

Изюмова А.Ю., Вшивков А.Н., Прохоров А.Е., Плехов О.А., Venkatraman B. Исследование эволюции источников тепла в процессе упругопластического деформирования титанового сплава ОТ4-0 на основе контактных и бесконтактных измерений // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2016. – № 1. – С. 68–81. DOI: 10.15593/perm.mech/2016.1.05

Iziumova A.Yu., Vshivkov A.N., Prokhorov A.E., Plekhov O.A., Venkatraman B. Study of heat source evolution during elastic-plastic deformation of titanium alloy Ti-0.8Al-0.8Mn based on contact and non-contact measurements. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2016. No. 1. Pp. 68-81. DOI: 10.15593/perm.mech/2016.1.05



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 1, 2016

PNRPU MECHANICS BULLETIN

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



DOI 10.15593/perm.mech/2016.1.05

УДК 539.424:536.62

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ ИСТОЧНИКОВ ТЕПЛА В ПРОЦЕССЕ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ОТ4-0 НА ОСНОВЕ КОНТАКТНЫХ И БЕСКОНТАКТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

А.Ю. Изюмова<sup>1</sup>, А.Н. Вшивков<sup>1</sup>, А.Е. Прохоров<sup>1</sup>,  
О.А. Плехов<sup>1</sup>, В. Venkatraman<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

<sup>2</sup>Центр атомных исследований им. Индиры Ганди, Калпаккам, Индия

### О СТАТЬЕ

Получена: 28 октября 2015 г.  
Принята: 25 января 2016 г.  
Опубликована: 30 марта 2016 г.

#### Ключевые слова:

инфракрасная термография,  
контактный датчик потока тепла,  
квазистатическое растяжение,  
диссипация энергии,  
упругопластическое  
деформирование

### АННОТАЦИЯ

Работа посвящена исследованию эволюции источников тепла в процессе квазистатического растяжения образцов из титанового сплава ОТ4-0 с помощью контактного датчика потока тепла и метода инфракрасной термографии. Целью исследования является оценка возможностей двух различных типов измерений (контактного и бесконтактного) для мониторинга состояния материала по изменению величины источников тепла, регистрируемому на поверхности образцов в процессе их деформирования. Явными преимуществами метода инфракрасной термографии являются возможность бесконтактного измерения температуры поверхности материала в различных условиях и расчет поля мощности источников тепла. Несмотря на это, данный метод обладает рядом ограничений, связанных с излучательной способностью исследуемого материала, зашумлением сигнала, вызванным влиянием внешних факторов, условиями теплообмена образца и окружающей среды, а также ограничением по точности определения мощности источников тепла. Указанные факторы не позволяют использовать метод инфракрасной термографии в эксплуатационных условиях материалов и конструкций для определения их энергетического состояния. В данной работе сделана попытка верифицировать величину рассчитываемой на основе метода инфракрасной термографии мощности источников тепла на поверхности материала, возникающих при его деформировании. Для этого использовался разработанный авторами контактный датчик

© Изюмова Анастасия Юрьевна – младший научный сотрудник, e-mail: fedorova@icmm.ru

Вшивков Алексей Николаевич – аспирант, e-mail: vshivkov.a@icmm.ru

Прохоров Александр Евгеньевич – аспирант, e-mail: prokhorov.a@icmm.ru

Плехов Олег Анатольевич – доктор физико-математических наук, зам. директора по науке, e-mail: poa@icmm.ru

Venkatraman Balasubramaniam – доктор наук (физика, компьютерные технологии), e-mail: bvenkat@igcar.gov.in

Anastasia Yu. Iziumova – Junior Researcher, e-mail: fedorova@icmm.ru

Aleksei N. Vshivkov – Postgraduate Student, e-mail: vshikov.a@icmm.ru

Aleksander E. Prokhorov – Postgraduate Student, e-mail: prokhorov.a@icmm.ru

Oleg A. Plekhov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Deputy director, e-mail: poa@icmm.ru

Balasubramaniam Venkatraman – Doctor of Sciences in Computer Applications, e-mail: bvenkat@igcar.gov.in

потока тепла, устройство которого основано на эффекте Зеебека. В результате по данным контактного датчика и метода инфракрасной термографии были получены зависимости величины теплового потока, возникающего в процессе упругопластического деформирования материала, от времени эксперимента. Удовлетворительное соответствие данных позволяет говорить о возможности использования контактных и бесконтактных измерений как в комплексе – для верификации величины источников тепла, получения их распределения на поверхности материала и определения условий теплообмена образца с окружающей средой, так и по отдельности – в качестве экспресс-методики оценки состояния материала на различных этапах нагружения.

© ПНИПУ

## STUDY OF HEAT SOURCE EVOLUTION DURING ELASTIC-PLASTIC DEFORMATION OF TITANIUM ALLOY TI-0.8AL-0.8MN BASED ON CONTACT AND NON-CONTACT MEASUREMENTS

A.Yu. Iziumova<sup>1</sup>, A.N. Vshivkov<sup>1</sup>, A.E. Prokhorov<sup>1</sup>,  
O.A. Plekhov<sup>1</sup>, B. Venkatraman<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of continuous media mechanics UB RAS, Perm, Russian Federation

<sup>2</sup>Indira Gandhi Centre for Atomic Research, Kalpakkam, India

### ARTICLE INFO

Received: 28 October 2015  
Accepted: 25 January 2016  
Published: 30 March 2016

#### Keywords:

infrared thermography,  
contact heat flux sensor,  
quasistatic tension,  
energy dissipation,  
elastic-plastic deformation

