

На правах рукописи



ИЗЮМОВА Анастасия Юрьевна

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ ИСТОЧНИКОВ ТЕПЛА В
ПРОЦЕССЕ УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ
МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ**

01.02.04 – механика деформируемого твёрдого тела

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата физико-математических наук

Пермь – 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
ПЛЕХОВ Олег Анатольевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, заместитель директора по научной работе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, профессор
МАТВИЕНКО Юрий Григорьевич
доктор технических наук, заведующий лабораторией Тепловых методов контроля Института неразрушающего контроля Национального исследовательского Томского политехнического университета, профессор
ВАВИЛОВ Владимир Платонович

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем машиноведения Российской академии наук, г. Санкт-Петербург

Защита состоится «29» января 2015 г. В ____ ч. ____ мин. на заседании диссертационного совета Д 004.012.01 при Институте механики сплошных сред УрО РАН по адресу:

614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1, тел/факс (342) 2378487, сайт: www.icmm.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института механики сплошных сред УрО РАН.

Автореферат разослан « ____ » _____ г.

Учёный секретарь диссертационного совета
доктор технических наук



Березин И.К.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. На сегодняшний день необходимость разработки материалов и конструкций с заранее заданными свойствами, продиктованная современными запросами экономики, требует развития научного подхода, включающего в себя совокупность теоретических моделей, численных алгоритмов и экспериментальных методов верификации текущего состояния материала в ходе эксплуатации, оценки его эксплуатационного ресурса. В большинстве случаев разрушение конструкции обусловлено упруго-пластическим деформированием материала, являющимся причиной эволюции его структуры и изменения физико-механических свойств.

Исследованием взаимосвязи изменения структуры и физико-механических свойств материалов в процессе упруго-пластического деформирования активно занимались многие научные школы под руководством Н.Ф. Морозова, С.Н. Журкова, В.А. Лихачёва, В.И. Бетехтина (Санкт-Петербург); Ю.Н. Работнова, В.В. Болотина, Н.А. Махутова, Ю.Г. Матвиенко, В.С. Ивановой (Москва); В.Е. Панина (Томск); О.Б. Наймарка (Пермь); С.Д. Волкова (Екатеринбург); Б.Е. Патона, Г.В. Карпенко, В.В. Панасюка (Киев) и др.

Согласно общепринятой точке зрения структура материала представляет собой нелинейный ансамбль взаимодействующих дефектов различных структурных уровней. В данной работе эволюция структуры материала, вызванная его упруго-пластическим деформированием, рассматривается с макроскопической (интегральной) точки зрения на основе анализа закономерности процессов накопления и диссипации энергии в деформируемом материале. При таком подходе потеря детализации описания эволюции структуры материала компенсируется универсальностью предложенных методов и возможностью использования их результатов как в рамках классических постановок задач механики сплошных сред, так и в инженерных приложениях.

В качестве основного экспериментального метода исследования в данной работе выбран метод инфракрасной термографии (ИКТ). Актуальность работы связана с тем, что при наличии очевидных преимуществ данного метода, позволяющих проводить бесконтактное измерение температуры различных объектов с высокой точностью, он сравнительно слабо, особенно в Российской Федерации, используется при исследовании физико-механических процессов, сопровождающих деформирование конструкционных материалов. В целом, ИК камеры используются при построении приборов ночного видения и для технической диагностики энергетических и строительных объектов. Основной областью применения данного метода в России является неразрушающий контроль. Данное направление активно развивается в лаборатории НИИ интроскопии Национального исследовательского Томского политехнического университета под

руководством профессора В.П. Вавилова. За рубежом метод ИКТ активно используется при решении задач механики деформируемого твёрдого тела: в США (P. Rosakis, A.J. Rosakis), в Италии (A. Risitano, G. Meneghetti), в Польше (W. Oliferuk), во Франции (A. Chrysochoos, M. Luong) и в некоторых других странах.

В диссертационной работе предложено решение ряда экспериментальных проблем, сопровождающих применение метода ИКТ в задачах механики разрушения, предложены новые алгоритмы обработки данных и оригинальные методы калибровки результатов ИК измерений. В результате создана методика, позволяющая проводить анализ баланса энергии в процессе деформирования и разрушения металлических материалов.

Исследования, проведённые в данной работе, относятся к разделу 23 «Механика деформирования и разрушения материалов, сред, изделий, конструкций, сооружений и триботехнических систем при механических нагрузках, воздействии физических полей и химически активных сред» Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013 - 2020 годы.

