значений температуры использовалась стандартная калибровочная таблица. Частота записи ИК-съемки составляла 100 Гц. На рис. 2 представлена схема нагружения образцов.

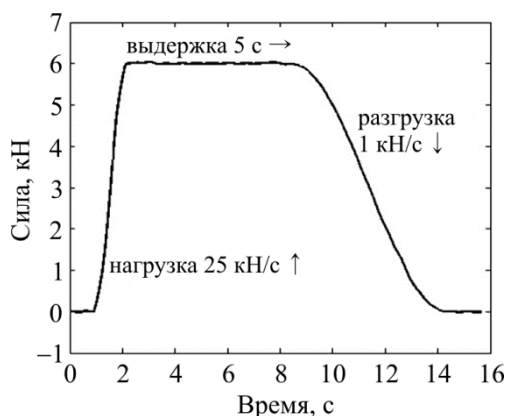


Рис. 2. Схема проведения испытаний на растяжение

Fig. 2. Testing set up related to stretching

## 2. Определение первого инварианта тензора напряжений

Следуя термодинамике равновесных процессов, можно показать, что в случае упругой деформации металла температура уменьшается при его растяжении и растёт при сжатии. Данное явление называется термоупругим эффектом. Степень растяжения или сжатия определяется величиной первого инварианта тензора деформаций. Согласно эмпирической формуле Кельвина можно записать линейную связь между изменением температуры и первым инвариантом тензора напряжений [19, 20]:

$$\Delta T = -\frac{\alpha}{\rho \cdot C_V} T \cdot J_1, \quad (1)$$

где  $\Delta T$  – изменение температуры;  $\alpha$  – коэффициент температурного расширения;  $\rho$  – плотность;  $C_V$  – удельная теплоемкость при постоянном объеме;  $T$  – абсолютная температура;  $J_1$  – первый инвариант тензора напряжений.

Метод инфракрасной термографии является прямым экспериментальным методом измерения распределения температурных полей. На рис. 3, а приведено температурное изображение для образца с V-образным концентратором напряжений из конструкционной стали с углом  $30^\circ$ , полученное с использованием ИК-камеры. На рис. 3, б представлена характерная зависимость температуры образца вблизи вершины концентратора напряжений в течение эксперимента. Рис. 3, а соответствует моменту времени с наименьшей температурой на рис. 3, б. На рис. 4 показаны аналогичные результаты для титанового сплава ВТ1-0 соответственно. Размер исследуемой области на ИК-изображении определялся локально в области концентратора напряжений на образце так, чтобы термоупругий эффект был наглядным.

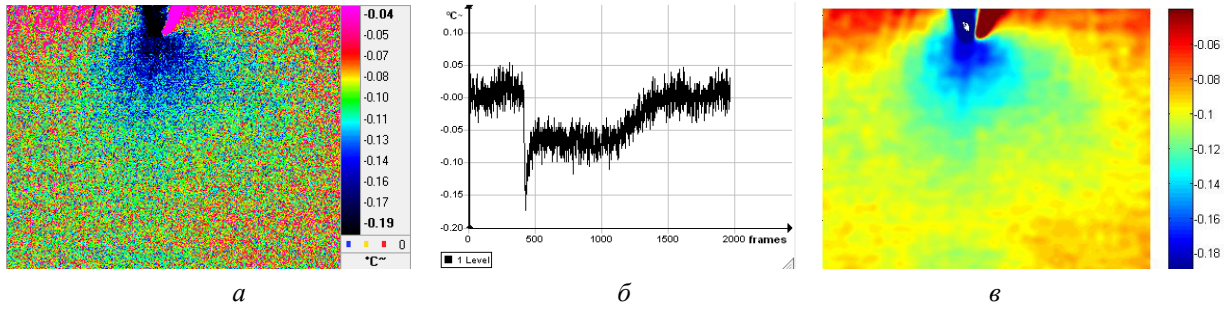


Рис. 3. Распределение температуры на поверхности образца из конструкционной стали с V-образным вырезом (угол  $30^\circ$ ) (а); изменение температуры образца вблизи концентратора напряжений в течение эксперимента (б); распределение температуры на поверхности образца после применения алгоритма компенсации шумов (в)