### ABSTRACT

This work is devoted to investigation of the heat source evolution during quasistatic tensile testing of titanium alloy specimens using a contact heat flux sensor and infrared thermography. The purpose of the study is to evaluate the possibility of using two different measurement (contact and non-contact) methods to monitor the state of material by changing the heat source value registered on the specimen surface during deformation. The obvious advantages of infrared thermography are non-contact temperature measurements of the material surface under various conditions and heat source field calculations. However this method has a number of limitations associated with the reflectivity of the tested material, noisy signal caused by external factors, heat transfer conditions between the specimen and environment, and accuracy of heat source calculations. These problems do not allow using infrared thermography under operating conditions in order to evaluate the energy state of materials and structures. The paper attempts to verify the heat source value arising during the elastic-plastic deformation of the material using infrared thermography data. For this purpose, a Seebeck effect heat flux sensor has been developed by the authors. Contact sensor and infrared thermography data give time dependence of the heat flux value. The satisfactory agreement of the results shows that contact and non-contact measurements can be used either in combination (to verify the heat source value, its distribution over the material surface and heat exchange conditions for specimen and environment) or separately (as an express method to evaluate material conditions at different stages of loading).

© PNRPU

## Введение

Метод инфракрасной термографии (ИКТ) является бесконтактным методом измерения температуры поверхности объектов и применяется как для контроля температуры образцов во время механических испытаний [1], так и для определения механических и термодинамических характеристик материала, таких как предел усталости [2, 3], критическая величина деформации для быстрых трещин [4], температуропроводность [5] и т.д. В России основной областью применения метода ИКТ является неразрушающий контроль [6].

В последние два десятилетия метод ИКТ активно используется для детектирования возникновения и развития повреждений (трещин, пор и других неоднородностей) материала и исследования процесса усталостного разрушения. Исследование поведения материала в условиях многоциклового усталости и прогнозирование его выносливости на основе метода ИКТ представлено в [7, 8]. В работе [9] показана возможность использования ИКТ для прогнозирования усталостной долговечности сварных соединений.

На основе данных метода ИКТ решается и ряд задач, посвященных определению энергетических характеристик материала, таких как скорость диссипации и накопления энергии в процессе деформирования [10, 11, 12, 13, 14]. Оценка значений различных энергий (пластической, накопленной, диссипированной), вовлеченных в процесс деформирования материала, играет важную роль по нескольким причинам. Во-первых, их измерение дает возможность глубже проникнуть в суть механизмов деформации и разрушения. Во-вторых, энергетическая концепция описывает изменение внутренней энергии материала и, таким образом, вносит вклад в построение и валидацию моделей, базирующихся на принципах термодинамики. В-третьих, информация об эволюции различных энергетических параметров может быть использована для идентификации коэффициентов (например, коэффициента Тейлора-Куинни), часто используемых при численном моделировании адиабатических процессов для оценки количества работы пластической деформации, перешедшей в тепловую энергию [15].

Явными преимуществами метода ИКТ являются возможность бесконтактного измерения температуры поверхности материала в различных условиях и получение поля мощности источников тепла на поверхности образца. Несмотря на это, данный метод обладает рядом ограничений, связанных с излучательной способностью исследуемого материала, зашумлением сигнала, вызванным влиянием внешних факторов, условиями теплообмена образца и окружающей среды, а также ограничением по точности определения мощности источников тепла. Указанные факторы не позволяют использовать метод инфракрасной термографии в эксплуатационных условиях материалов и конструкций для определения их энергетического состояния. В данной работе сделана попытка верифицировать величину рассчитываемой на основе метода ИКТ мощности источников тепла на поверхности материала, возникающих при его деформировании. Для этого использовался разработанный авторами контактный датчик потока тепла [16], устройство которого основано на эффекте Зеебека.

## 1. Материалы и условия эксперимента

Экспериментальное исследование проводилось на серии образцов из титанового сплава ОТ4-0. Геометрия образцов соответствовала ГОСТ 1497-84, размеры образцов (мм) представлены на рис. 1. Химический состав приведен в таблице 1.

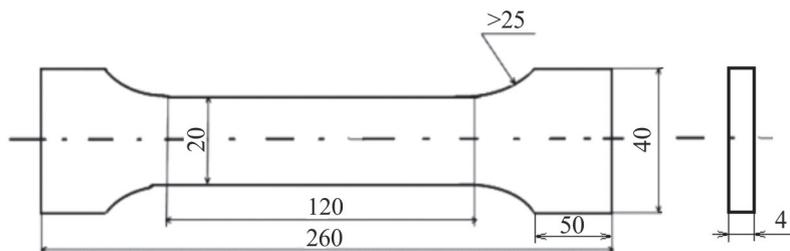


Рис. 1. Геометрия образцов

Таблица 1

Химический состав сплава титана ОТ4-0, %

	Элемент							
	Al	Mn	Zr*	Si*	Fe	C*	AL	O <sub>2</sub> *
Требования ОСТ1-90013–81	≤1,4	≤1,3	≤0,30	≤0,15	≤1,5	≤0,10	≤1,4	≤0,18
Факт.	1,1	0,9	0,3	0,004	1,12	0,008	1,1	0,082
	Элемент							
	N <sub>2</sub> *	H <sub>2</sub> *	Σ прочих	Cr+Mn*	Cu+Ni*			
Требования ОСТ1-90013–81	≤0,05	≤0,015	≤0,30	≤0,15	≤0,10			
Факт.	0,012	0,003	0,022	–	0,020			

Примечание. Ti – основа, \* – примеси.