Представленная работа выполнена в рамках государственного задания Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук «Структурно-скейлинговые переходы в конденсированных многомасштабных средах, физико-механические свойства перспективных материалов и биологических мезо-(нано)-систем» (номер гос. регистрации 01.2013.50344) и «Экспериментальное и теоретическое исследование структурно-скейлинговых переходов в конденсированных средах с мезодефектами, физикомеханических свойств материалов при переходе в объемное субмикро (нано) кристаллическое состояние» (номер гос. регистрации 01.2010.63554).

Часть результатов была получена при выполнении проектов РФФИ №11-01-00153-а, №11-01-96005-р_урал_а, №12-01-33072-а, №14-01-00122-а, №14-01-96005-р_урал_а.

Целью диссертационной работы является разработка методики исследования термодинамических процессов, связанных с упруго-пластическим деформированием материала, определение баланса энергии в материале на основе данных ИКТ, исследование особенностей диссипации и накопления энергии при локализации пластической деформации, зарождении и распространении трещин в условиях циклического и квазистатического нагружения.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

1. разработка экспериментальной установки для исследования процессов деформирования и распространения трещин, включающей в себя системы бесконтактного измерения температуры (на основе ИК камеры) и контактного

измерения потока тепла (на основе элементов Пельтье), систему регистрации текущей длины трещины оптическим методом и методом падения электрического потенциала, методики калибровки этих систем и обработки получаемых данных;

2. создание и апробация алгоритмов обработки данных ИКТ, в том числе алгоритмов компенсации движения, фильтрации данных, расчета мощности источников тепла на основе уравнения теплопроводности, оценка параметра, определяющего теплообмен образца с окружающей средой и захватами машины;

3. проведение серии экспериментов на чистом металле (армко-железе), конструкционной стали (8X18H10) и титановом сплаве (ОТ-4) с целью исследования баланса энергии в процессе деформирования и разрушения при квазистатическом растяжении, диссипации энергии в вершине трещины при циклическом нагружении.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. разработан и реализован комплекс алгоритмов обработки экспериментальных данных, позволяющий проводить расчёт мощности источников тепла в процессе деформирования металлов с учётом шумов экспериментального оборудования, циклического движения образца и нелокальности тепловыделения и теплообмена образца с окружающей средой;

2. предложена и апробирована новая методика измерения величины J-интеграла на основе данных ИКТ;

3. на основе экспериментальных данных получено новое кинетическое соотношение, описывающее распространение усталостных трещин в металлах по данным скорости диссипации энергии.

Практическая значимость. Разработана экспериментальная установка, включающая в себя системы бесконтактного измерения температуры (на основе ИК камеры) и контактного измерения потока тепла (на основе элементов Пельтье), систему регистрации текущей длины трещины методом падения электрического потенциала.

В работе проведён цикл экспериментов, направленных на исследование особенностей накопления и диссипации энергии в металлах и сплавах в процессе пластического деформирования и разрушения. В результате получены новые данные о термодинамике процесса распространения усталостных трещин.

Объект и метод исследования. Объектом исследования являются процессы накопления и диссипации энергии в конструкционных материалах при квазистатическом и циклическом деформировании. Основное внимание уделяется процессу диссипации энергии и его взаимосвязи с изменением механического поведения, локализацией деформации и кинетикой распространения усталостных трещин.

При проведении исследований использовались **экспериментальные методы ИКТ** и новый метод контактного измерения мощности источников тепла на основе элементов Пельтье, включающий в себя оригинальный контактный датчик, систему охлаждения и термостабилизации, систему измерения, сбора и хранения информации.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Совокупность алгоритмов для анализа данных ИКТ, позволяющая проводить расчёт мощности локализованных источников тепла, и методика верификации значения скорости диссипации, основанная на применении калиброванного контактного датчика потока тепла.

2. Результаты экспериментального исследования процессов диссипации энергии при деформировании металлов и сплавов в условиях квазистатического растяжения гладких образцов и циклического нагружения образцов с трещиной.

3. Полученные на основе метода ИКТ экспериментальные результаты, подтверждающие возможность использования критерия по скорости и величине накопленной энергии для определения момента разрушения материала.

4. Метод численной оценки величины J-интеграла по данным метода ИКТ.

5. Кинетическое соотношение для скорости усталостной трещины как функции скорости диссипации энергии и текущей длины трещины.

Обоснованность и достоверность результатов экспериментальных исследований обеспечивается соблюдением методологии проведения эксперимента, использованием поверенного метрологического оборудования, устойчивой воспроизводимостью результатов и согласием установленных закономерностей с результатами других авторов. Достоверность расчётов и теоретических результатов, полученных в диссертационной работе, обеспечиваются корректностью математических постановок задач, проведением тестовых расчётов, сопоставлением частных численных результатов с аналитическими решениями, результатами других авторов, оригинальными и опубликованными ранее экспериментальными данными.