Fig. 3. is temperature distribution on the sample surface made of construction steel with a V-shaped cut (angle  $30^\circ$ ) (a); is the change of the sample temperature near the stress concentrator during the experiment (b); is the temperature distribution on the sample surface after the noise compensation algorithm is applied (c)

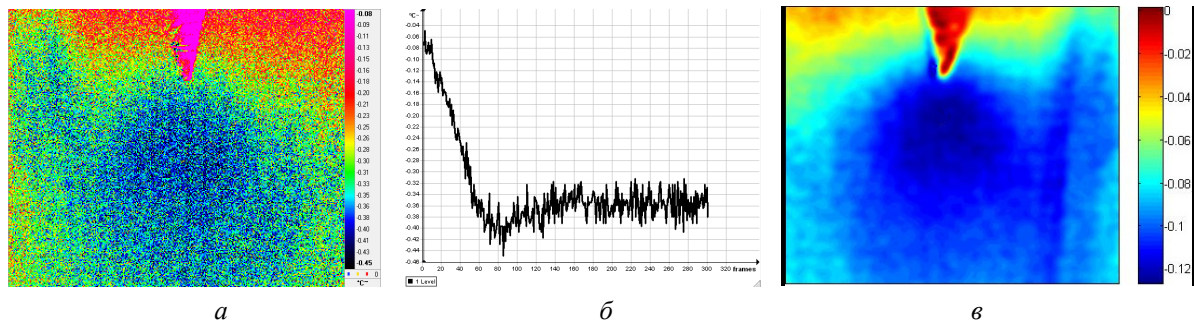


Рис. 4. Распределение температуры на поверхности образца из титанового сплава BT1-0 с V-образным вырезом (угол  $30^\circ$ ) (а); изменение температуры образца вблизи концентратора напряжений в течение эксперимента (б); распределение температуры на поверхности образца после применения алгоритма компенсации шумов (в)

Fig. 4. Is temperature distribution on the sample surface made of titanium alloy BT1-0 with a V-shaped cut (angle  $30^\circ$ ) (a); is the change of the sample temperature near the stress concentrator during the experiment (b); is the temperature distribution on the sample surface after the noise compensation algorithm is applied (c)

Анализ данных, представленных на рис. 3, а, б и 4, а, б, позволяет сделать вывод о существенном вкладе флуктуаций температуры, вызванных влиянием окружающей среды и воздействием самой камеры. Для повышения точности рассчитываемых величин необходимо применение фильтра шумов. В данной работе процедура фильтрации была реализована на основе двумерного дискретного преобразования Фурье со стандартным ядром Гаусса на основе алгоритма, описанного в работе [21]. Результаты обработки данных поля температур, получаемых в процессе испытания, представлены на рис. 3, в и 4, в.

Используя симметрию рассматриваемой задачи, для расчёта значений компонент тензора напряжений была рассмотрена половина температурного изображения (рис. 5, б). Изображение разбивалось сеткой (рис. 5, а, б, а) и исходя из соотношения (1), вычислялись экспериментальные значения первого инварианта тензора напряжений в  $M$  точках (точки находятся в узлах сетки, а также в центре каждого элемента сетки) (рис. 5, б, б, б).