Пробоподготовка осуществлялась в два этапа. Сначала поверхность образцов, предназначенная для инфракрасной (ИК) съемки, полировалась абразивной бумагой (на завершающей стадии полировки размер абразивных частиц не превышал 20 мкм), затем поверхность покрывалась тонким слоем аморфного углерода. Поверхность образцов, на которой устанавливался контактный датчик потока тепла, не требовала дополнительной подготовки. Перед испытанием на нее крепились метки для регистрации перемещения в ходе механического тестирования. На область примыкания датчика потока тепла и поверхности образца наносилась термопаста для улучшения характеристик теплового контакта. На рис. 2 схематично изображена экспериментальная установка, включающая в себя испытательную электромеханическую машину Shimadzu AG-X Plus (300 кН), контактный датчик потока тепла, ИК-камеру FLIR SC5000 и видеоэкстензометр Shimadzu TRViewX240S. ИК-камера имеет следующие характеристики: спектральный диапазон 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. После установки образца в захваты испытательной машины вся система экранировалась ширмой с целью исключения влияния факторов внешней среды и паразитных переотражений. ИК-съемка и запись данных датчика потока тепла, установленного на образце, велись непрерывно во время всего механического теста. Частоты записи ИК-съемки составляла 25 Гц.

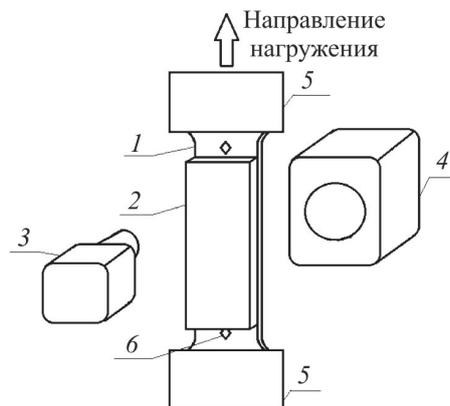


Рис. 2. Схема экспериментальной установки по исследованию баланса энергии в материале при квазистатическом растяжении: 1 – образец; 2 – контактный датчик потока тепла; 3 – видеокамера для регистрации смещения меток; 4 – ИК-камера; 5 – захваты испытательной машины; 6 – метки для регистрации перемещения

Контактный датчик потока тепла предварительно калибровался. Калибровочная функция показывает связь между разностью потенциалов  $U$  (В), возникающей из-за разности температур двух поверхностей элементов Пельтье, из которых состоит контактный датчик потока тепла, и мощностью потока тепла в Вт.

$$W = 0,006U + 0,0042. \quad (1)$$

После настройки всех систем и экранирования установки для каждого образца проводились дополнительные эксперименты по определению условий теплообмена образца с окружающей средой. Эксперименты заключались в регистрации поля температуры поверхности образца после его импульсного точечного нагрева и построения кривой остывания, по которой рассчитывалась константа теплообмена. После этого проводились механические испытания на квазистатическое растяжение плоских образцов с одновременной регистрацией поля температуры поверхности образцов (ИК-съемка), потока тепла (контактным датчиком) и перемещения рабочей зоны образца (по видеоэкстензометру). Скорость движения захватов варьировалась и в различных испытаниях составляла 5 и 10 мм/мин, что соответствовало скорости деформации  $7,7 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$  и  $15 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ . На рис. 3 показана характерная диаграмма деформирования образцов, построенная на основе данных видеоэкстензометра.

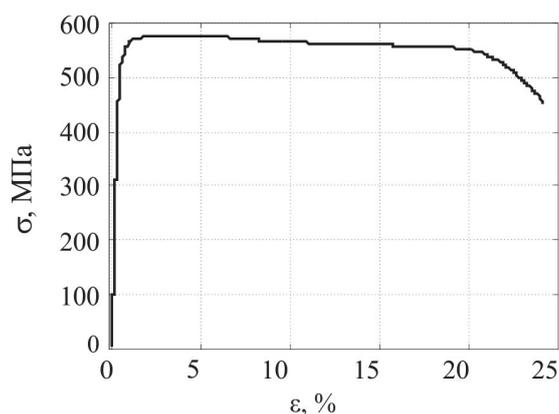


Рис. 3. Характерная диаграмма деформирования образцов из титанового сплава ОТ4-0

## 2. Оценка мощности источников тепла на основе уравнения теплопроводности

Расчет поля мощности источников тепла по данным ИКТ осуществлялся на основе уравнения теплопроводности

$$\rho c \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} = Q(x, y, z, t) + k \left( \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial z^2} \right), \quad (2)$$

где  $T(x, y, z, t)$  – поле температуры;  $\rho$  – плотность материала;  $c$  – удельная теплоемкость;  $k$  – коэффициент теплопроводности;  $Q(x, y, z, t)$  – поле мощности источников тепла;  $x, y, z$  – декартовы координаты;  $t$  – время.

Метод ИКТ позволяет регистрировать поле температуры поверхности образца. Контроль распределения температуры по толщине образца данным методом невозможен, по-

этому в экспериментальных исследованиях используются достаточно тонкие образцы, и предполагается, что в этом случае распределение температуры по толщине образца однородно [17, 18].

Для оценки интегральной мощности источника тепла используется уравнение (2), осредненное по объему. Была проведена стандартная процедура осреднения. Разницу  $\theta'(t)$  между средней по объему температурой образца и начальной температурой образца  $T_0$ , находившегося в тепловом равновесии с окружающей средой, определим следующим образом:

$$\theta'(t) = \frac{1}{V} \int_{-a/2}^{a/2} \int_{-b/2}^{b/2} \int_{-h/2}^{h/2} (T(x, y, z, t) - T_0) dx dy dz = \theta(t) - T_0, \quad (3)$$

где  $T_0$  – начальная температура образца, находящегося в тепловом равновесии с окружающей средой;  $a, b, h$  – длина, ширина и толщина образца соответственно;  $V$  – объем.

Запишем граничные условия в виде

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial x} \right|_{x=a/2} &= - \left. \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial x} \right|_{x=-a/2}, \\ -k \left. \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial x} \right|_{x=a/2} &= \frac{g_x}{a} \int_{-a/2}^{a/2} (T(x, y, z, t) - T_0) dx, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $g_x$  – коэффициент теплообмена образца с окружающей средой на соответствующей грани образца. Граничные условия по остальным двум направлениям имеют аналогичный вид за исключением коэффициентов  $g_i, i = \{x, y, z\}$ .