Апробация результатов работы. Основные результаты работы докладывались на 7 зарубежных конференциях: 12th International conferences on Quantitative InfraRed Thermography, Bordeaux, France, 7-11 July 2014; 13th International Conference on Fracture (ICF13), Beijing (China), June 16-21, 2013; 7th International Conference on Materials Structure and Micromechanics of Fracture (MSMF7), Brno (Czech Republic), July 1-3, 2013; International Conference on Full-Field Measurement Techniques and their Application in Experimental Solid Mechanics (PhotoMechanics 2013), Montpellier, SupAgro (France), May 27-29, 2013; 12th workshop Advanced Infrared Technology and Applications 2013(AITA 2013), 10-13 September, Turin, Italy; 20th European Conference on Fracture (ECF20), Trondheim, Norway, 28 June-04 July 2014; 11-th International fatigue congress (Fatigue 2014),

Melbourne, Australia, 2-7 March, 2014; и на 5 конференциях, проходивших на территории Российской Федерации: XVIII Зимняя школа по механике сплошных сред, Пермь, 18-22 февраля 2013; XX Петербургские чтения по проблемам прочности, посвященные памяти профессора В. А. Лихачева, Санкт-Петербург, 10 – 12 апреля 2012; The 13th International Conference New Trends in Fatigue and Fracture (NT2F13), Moscow (Russia), May 13-16, 2013; International workshop “Failure of heterogeneous materials under intensive loading: experimental and multi-scale modeling”, Perm (Russia), February 10-14, 2014; XXI Петербургские чтения по проблемам прочности, Санкт-Петербург, 15-17 апреля 2014.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 статей, из них 3 статьи в журналах, входящих в международную систему цитирования Web of Science, 8 статей в журналах, входящих в международную систему цитирования Scopus, 11 статей в журналах, входящих в перечень включённых Высшей аттестационной комиссией России в список изданий, рекомендуемых для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук.

Личный вклад автора заключается в анализе текущего состояния исследований по теме работы, создании алгоритмов, формулировке основных результатов и выводов диссертации. Автор непосредственно разрабатывала и реализовывала методы, алгоритмы и программы обработки экспериментальных данных. Автор лично проводила экспериментальные исследования, представленные в работе, и обрабатывала полученные экспериментальные результаты.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и списка литературы. Объём диссертации составляет 120 страниц, включая 42 рисунка и 10 таблиц. Список литературы содержит 110 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, проведён краткий обзор современного состояния исследований в области механики деформируемого твёрдого тела, использующих метод ИКТ, сформулированы основные проблемы метода ИКТ, затрудняющие его использование при исследованиях, определены цели и задачи работы, перечислены полученные результаты, раскрыта их новизна, научная и практическая значимость, представлены положения, выносимые на защиту, и описана структура диссертации.

Первая глава диссертации носит обзорный характер. В ней приведены основные достижения, полученные ранее при исследовании процессов накопления и диссипации энергии при деформировании и разрушении металлов. Рассмотрены основные экспериментальные методы исследования термодинамики пластического течения,

проанализированы известные экспериментальные результаты, касающиеся определения баланса энергии в процессе деформирования и разрушения металлов. Проведён критический анализ использования метода ИКТ для исследования задач механики деформируемого твёрдого тела, определены основные проблемы применения данного метода и намечены пути их решения.

Вторая глава диссертационной работы посвящена разработке алгоритмов, позволяющих использовать метод ИКТ для исследования термодинамических процессов, протекающих при разрушении материалов.

В разделе 2.1 приведено описание условий проведённых экспериментов, представлены физико-механические свойства исследованных материалов и геометрии образцов.

Раздел 2.2 посвящен описанию математических методов обработки экспериментальных данных температуры, включающих в себя алгоритм компенсации относительного движения объектива ИК камеры и образца при циклических испытаниях, алгоритмов фильтрации шумов, вызванных воздействием окружающей среды, и расчету поля мощности источников тепла на основе обработанных данных. На рисунке 1 представлены поля температуры у вершины усталостной трещины до и после применения алгоритмов компенсации движения и фильтрации данных.