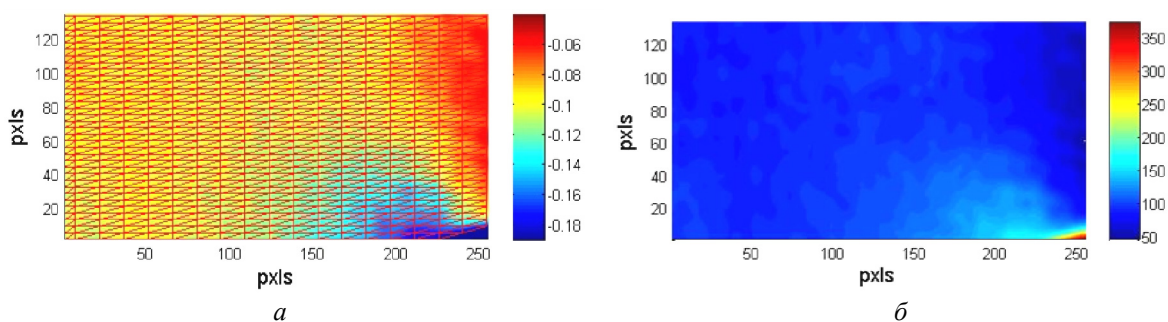


Рис. 5. Поле температуры для образца из конструкционной стали с  $V$ -образным концентратором напряжений после применения алгоритма подавления шумов и сеточного разбиения (а); значения первого инварианта тензора напряжений (размер одного пикселя 24 мкм) (б)

Fig. 5. Is the temperature field for the sample made of structural steel with a  $V$ -shaped stresses concentrator after the noise elimination algorithm and meshing are applied (а); are values of the first invariant of stress tensor (one pixel is 24 microns) (б)

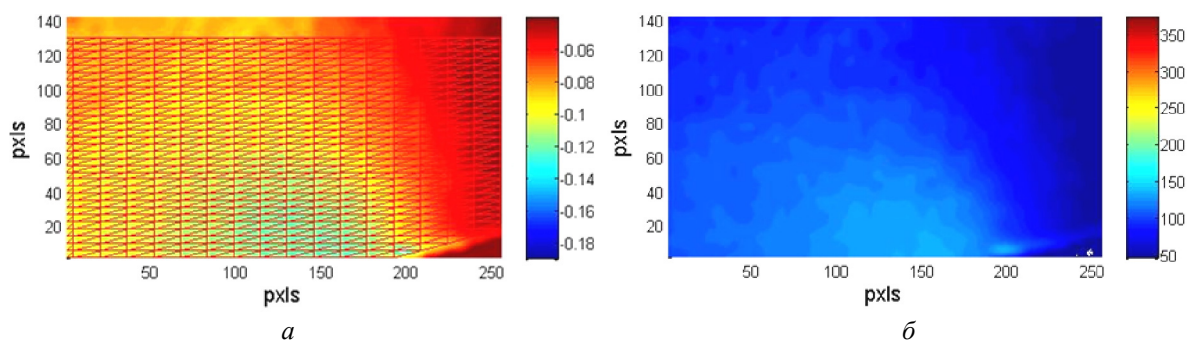


Рис. 6. Поле температуры для образца из титанового сплава BT1-0 с  $V$ -образным концентратором напряжений после применения алгоритма подавления шумов и сеточного разбиения (а); значения первого инварианта тензора напряжений (размер одного пикселя – 24 мкм) (б)

Fig. 6. Is the temperature field for the sample made of titanium alloy BT1-0 with a  $V$ -shaped stresses concentrator after the noise elimination algorithm and meshing are applied (а); are values of the first invariant of stress tensor (one pixel is 24 microns) (б)

### 3. Определение всех компонент тензора напряжений и тензора деформаций на основе МКЭ

Экспериментально определенные значения первого инварианта тензора напряжений в  $M$  точках с использованием нижеизложенного алгоритма позволяют определить граничные условия для исследуемой области. Это, в свою очередь, позволяет определить все компоненты тензора напряжений в любой точке исследуемой области на основе численного решения соответствующей краевой задачи.

Методология определения граничных условий сводится к следующим шагам:

1. Граница исследуемой области (рис. 7) разбивается на  $N$  точек. К каждой точке границы  $j$  последовательно прикладываются единичные силы.
2. Методом конечных элементов вычисляется значение инварианта тензора напряжений  $J_{1ij}^*$  в элементе  $i$  под действием единичной силы, приложенной в точке  $j$ . В результате расчета для каждой единичной силы получаем  $M$  значений первых инвариантов тензора напряжений.