Интегрируя уравнение (2) по объему с учетом выражения (3) и граничных условий (4), получим усредненное по объему уравнение теплопроводности для расчета поля мощности источников тепла:

$$S(t) = mc \frac{\partial \theta(t)}{\partial t} + \beta V (\theta(t) - T_0), \quad (5)$$

где  $\theta$  – средняя температура исследуемой поверхности;  $T_0$  – начальная температура исследуемой поверхности, находившейся в тепловом равновесии с окружающей средой;  $m$  – масса области, по которой берется средняя температура (плотность титанового сплава ОТ4-0  $\rho = 4457 \text{ кг/м}^3$  [19, 20]);  $c$  – удельная теплоемкость (для ОТ4-0  $456 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$  [19, 20]);  $S(t)$  – мощность источников тепла (Вт);  $\beta$  – параметр материала, определяющий потери тепла, связанные с теплообменом с окружающей средой. Параметр  $\beta$  определяется экспериментально из тестов по остыванию образцов после их импульсного точечного нагрева.

### 3. Экспериментальное определение констант теплообмена образца с окружающей средой

Для расчета мощности источников тепла на основе уравнения (5) по экспериментально полученному полю температур необходимо определить параметр  $\beta$ , отвечающий за потери тепла при взаимодействии образца с окружающей средой. Для этого были проведены дополнительные эксперименты по остыванию образца после его импульсного точечного нагрева. На рис. 4 представлена характерная ИК-картина, получаемая при им-

пульсном точечном нагреве образца и экспериментальные данные средней температуры области нагрева.

Остывание образца после импульсного точечного нагрева можно описать усредненным уравнением теплопроводности (5) с нулевой мощностью источника:

$$0 = mc \frac{\partial \theta(t)}{\partial t} + \beta V (\theta(t) - T_0). \quad (6)$$

Решением этого уравнения будет являться функция вида

$$\theta(t) = C_1 e^{-\frac{\beta}{\rho c} t} + C_2, \quad (7)$$

где  $C_1$  и  $C_2$  – константы;  $\rho$  – плотность.

Для нахождения константы  $\beta$  необходимо аппроксимировать экспериментальные данные изменения средней температуры образца после импульсного точечного нагрева. В качестве аппроксимирующей функции выберем функцию вида

$$y(x) = Ae^{-Bx} + C. \quad (8)$$

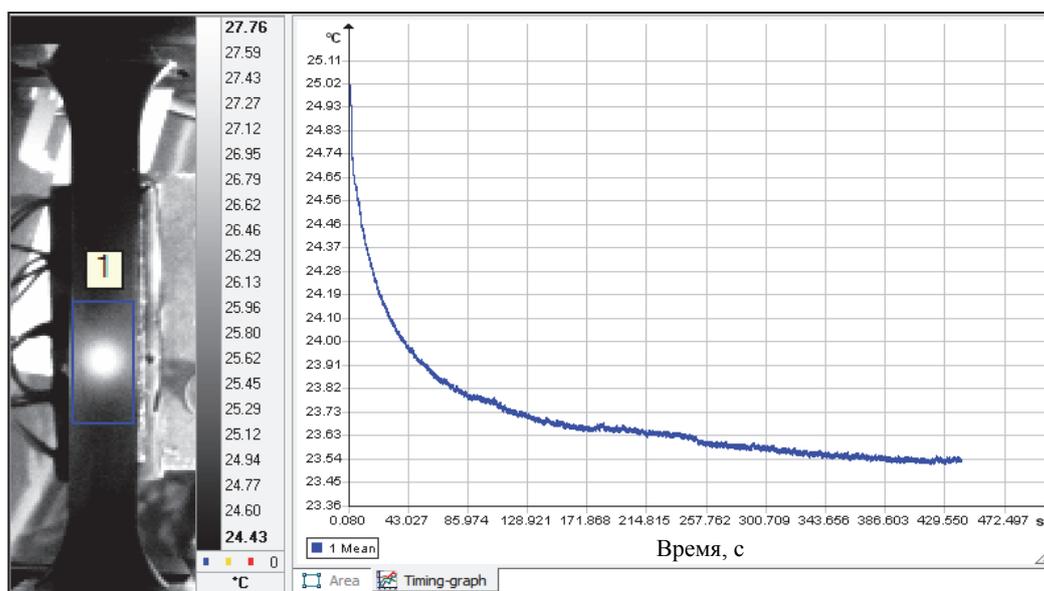


Рис. 4. Характерное ИК-изображение образца при его импульсном точечном нагреве и график зависимости средней температуры области нагрева от времени

Для оценки параметра теплообмена образца с окружающей средой аппроксимировалась только линейная в полулогарифмических координатах часть кривой остывания образца после импульсного точечного нагрева (выделена зеленой линией на рис. 5), то есть часть, которая соответствует экспоненциальной зависимости температуры от времени (7).

Параметр  $\beta$  зависит от условий окружающей среды и не является постоянной величиной для данного материала, поэтому его необходимо определять непосредственно перед началом механических испытаний. В табл. 2 приведены характерные данные, полученные для одного из испытанных образцов: величина произведения плотности и теплоемкости материала, взятых из справочных данных [19, 20], экспериментально полученная величина степени экспоненты  $B$  из уравнения (8) и рассчитанный по этим значениям параметр  $\beta$ .