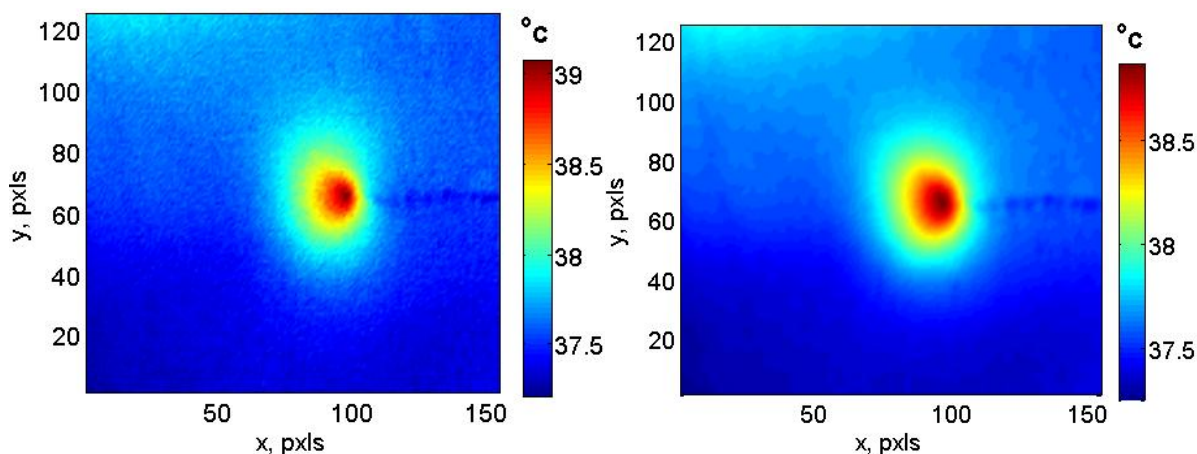


Рис. 1. Поле температуры у вершины растущей трещины: исходные данные (слева), полученные методом ИКТ, и данные, после применения алгоритмов обработки (справа).

Необходимость разработки алгоритма компенсации движения была продиктована особенностями экспериментальных данных температуры поверхности образца при циклическом нагружении. Эти особенности связаны с перемещением образца, закрепленном в испытательной машине, относительно регистрирующей поле температур ИК камеры, находящейся на неподвижной опоре.

Созданный в рамках диссертационной работы алгоритм компенсации движения был реализован в пакете программ Matlab. Для определения текущего вектора

перемещения производился автоматический поиск (на основе дискретного Фурье-преобразования) маркерной зоны, заданной на первом кадре экспериментально полученного ИК фильма, на каждом последующем кадре фильма. На основе предположения о том, что образец движется как жесткое тело, найденный вектор перемещения использовался для компенсации его относительного смещения.

Для расчета поля мощности источников тепла использовалось усредненное по толщине образца уравнение теплопроводности (A. Chrysochoos, H. Louche. An infrared image processing to analyze the calorific effects accompanying strain localization // Int. J. Eng. Sci. 2000. Vol. 38. P. 1759-1788):

$$S(x, y, t) = \rho c \left(\dot{\theta}(x, y, t) + \frac{\theta(x, y, t) - T_0}{\tau} \right) - k \Delta \theta(x, y, t), \quad (1)$$

где θ – средняя температура, $\Delta \theta$ – лапласиан от средней температуры, T_0 – температура окружающей среды, ρ – плотность материала, c – удельная теплоемкость, k – коэффициент теплопроводности, $S(x, y, t)$ – искомое поле мощности источников тепла ($\text{Вт}/\text{м}^3$), τ – параметр, отражающий теплообмен образца с окружающей средой в направлении, перпендикулярном поверхности образца.

Значение параметра τ определялось из анализа результатов эксперимента по исследованию остывания образца после локального нагрева. Процедура идентификации состояла из двух этапов. Первый из них включал локальный нагрев образца на 3-5 градусов и его остывание до комнатной температуры. Второй этап идентификации параметра τ заключался в направленном поиске величины, дающей решение нелокального уравнения теплопроводности, совпадающее с экспериментальными данными.

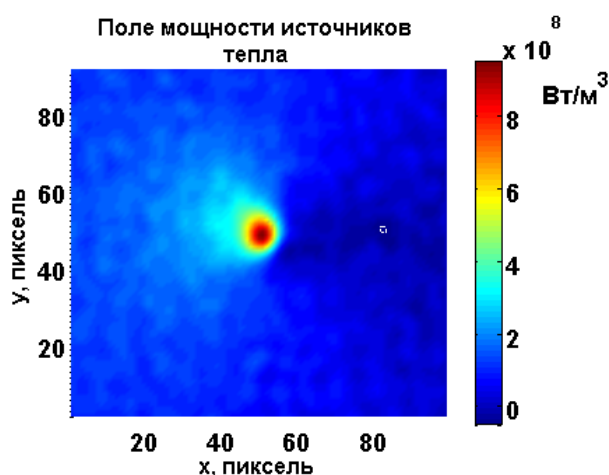


Рис. 2. Поле мощности источников тепла у вершины трещины.