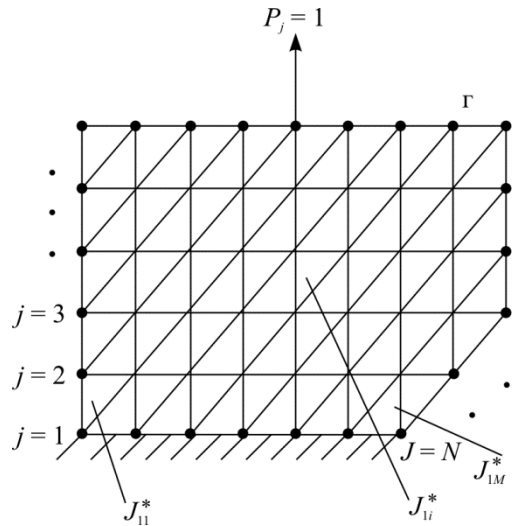


Рис. 7. Схема приложения единичных сил к границе расчётной области  
 Fig. 7. Chart of applying single forces to the boundary of the computational area

3. Истинные граничные условия  $P_j$  вдоль границы должны удовлетворять следующему соотношению:

$$e_i = J_{li} - \sum_{j=1}^N J_{lij}^* P_j, i = \overline{1, M}, j = \overline{1, N}, \quad (2)$$

где  $J_{li}$  представляют собой экспериментально определяемые значения первого инварианта тензора напряжений. Для нахождения значений  $P_j$  применяется метод наименьших квадратов:

$$S = \sum_{i=1}^M (e_i^2), \quad (3)$$

т.е., оптимальные значения  $P_j$  должны удовлетворять следующим соотношениям:

$$\frac{\partial S}{\partial P_j} = 0. \quad (4)$$

Уравнение (4) представляет собой систему  $N$  линейных уравнений, решение которой позволяет определить истинные значения граничных условий  $P_j$ . После того как значения  $P_j$  определены, можно вычислить компоненты тензора напряжений в любой точке на поверхности.

Описанный алгоритм был реализован на языке программирования C++ и применен для вычисления упругих компонент тензора напряжений и деформаций при квазистатическом растяжении плоского образца с V-образным вырезом. Геометрия образца приведена на рис. 1. При моделировании рассматривалась только часть образца вблизи концентратора напряжений, представленная на рис. 7. Для расчета использовалась сетка, состоящая из линейных треугольных элементов. На рис. 8, 9 представлены все компоненты тензора напряжений и тензора деформаций, полученные в результате расчета для образцов из конструкционной стали и титанового сплава ВТ1-0 соответственно. Максимальные

значения компонент тензора напряжений  $S_{yy}$  и тензора деформаций  $E_{yy}$  сосредоточены в области концентратора напряжений (рис. 8–9 б–д) образца, что соответствует экспериментальным данным [22, 23].