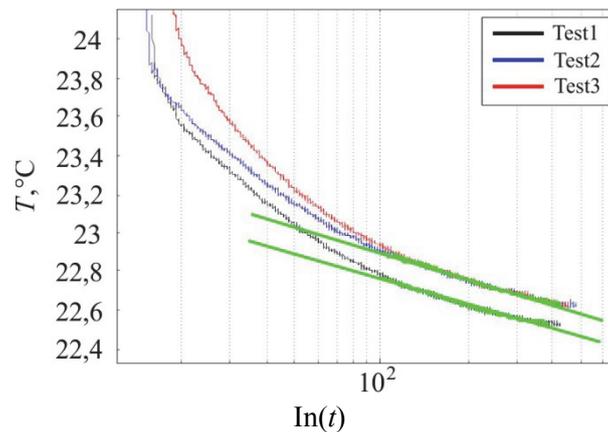


Рис. 5. Аппроксимация участка кривой остывания образца после импульсного точечного нагрева: Test1:  $T = 0,27e^{0,0080} + 22,51$ ; Test2:  $T = 0,3e^{0,0061} + 22,59$ ; Test3:  $T = 0,29e^{0,0065} + 22,6$

Таблица 2

Результат аппроксимации кривой остывания образца после импульсного точечного нагрева

Номер теста	Произведение плотности и коэффициента теплопроводности $\rho c$ , Дж/(м <sup>3</sup> К)	Степень экспоненты в аппроксимации $B$	$\beta$
1	$2,04 \cdot 10^6$	0,0080	$1,632 \cdot 10^4$
2	$2,04 \cdot 10^6$	0,0061	$1,239 \cdot 10^4$
3	$2,04 \cdot 10^6$	0,0065	$1,331 \cdot 10^4$
		Среднее:	$1,4 \cdot 10^4$

В результате согласно описанной выше методике был проведен эксперимент по остыванию образца после его импульсного точечного нагрева, и определены величины параметра  $\beta$  для каждого образца перед его деформированием.

#### 4. Экспериментальное определение величины интегрального источника тепла по данным метода ИКТ

На рис. 6 представлено характерное ИК-изображение поверхности образца на завершающей стадии деформирования непосредственно перед моментом разрушения и экспериментальная зависимость средней по выделенной области температуры от времени всего механического теста. На начальном этапе в результате термоупругого эффекта средняя температура поверхности образца падает, затем начинает превалировать термопластический эффект, и средняя температура образца начинает расти вплоть до момента образования шейки и полного разрушения.

На основе данных об изменении средней температуры поверхности образца во время механического испытания и полученной экспериментально величине параметра  $\beta$  по формуле (5) была определена зависимость мощности источника тепла от времени.

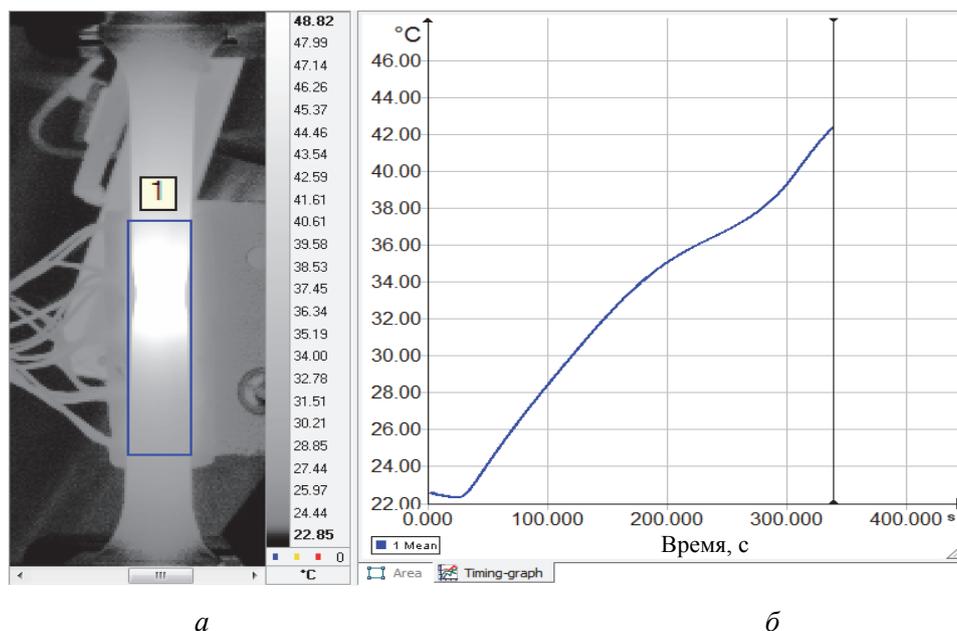


Рис. 6. Характерное ИК-изображение поверхности образца при квазистатическом растяжении в момент перед разрушением (а) и зависимость средней по выделенной области температуры от времени всего испытания (б)

Согласно данным, приведенным в табл. 2, колебания параметра  $\beta$  составляют порядка 30 %. На рис. 7 представлено характерное изменение величины мощности источника тепла от времени с указанием доверительного интервала. На начальном этапе нагружения (0–70 с) колебание параметра  $\beta$  практически не сказывается на величине мощности источника тепла. Начиная с 70-й секунды, влияние параметра  $\beta$  становится значительным. В этот период времени максимальная величина стандартного отклонения мощности источника тепла, рассчитанного при средней величине  $\beta$ , составляет 0,27.

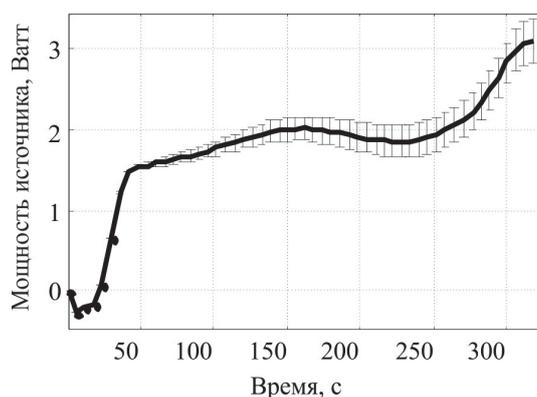


Рис. 7. Величина мощности источника тепла, рассчитываемая по данным ИКТ при среднем значении  $\beta$  с указанием доверительного интервала

На рис. 8, 9 представлены зависимости средней по области на поверхности образца температуры, рассчитанной мощности источников тепла и силы прикладываемой нагрузки от времени для двух скоростей деформирования  $7,7 \cdot 10^{-4}$  и  $15 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ .

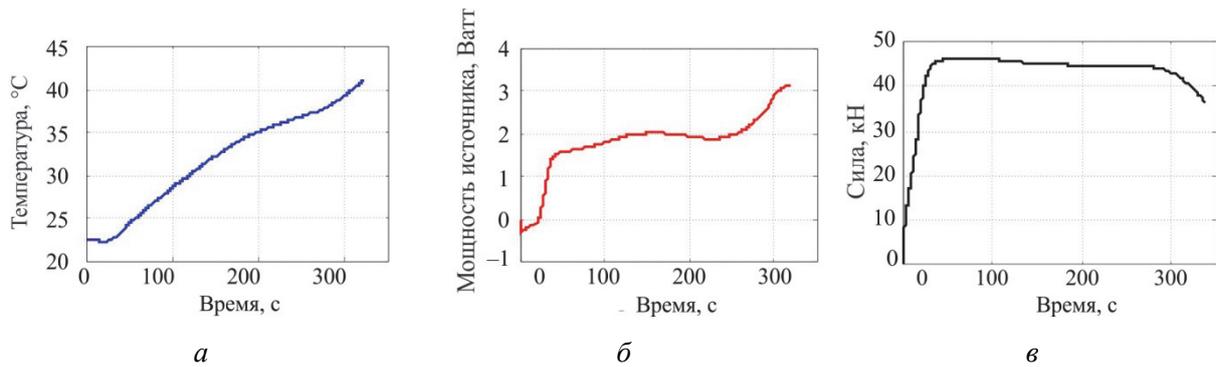


Рис. 8. Характерная зависимость средней по области температуры от времени при квазистатическом растяжении (а); соответствующая зависимость интегральной величины мощности источника тепла от времени по данным ИКТ (б); диаграмма нагрузки (в). Скорость деформации  $7,7 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$

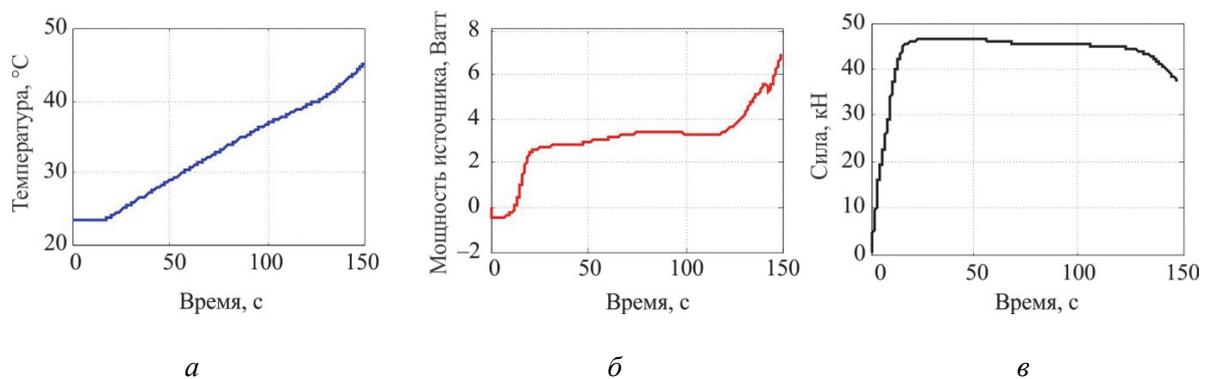


Рис. 9. Характерная зависимость средней по области температуры от времени при квазистатическом растяжении (а); соответствующая зависимость интегральной величины мощности источника тепла от времени по данным ИКТ (б); диаграмма нагрузки (в). Скорость деформации  $15 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$

Согласно полученным зависимостям практически постоянный тепловой поток устанавливается в промежуток времени 40–250 с при скорости деформирования  $7,7 \cdot 10^{-4}$  и 25–120 с при скорости деформирования  $15 \cdot 10^{-4}$ . На диаграмме нагружения в этот момент наблюдается площадка текучести и слабовыраженное разупрочнение. К моменту образования шейки тепловой поток резко возрастает, что свидетельствует о переходе материала к разрушению.

## 5. Сравнение результатов и обсуждение

Контактный датчик потока тепла непрерывно фиксировал величину мощности источника тепла в той области образца, где он был закреплен. Такая возможность регистрации интегрального потока является одним из преимуществ разработанного датчика, которое позволяет отслеживать энергетическое состояние материала *in situ*. На рис. 10 представлены характерные графики изменения мощности источника тепла во время механических испытаний при различных скоростях деформирования. Графики получены с помощью контактного датчика потока тепла и на основе обработки данных бесконтактного метода регистрации температуры (ИКТ).