Удельная мощность источников тепла определялась численно (методом конечных разностей) на основе уравнения теплопроводности (1) с использованием полученного после обработки экспериментальных данных поля температуры. На рисунке 2 представлено рассчитанное поле мощности источника тепла у вершины усталостной трещины. Для оценки временной производной применялась явная правая конечно-разностная схема. Лапласиан функции температуры был

вычислен с помощью центральной конечно-разностной аппроксимации по трёхточечному шаблону.

В заключительном разделе 2.3 рассмотрены методы калибровки экспериментальных данных ИК измерений, позволяющие гарантировать точность расчета мощности источников тепла в материале. Для независимого измерения скорости диссипации энергии и калибровки данных ИК измерений был разработан контактный датчик потока тепла, работающий на основе элементов Пельтье. Перед проведением

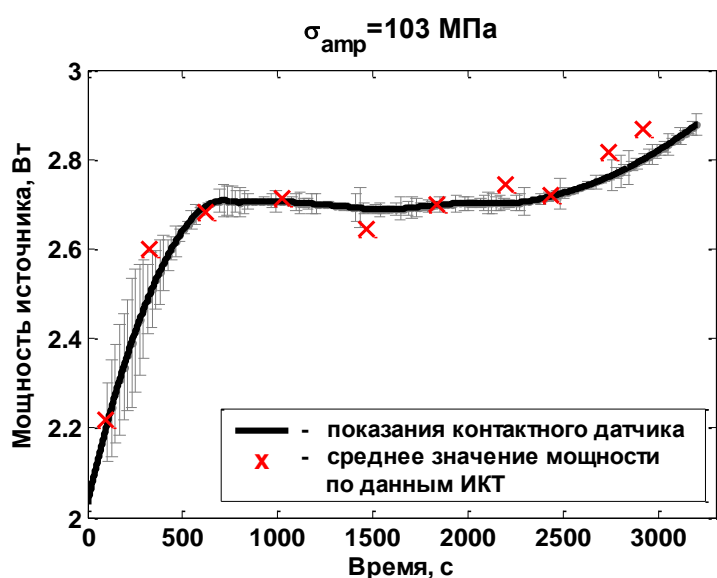


Рис 3. Графики зависимости мощности источника тепла от времени по данным контактного датчика и ИКТ.

эксперимента контактный датчик калибровался двумя способами: с использованием источника тепла заданной мощности, повторяющим геометрию образца, и на основе аналитического решения термоупругой задачи. Приборная погрешность контактного датчика составила около 1%.

Характерные результаты совместного использования обеих методик измерения мощности источников тепла в процессе циклического деформирования образца с трещиной (сталь 8X18H10) с амплитудой приложенного напряжения 103 МПа при частоте 10 Гц представлены на рисунке 3 (с указанием отклонения от исходных показаний контактного датчика после подавления шума). В процессе механического теста контактный датчик, покрывающий область образца с растущей трещиной, записывал непрерывный сигнал потока тепла, а ИК камера с другой стороны образца периодически фиксировала поле температуры у вершины трещины, длительность каждого ИК фильма составляла 100 с (на рисунке 3 знаком “x” отмечены средние значения мощности источника тепла, определённые из анализа данных ИКТ). Расчет мощности источников тепла по данным ИКТ оказался чувствительным к выбору параметра теплообмена образца с окружающей средой. Экспериментальное определение этого параметра на основе данных по остыванию образцов после точечного нагрева позволило получить мощности источников тепла по данным ИКТ, близкие по значению к показаниям контактного датчика (коэффициент корреляции данных мощности источника тепла по показаниям контактного датчика и рассчитанных на основе ИК данных составил 0.9). По результатам анализа полученных данных можно утверждать,

что мощность источника тепла в вершине усталостной трещины адекватно измеряется двумя независимыми методами.

В **третьей главе** представлены результаты расчета изменения запасаемой в материале энергии в процессе деформирования и значения J-интеграла по данным ИКТ. На основе анализа баланса энергии у вершины усталостной трещины предложена оценка кинетики её роста.