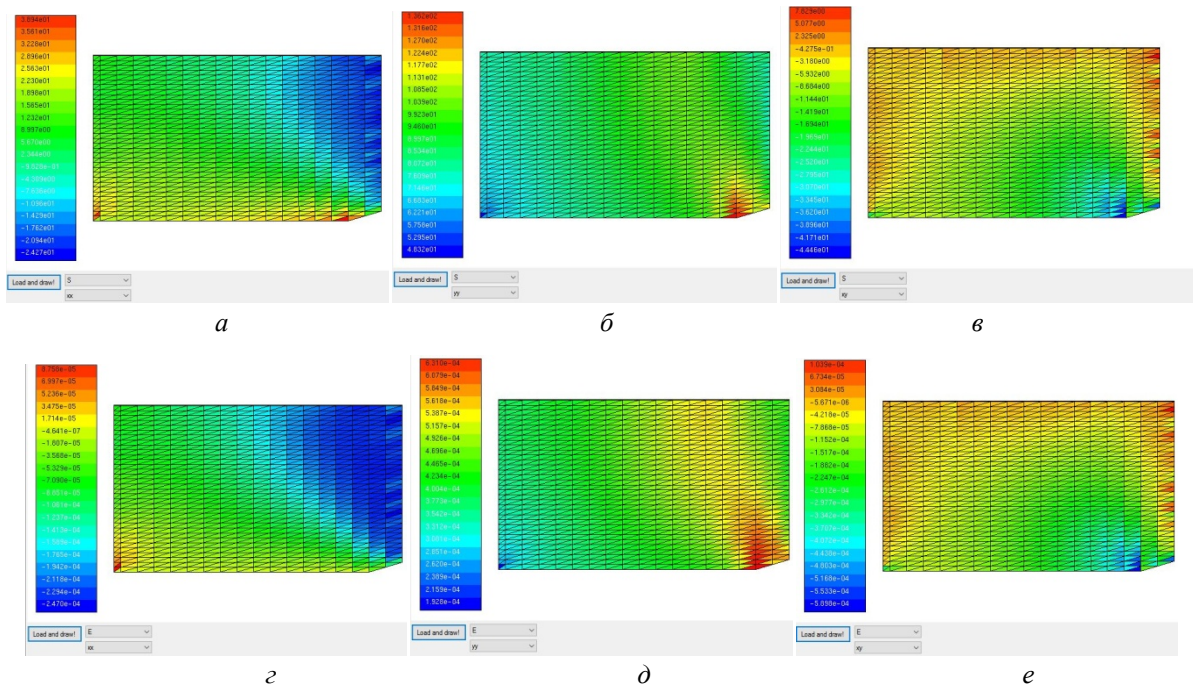


Рис. 8 Компоненты тензора напряжений ( $S$ , МПа) и тензора деформаций ( $E$ ) для конструкционной стали: а –  $S_{xx}$ ; б –  $S_{yy}$ ; в –  $S_{xy}$ ; г –  $E_{xx}$ ; д –  $E_{yy}$ ; е –  $E_{xy}$   
 Fig. 8. Components of stress tensor ( $S$ , МПа) and strain tensor ( $E$ ) for structural steel: а –  $S_{xx}$ ; б –  $S_{yy}$ ; в –  $S_{xy}$ ; г –  $E_{xx}$ ; д –  $E_{yy}$ ; е –  $E_{xy}$