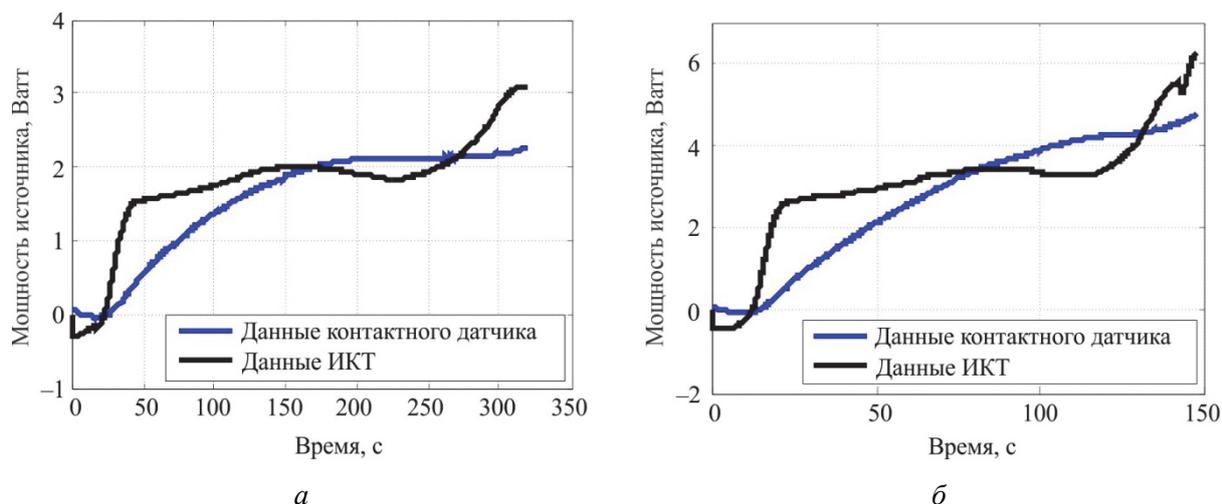


Рис. 10. Сравнение данных, получаемых на основе метода ИКТ, и датчика потока тепла:  
 а – скорость деформации  $7,7 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ ; б – скорость деформации  $15 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$

Метод ИКТ демонстрирует бóльшую чувствительность к изменению теплового потока, чем контактный способ его измерения, но требует значительного времени для обработки данных, учета условий теплообмена и нахождения параметра  $\beta$ , расчета мощности источника тепла по разностной схеме уравнения (5). С другой стороны, контактный датчик, регистрируя непрерывно интегральную величину потока тепла, не позволяет оценить пространственное распределение источников и отслеживать место локализации пластической деформации материала. Не абсолютное соответствие данных теплового потока, получаемых двумя методами, можно объяснить различной чувствительностью приборов, погрешностями численной обработки данных метода ИКТ и определения параметра теплообмена образца с окружающей средой. Открытым остается вопрос о теплоинерционности контактного датчика. В статье [21] приведены сведения о точности показаний датчика при изменяющемся потоке тепла, вызванном источником слабой мощности. При больших значениях потоков тепла инерция датчика должна быть более заметна и может достигать нескольких секунд. Эта задача требует дальнейшего исследования и создания дополнительных алгоритмов обработки данных. Несмотря на это, полученные результаты позволяют говорить о возможности использования контактных и бесконтактных измерений как в комплексе – для верификации величины источников тепла, их распределения на поверхности материала и определения условий теплообмена образца с окружающей средой, так и по отдельности – в качестве экспресс методики оценки состояния материала на различных этапах нагружения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №14-01-96005 и №14-01-00122).

## Библиографический список

1. Особенности механического поведения армко-железа при испытании в режиме гигацикловой усталости / А.Н. Вшивков [и др.] // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2014. – № 4. – С. 18–32.

2. La Rosa G., Risitano A. Thermographic methodology for rapid determination of the fatigue limit of materials and mechanical components // *International Journal of Fatigue*. – 2000. – Vol. 22. – P. 65–73. DOI: 10.1016/S0142-1123(99)00088-2

3. Разработка метода оценки предела выносливости материала по данным инфракрасной термографии / А.И. Терехина [и др.] // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2012. – № 4. – С. 115–127.

4. 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

5. 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

6. Vavilov V.P. Noise-limited thermal/infrared nondestructive testing // *NDT & E International*. – 2014. – Vol. 61. – P. 16–23. DOI: 10.1016/j.ndteint.2013.09.002

7. 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. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.10.036

8. 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. DOI: 10.1016/j.infrared.2015.06.003

9. A thermographic method for remaining fatigue life prediction of welded joints / P. Williams, M. Liakat, M.M. Khonsari, O.M. Kabir // *Materials and Design*. – 2013. – Vol. 51. – P. 916–923. DOI: 10.1016/j.infrared.2015.06.003

10. Benaarbiaa Adil, Chrysochoos André, Gilles Robert. Kinetics of stored and dissipated energies associated with cyclic loadings of dry polyamide 6.6 specimens // *Polymer Testing*. – 2014. – Vol. 34. – P. 155–167. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2014.01.009

11. Nagarajan Srinivasan, Narayanaswamy Raghu, Balasubramaniam Venkatraman Study on the kinetics of thermomechanical response accompanying plastic instability in mild steel // *Mechanics of Materials*. – 2015. – Vol. 80. – P. 27–36. DOI: 10.1016/j.mechmat.2014.09.004

12. Oliferuk W., Maj M., Zembrzycki K. Determination of the Energy Storage Rate Distribution in the Area of Strain Localization Using Infrared and Visible Imaging // *Experimental Mechanics*. – 2015. – Vol. 55. – P. 753–760. DOI: 10.1007/s11340-013-9819-1

13. Ivanov A.M., Lukin E.S. Investigation of the stored energy change of steel Fe360 subjected to equal-channel angular pressing // *Materials Science and Engineering*. – 2009. – Vol. A 503. – P. 45–47. DOI: 10.1016/j.msea.2008.02.054

14. 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. DOI: 10.1080/17686733.2013.852416

15. Heat sources, energy storage and dissipation in high-strength steels: experiments and modeling / S. Dumoulin, H. Louche, O.S. Hopperstad, T. Borvik // *European Journal of Mechanics A/Solids*. – 2010. – Vol. 29. – P. 461–474. DOI: 10.1016/j.euromechsol.2009.11.005

16. Вишивков А.Н. Исследование кинетики роста усталостных трещин в металлах с помощью контактного датчика потока тепла // XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики: сб. тр., Казань, 20–24 августа 2015 г. – Казань: Изд-во Казан. (Приволжского) федер. ун-та, 2015. – С. 824.