Раздел 3.1 данной главы посвящен экспериментальному исследованию эволюции доли запасаемой в материале энергии при усталостных и квазистатических испытаниях на основе данных ИКТ. Исследование изменения запасаемой в материале энергии при квазистатическом растяжении проводилось на гладких образцах из титанового сплава ОТ-4 и армко-железа, при циклическом нагружении на образцах из титанового сплава ОТ-4, ослабленных центральным отверстием. Предполагалось, что часть работы пластической деформации переходит в тепловую энергию, а оставшаяся часть запасается в материале в качестве энергии дефектов кристаллической решетки, сопровождающей пластическую деформацию. В связи с тем, что в исходном недеформированном состоянии материал уже обладает некоторой внутренней энергией, связанной с присутствием в нем дефектов, в данной работе определяется изменение запасаемой энергии от этого начального значения. Таким образом, изменение запасаемой в материале энергии при квазистатическом растяжении рассчитывалось как интеграл с переменным верхним пределом от разности между значениями мощности пластической деформации и скорости диссипации энергии:

$$E_{stor}(t) = \int_0^t F(t') V dt' - \int_0^t \left(\int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} s(x, y, t') dx dy \right) dt', \quad (2)$$

где x_1, x_2, y_1, y_2 – координаты зоны пластической деформации, $F(t)$ – сила нагружения, V – скорость деформирования, $s(x, y, t)$ – поле мощности источников тепла.

При циклическом нагружении работа пластической деформации определялась на основе решения Хатчинсона-Райса-Розенгрена для распределения напряжений у вершины трещины. Изменение запасаемой в материале энергии рассчитывалось аналогично соотношению (2):

$$E_{stor}(x, y, t) = \int_0^t \frac{n}{n+1} \frac{J(t') \sigma_e^{n+1}(\theta(x, y), n)}{I_n r(x, y)} dt' - \int_0^t s(x, y, t') dt', \quad (3)$$

где n – коэффициент упрочнения материала ($n=4$), I_n – функция коэффициента упрочнения, r и θ – полярные координаты ($x=r\cos\theta$, $y=r\sin\theta$), σ_e – табулированная функция, $J(t)$ – J-интеграл, являющийся функцией приложенной циклической нагрузки и длины усталостной трещины ($J(t)=\sigma_\infty(t)\pi L/(2E)$).

На рисунке 4 представлены характерные результаты расчетов изменения запасаемой в материале энергии, работы пластической деформации и диссипированной энергии для образцов из титанового сплава ОТ-4 при квазистатическом растяжении (А) и при циклическом нагружении (Б).

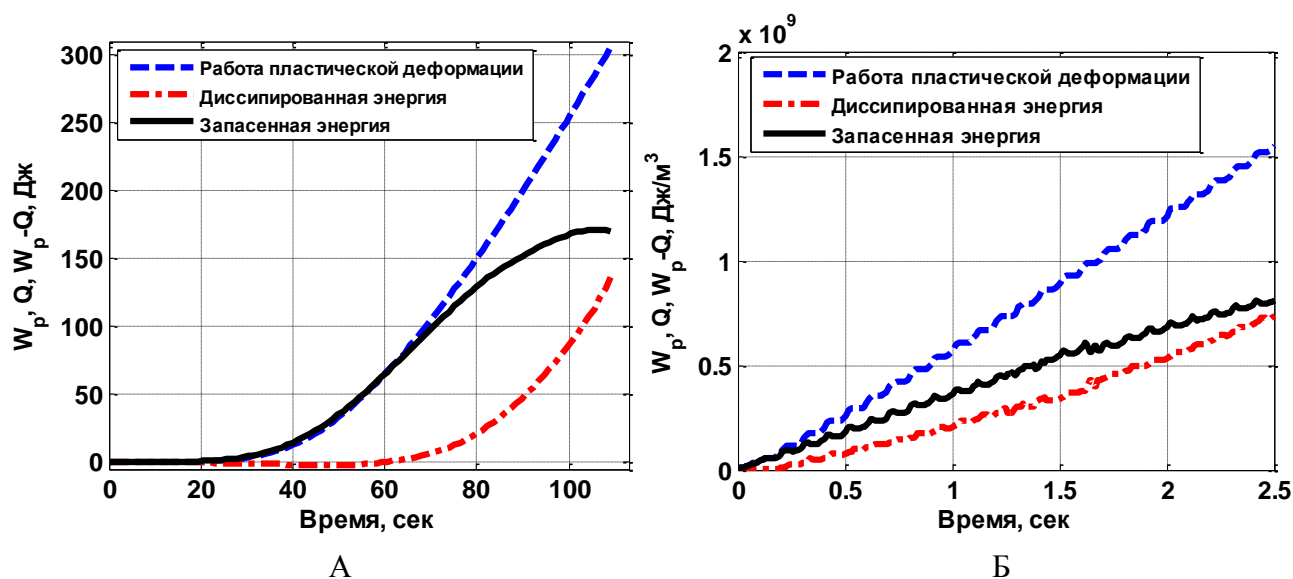


Рис 4. Зависимость изменения запасаемой в материале энергии, работы пластической деформации и диссипированной энергии от времени для образцов из титанового сплава ОТ-4 при квазистатическом растяжении (А) и при циклическом нагружении (Б).