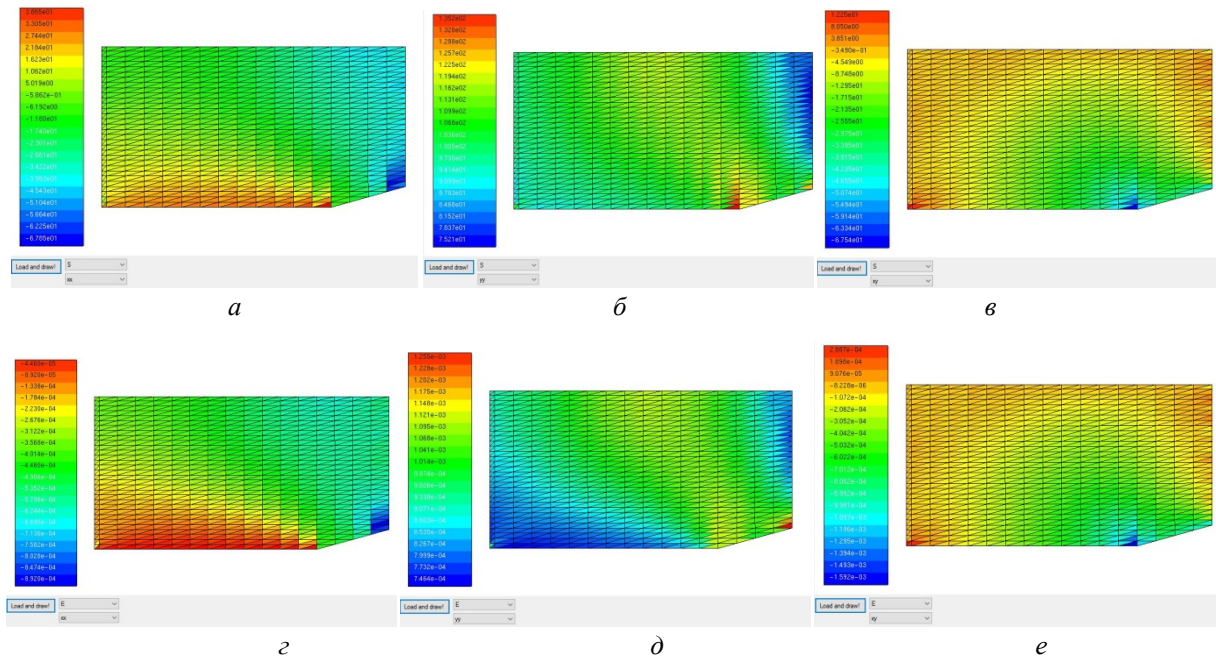


Рис. 9. Компоненты тензора напряжений ( $S$ , МПа) и тензора деформаций ( $E$ ) для титанового сплава BT1-0: а –  $S_{xx}$ ; б –  $S_{yy}$ ; в –  $S_{xy}$ ; г –  $E_{xx}$ ; д –  $E_{yy}$ ; е –  $E_{xy}$   
 Fig. 9. Components of stress tensor ( $S$ , МПа) and strain tensor ( $E$ ) for titanium alloy BT1-0: а –  $S_{xx}$ ; б –  $S_{yy}$ ; в –  $S_{xy}$ ; г –  $E_{xx}$ ; д –  $E_{yy}$ ; е –  $E_{xy}$



Применимость данного подхода для решения задач подобного типа была проиллюстрирована в работе [17] на примере задачи Кирша о растяжении бесконечной пластины, имеющей круговое отверстие. Данная задача имеет известное аналитическое решение, значения которого с хорошей точностью согласуются с результатами, полученными с помощью предложенного подхода.

## Заключение

Разработан программный комплекс, сочетающий в себе алгоритм определения первого инварианта тензора напряжений с помощью методов инфракрасной термографии, решения соответствующей краевой задачи методом конечных элементов и оптимизации функционала, определяющего значения истинных граничных условий в конструкции заданной формы. В результате использования предложенного алгоритма становится возможным определение всех компонент тензора напряжений и деформаций для конструкций с V-образными концентраторами напряжений с различным углом раскрытия, работающих в области упругих деформаций, методом инфракрасной термографии. Разработанный программный комплекс включает в себя средства обработки данных инфракрасной камеры, оригинальные алгоритмы решения краевых задач методом конечных элементов и алгоритмы для визуализации результатов расчета. Эффективность метода была проиллюстрирована расчётом распределения полей деформаций и напряжений в окрестности концентратора напряжений в плоском образце с V-образным вырезом.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-48-590148 р\_а, грант № 16-31-00156 мол\_а) и программы «УМНИК» №9809ГУ2/2015.

## Библиографический список

1. Мойсейчик Е.А., Мойсейчик Е.К. Выявление дефектов в стальных элементах конструкций с использованием инфракрасных технологий неразрушающего контроля // Проблемы механики современных машин. – 2012. – Т. 3. – С. 5–10.
2. Вавилов В.П. Динамическая тепловая томография // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2006. – Т. 72, № 3. – С. 26–36.
3. Determination of critical strain for rapid crack growth during tensile deformation in aluminide coated near- $\alpha$  titanium alloy using infrared thermography / Punnoson Sony, Mukhopadhyay Amretendu, Sarkar Rajdeep, Alam Zafir, Das Dipak, Kumar Vikas // Materials Science & Engineering. – 2013. – Vol. A 576. – P. 217–221. DOI: 10.1016/j.infrared.2015.09.021
4. Huilong Dong, Boyu Zheng, Feifan Chen. Infrared sequence transformation technique for in situ measurement of thermal diffusivity and monitoring of thermal diffusion // Infrared Physics & Technology. – 2015. – Vol. 73. – P. 130–140. DOI: 10.1016/j.infrared.2015.09.021
5. La Rosa G., Risitano A. Thermographic methodology for rapid determination of the fatigue limit of materials and mechanical components // International Journal of Fatigue. – 2000. – No. 22. – P. 65–73.
6. A thermodynamic internal variable model for the partition of plastic work into heat and stored energy in metals / P. Rosakis, A.J. Rosakis, G. Ravichandran, J. Hodowany // J. Mech. And Phys. Solids. – 2000. – No. 48. – P. 581–607.
7. 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.
8. Heat dissipation energy under fatigue based on infrared data processing / A. Fedorova, M. Bannikova, A. Terekhina, O. Plekhov // Qualitative Infrared Thermography Journal. – 2014. – Vol. 11. – Iss. 1. – P. 2–9.