17. Calorimetric analysis of dissipative and thermoplastic effects associated with the fatigue behavior of steel / T. Boulanger, A. Chrysochoos, C. Mabru, A. Galtier // *International journal of fatigue*. – 2004. – Vol. 26. – P. 221–229. DOI: 10.1016/S0142-1123(03)00171-3

18. Chrysochoos A., Louche H. An infrared image processing to analyse the calorific effects accompanying strain localization // *International journal of engineering science*. – 2000. – Vol. 38. – P. 1759–1788. DOI: 10.1016/S0020-7225(00)00002-1
19. Теплофизические свойства титана и его сплавов / Пелецкий В.Э. [и др.]. – М.: Металлургия, 1985. – 103 с.
20. Лахтин Ю.М. *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1983. – 359 с.
21. Experimental study of heat dissipation at the crack tip during fatigue crack propagation / A. Vshivkov, A. Iziumova, U. Bar, O. Plekhov // *Fracture and Structural Integrity*. – 2016. – Vol. 35. – P. 131–137.

## References

1. Vshivkov A.N., Prokhorov A.E., Uvarov S.V., Plekhov O.A. Osobennosti mekhanicheskogo povedeniia armko-zheleza pri ispytanii v rezhime gigatsiklovoi ustalosti [Peculiarities of mechanical behavior of armco-iron under fatigue in gigacyclic regime]. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2014, no.4, pp. 18-32.
2. La Rosa G., Risitano A. Thermographic methodology for rapid determination of the fatigue limit of materials and mechanical components. *International Journal of Fatigue*, 2000, vol. 22, pp. 65-73. DOI: 10.1016/S0142-1123(99)00088-2
3. Terekhina A.I., Fedorova A.Yu., Bannikov M.V., Plekhov O.A. Razrabotka metoda otsenki predela vynoslivosti materiala po dannym infrakrasnoi termografii [A development of a method for estimation of the endurance limit of the material using infrared thermography data]. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2012, no. 4, pp. 115-127.
4. Sony Punnosen, 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
5. 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
6. Vavilov V.P. Noise-limited thermal/infrared nondestructive testing. *NDT & E International*, 2014, vol. 61, pp. 16-23. DOI: 10.1016/j.ndteint.2013.09.002
7. 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. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.10.036
8. 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. DOI: 10.1016/j.infrared.2015.06.003
9. Williams P., Liakat M., Khonsari M.M., Kabir O.M. A thermographic method for remaining fatigue life prediction of welded joints. *Materials and Design*, 2013, vol. 51, pp. 916-23. DOI: 10.1016/j.infrared.2015.06.003
10. Adil Benaarbiaa, André Chrysochoos, Gilles Robert. Kinetics of stored and dissipated energies associated with cyclic loadings of dry polyamide 6.6 specimens. *Polymer Testing*, 2014, vol. 34, pp. 155-167. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2014.01.009
11. Srinivasan Nagarajan, Raghu Narayanaswamy, Venkatraman Balasubramaniam. Study on the kinetics of thermomechanical response accompanying plastic instability in mild steel. *Mechanics of Materials*, 2015, vol. 80, pp. 27-36. DOI: 10.1016/j.mechmat.2014.09.004

12. Oliferuk W., Maj M., Zembrzycki K. Determination of the Energy Storage Rate Distribution in the Area of Strain Localization Using Infrared and Visible Imaging. *Experimental Mechanics*, 2015, vol. 55, pp. 753-760. DOI: 10.1007/s11340-013-9819-1
13. Ivanov A.M., Lukin E.S. Investigation of the stored energy change of steel Fe360 subjected to equal-channel angular pressing. *Materials Science and Engineering*, 2009, vol. A 503, pp. 45-47. DOI: 10.1016/j.msea.2008.02.054
14. 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. DOI: 10.1080/17686733.2013.852416
15. Dumoulin S., Louche H., Hopperstad O.S., Borvik T. Heat sources, energy storage and dissipation in high-strength steels: experiments and modeling. *European Journal of Mechanics A/Solids*, 2010, vol. 29, pp. 461–474. DOI: 10.1016/j.euromechsol.2009.11.005
16. Vshivkov A.N. Issledovanie kinetiki rosta ustalostnykh treshchin v metallakh s pomoshch'iu kontaktnogo datchika potoka tepla [The study of fatigue crack growth kinetics in metals by contact heat flux sensor]. *Sbornik trudov XI Vserossiiskogo s'ezda po fundamental'nym problemam teoreticheskoi i prikladnoi mekhaniki*. Kazan, 2015, pp. 824-827.
17. Boulanger T., Chrysochoos A., Mabru C., Galtier A. Calorimetric analysis of dissipative and thermoplastic effects associated with the fatigue behavior of steel. *International Journal of Fatigue*, 2004, vol. 26, pp. 221-229. DOI: 10.1016/S0142-1123(03)00171-3
18. Chrysochoos A., Louche H. An infrared image processing to analyse the calorific effects accompanying strain localization. *International journal of Engineering Science*, 2000, vol. 38, pp. 1759-1788. DOI: 10.1016/S0020-7225(00)00002-1
19. Peletskii V.E. Teplofizicheskie svoystva titana i ego splavov [Thermal properties of titanium and its alloys]. Moscow: *Metallurgiya*, 1985. 103 p.
20. Lakhtin Iu.M. Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov [Metallurgy and heat treatment of metals]. Moscow: *Metallurgiya*, 1983. 359 p.
21. Vshivkov A., Iziumova A., Bar U., Plekhov O. Experimental study of heat dissipation at the crack tip during fatigue crack propagation. *Fracture and Structural Integrity*, 2016, vol. 35, pp. 131-137.