Анализ полученных результатов позволяет утверждать, что при приближении материала к моменту разрушения изменение запасаемой в материале энергии достигает некоторого критического значения, а скорость запасания энергии стремится к нулю. Полученные данные находятся в согласии с результатами работ В.В. Федорова, В.С. Ивановой и др., которые показали наличие критерия разрушения, основанного на значении изменения запасаемой в материале энергии при его деформировании. Сходство в поведении термодинамических характеристик процесса разрушения при квазистатическом и циклическом нагружении говорит о том, что изменение запасаемой в материале в процессе деформирования энергии может являться универсальным параметром, устанавливающим стадию процесса деформирования, определяющим степень накопления дефектов, и может использоваться для предсказания момента разрушения.

В разделе 3.2 представлена методика расчета J-интеграла по данным мощности источника тепла у вершины трещины. Основанная на определении площади под кривой нагружения методика оценки J-интеграла для разной геометрии образцов при различных условиях нагружения подробно описана в стандартах ESIS P2-92 (1992) и ASTM E1820 (2005). В диссертации показано, что значение J-интеграла может быть оценено с точки зрения термодинамики процесса разрушения на основе данных о диссипации энергии в

процессе роста трещины. Разработка методики применения данных ИКТ для определения величины J-интеграла базируется на предположении, что большая часть работы пластической деформации при циклическом нагружении переходит в тепло. Работу пластической деформации можно выразить следующим образом:

$$w_p(\theta, r, t) = \int_0^{\varepsilon_p} \sigma d\varepsilon = \frac{n}{n+1} \frac{J(t) \sigma_e^{n+1}(\theta, n)}{I_n r}. \quad (4)$$

В соотношении (4) поле напряжений σ определяется решением Хатчинсона-Райса-Розенгрена для распределения поля напряжений у вершины трещины в условиях пластической деформации. Используя выражение (4) и допущение о том, что большая часть работы пластической деформации переходит в тепло, J-интеграл можно выразить как:

$$J_1(x, t) = S_{int}(x, y_{tip}, t) \frac{n+1}{n} \frac{I_n}{\sigma_e^{n+1}(0, n)} |x_{tip} - x|, \quad (5)$$

где y_{tip} и x_{tip} – координаты вершины трещины; x – расстояние от вершины трещины в пределах размера зоны пластической деформации; S_{int} – интегральное значение теплоты, полученное как интеграл с переменным верхним пределом от мощности источников тепла $Q(x, y, t)$.

Для проверки точности расчета значения J-интеграла по данным ИКТ оно было рассчитано инженерным методом, предложенным Райсом, по площади петли гистерезиса:

$$J_2 = \beta \frac{S}{h(w-a)}, \quad (6)$$

где S – площадь петли гистерезиса, соответствующая половине цикла нагружения, β – константа, отражающая долю работы пластической деформации, переходящей в тепло ($\beta \approx 90\%$), w – ширина образца, a – длина трещины, h – толщина образца.

Следуя предположению о том, что большая часть работы пластической деформации переходит в тепло, уравнение (6) можно переписать в виде:

$$J_3(t) = \frac{Q_{int}(t)}{h(w-a)}, \quad (7)$$

где Q_{int} – осредненное по поверхности поле источников тепла.

Для расчета значения J-интеграла были проведены эксперименты по исследованию температурного поля образца из титанового сплава ОТ-4, ослабленного трещиной, при циклическом нагружении. На рисунке 5 представлены характерные результаты расчета значения J-интеграла тремя способами. Анализ результатов позволяет сделать вывод, что значение J-интеграла, определенного энергетическим путем, достаточно хорошо