9. An experimental analysis of fatigue behavior of AZ31B magnesium alloy welded joint based on infrared thermography / H.X. Zhang, G.H. Wu, Z.F. Yan, S.F. Guo, P.D. Chen, W.X. Wang // *Materials and Design*. – 2014. – Vol. 55. – P. 785–791.
10. Quantitative Thermographic Methodology for fatigue assessment and stress measurement / X.G. Wang, V. Crupi, X.L. Guo, Y.G. Zhao // *International Journal of Fatigue*. – 2010. – Vol. 32. – No. 12. – P. 1970–1976.
11. 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.
12. Theoretical analysis, infrared and structural investigations of energy dissipation in metals under cyclic loading / O. Plekhov, N. Saintier, T. Palin-Luc, S. Uvarov, O. Naimark // *Material Science and Engineering*. – 2007. – Vol. 462. – No. 1. – P. 367–370.
13. Экспериментальное исследование генерации тепла в вершине усталостной трещины / А.И. Терёхина, М.В. Банников, О.А. Плехов, Э.В. Плехова // *Письма в ЖТФ*. – 2012. – Т. 38. – Вып. 16.
14. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. – М.: Спектр, 2009. – 544 с.
15. Современные методы и средства неразрушающего контроля сварного соединения выполненного контактной точечной сваркой (обзор) / Е.В. Шаповалов, Р.М. Галаган, Ф.С. Клишар, В.И. Запара // *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. – 2013. – № 1. – С. 10–22.
16. Review of Applications of Thermal Stress Analyser // Presented by Pierre Bremond, Presented at Testing Expo, 26 May 2004. – Stuttgart, Germany, 2004.
17. Murakami Y., Yoshimura M. Determination of all stress components from measurements of the stress invariant by the thermoelastic stress method // *International Journal of Solids and Structures*. – 1997. – Vol. 34 (35–36). – P. 4449–4461.
18. Стандарт по использованию тепловизоров BALTECH [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.baltech.ru/catalog.php?catalog=14#>.
19. Stanley P. Beginnings and Early Development of Thermoelastic Stress Analysis // *Strain*. – 2008. – Vol. 44. – P. 285–297.
20. Thompson W. (Lord Kelvin). *Trans. Roy. Soc. Edinburgh*. – 1853. – Vol. 20. – P. 261.
21. Infrared thermography study of the fatigue crack propagation / A.Yu. Fedorova, M.V. Bannikov, O.A. Plekhov, E.V. Plekhova // *Fracture and Structural integrity*. – 2012. – Vol. 21. – P. 46–53.
22. Грубин А.Н. Нелинейные задачи концентрации напряжений в деталях машин. – Л.: Машиностроение, 1972. – 160 с.
23. Корихин Н.В., Эйгенсон С.Н. Исследование концентрации напряжений в некоторых ответственных деталях гидромашин // *Вестник МГТУ*. – 2013. – Т. 16, № 1. – С. 108–113.

## References

1. Moyseychik E.A., Moyseychik E.K. Vyjavlenie defektov v stal'nyh jelementah konstrukcij s ispol'zovaniem infrakrasnyh tehnologij nerazrushajushhego kontrolja [Detection of defects in steel structural elements using the infrared non-destructive testing technology]. *Problemy mehaniki sovremennyh mashin*, 2012, vol. 3, pp. 5-10.
2. Vavilov V.P. Dinamicheskaja teplovaja tomografija [Dynamic thermal imaging]. *Zavodskaja laboratorija. Diagnostika materialov*, 2006, vol. 72, no. 3, pp. 26-36.
3. Sony Punnoson, Amretendu Mukhopadhyay, Rajdeep Sarkar, Zafir Alam, Dipak Das, Vikas Kumar. Determination of critical strain for rapid crack growth during tensile deformation in aluminide coated near- $\alpha$  titanium alloy using infrared thermography. *Materials Science & Engineering*, 2013, vol. A 576, pp. 217-221. DOI: 10.1016/j.infrared.2015.09.021
4. Huilong Dong, Boyu Zheng, Feifan Chen. Infrared sequence transformation technique for in situ measurement of thermal diffusivity and monitoring of thermal diffusion. *Infrared Physics & Technology*, 2015, vol. 73, pp. 130-140. DOI: 10.1016/j.infrared.2015.09.021

5. La Rosa G., Risitano A. Thermographic methodology for rapid determination of the fatigue limit of materials and mechanical components. *International Journal of Fatigue*, 2000, № 22, pp. 65-73.
6. Rosakis P., Rosakis A.J., Ravichandran G., Hodowany J. A thermodynamic internal variable model for the partition of plastic work into heat and stored energy in metals. *J. Mech. And Phys. Solids*, 2000, no. 48, pp. 581-607.
7. 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.
8. Fedorova A., Bannikova M., Terekhina A., Plekhov O. Heat dissipation energy under fatigue based on infrared data processing. *Qualitative Infrared Thermography Journal*, 2014, vol. 11, iss. 1, pp. 2-9.
9. Zhang H.X., Wu G.H., Yan Z.F., Guo S.F., Chen P.D., Wang W.X. An experimental analysis of fatigue behavior of AZ31B magnesium alloy welded joint based on infrared thermography. *Materials and Design*, 2014, vol. 55, pp. 785-791.
10. Wang X.G., Crupi V., Guo X.L., Zhao Y.G. Quantitative Thermographic Methodology for fatigue assessment and stress measurement. *International Journal of Fatigue*, 2010, vol. 32, no. 12, pp. 1970-1976.
11. 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.
12. Plekhov O., Saintier N., Palin-Luc T., Uvarov S., Naimark O. Theoretical analysis, infrared and structural investigations of energy dissipation in metals under cyclic loading. *Material Science and Engineering*, 2007, vol. 462, no. 1, pp. 367-370.
13. Terekhina A.I., Bannikov M.V., Plekhov O.A., Plekhova E.V. Eksperimental'noe issledovanie generacii tepla v vershine ustalostnoj treshhiny [Experimental research of heat generation in the top of a fatigue crack]. *Pisma v ZhTF*, 2012, vol. 38, is. 16.
14. Vavilov V.P. Infракрасная термография и тепловой контроль [Infrared thermography and thermal control]. *ID Spektr*, 2009, 544 p.
15. Shapovalov E.V., Galagan R.M., Klishhar F.S., Zapara V.I. Sovremennye metody i sredstva nerazrushajushhego kontrolja svarnogo soedinenija vypolnennogo kontaktnoj tochechnoj svarkoj (obzor) [Modern methods and means of nondestructive testing of welded joints made of resistance spot welding (Review)]. *Tekhnicheskaja diagnostika i nerazrushajushhij kontrol*, 2013, no. 1, pp. 10-22.
16. Review of Applications of Thermal Stress Analyser // Presented by Pierre Bremond, Presented at Testing Expo, 26 May 2004, Stuttgart, Germany.
17. Murakami Y. and Yoshimura M. Determination of all stress components from measurements of the stress invariant by the thermoelastic stress method. *International Journal of Solids and Structures*, 1997, vol. 34 (35–36), pp. 4449-4461.
18. Standart po ispolzovaniju teplovizorov BALTECH [Elektronnyj dokument] (<http://www.baltech.ru/catalog.php?catalog=14#>).
19. Stanley P. Beginnings and Early Development of Thermoelastic Stress Analysis. *Strain*, 2008, vol. 44, pp. 285-297.
20. Thompson W. (Lord Kelvin). *Trans. Roy. Soc. Edinburgh*, 1853, vol. 20, pp. 261.
21. Fedorova A.Yu., Bannikov M.V., Plekhov O.A., Plekhova E.V. Infrared thermography study of the fatigue crack propagation. *Fracture and Structural integrity*, 2012, vol. 21, pp. 46-53.
22. Grubin A.N. Nelinejnye zadachi koncentracii napryazhenij v detalyah mashin [Nonlinear problems of stress concentration in the machine parts]. *Leningrad: Mashinostroenie*, 1972, 160 p.
23. Korihin N.V., Ehjenson S.N. Issledovanie koncentracii napryazhenij v nekotoryh otvetstvennyh detalyah gidromashin [Study of stress concentration in some critical parts of hydraulic]. *Vestnik MGTU*, 2013, vol. 16, no. 1, pp. 108-113.