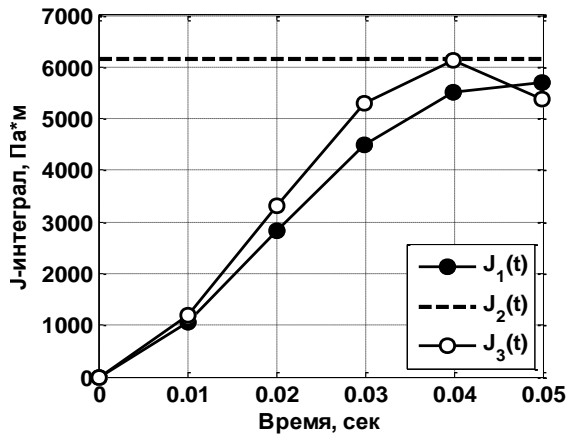


Рис. 5. Изменение значения J -интеграла за половину цикла нагружения ($J_1(t)$ - J -интеграл, рассчитанный на основе HRR-решения (5), J_2 - J -интеграл, рассчитанный стандартным инженерным методом (6), $J_3(t)$ - J -интеграл, полученный с помощью энергетического подхода

частотой нагружения 10 Гц.

Длина трещины в процессе испытаний определялась с помощью метода падения электрического потенциала. На основе термодинамических соотношений и баланса энергии у вершины трещины было показано, что в первом приближении при стационарном режиме распространения скорость усталостной трещины может быть описана соотношением, аналогичным уравнению А. Хеда, т.е. пропорциональна произведению скорости диссипации энергии и текущей длины трещины:

$$\frac{da}{dN} \sim Qa. \quad (8)$$

Рисунок 6 иллюстрирует экспериментальные данные, полученные с помощью метода ИКТ и контактного датчика потока тепла.

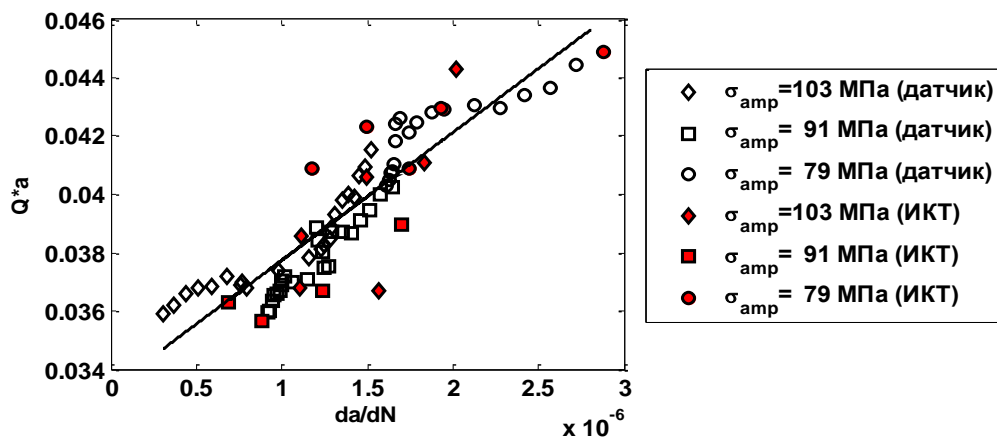


Рис. 6. Экспериментально полученная зависимость (8) при различных амплитудах приложенного напряжения в условиях стационарного режима распространения усталостной трещины по данным контактного датчика потока тепла и по результатам ИКТ.

Экспериментальные точки, полученные двумя различными методиками, демонстрируют хорошее соответствие, что свидетельствует об адекватности данных, рассчитываемых по полю температуры на основе уравнения теплопроводности (1). Методика, основанная на применении контактного датчика потока тепла, позволяет оценить зависимость мощности потока тепла от времени, однако не предоставляет информации о пространственном расположении источников (в отличие от метода ИКТ), что является важным при определении позиции трещины, ее форме и размерах.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В работе проведено экспериментальное исследование процессов накопления и диссипации энергии в металлах при пластическом деформировании и разрушении. В рамках работы создан комплекс алгоритмов обработки данных ИКТ, позволяющий проводить анализ мощности локальных источников диссипации энергии в процессе механических экспериментов. Для верификации полученных данных предложен и реализован метод измерения источников тепла с помощью контактного датчика на основе элементов Пельтье, а также разработаны методики его калибровки. Проведён цикл экспериментов по анализу динамики локальных источников тепла, возникающих в процессе упруго-пластического деформирования исследуемых материалов.

К основным результатам работы можно отнести следующее.

1. Экспериментальная установка для исследования процессов деформирования и распространения трещин, включающая в себя системы бесконтактного измерения температуры (на основе ИК камеры) и контактного измерения потока тепла (на основе контактного датчика потока тепла), систему регистрации текущей длины трещины.
2. Комплекс программ для обработки данных ИКТ, позволяющий исследовать динамику локальных источников тепла при квазистатических и циклических испытаниях металлов и сплавов.
3. Экспериментальные данные исследования процесса диссипации энергии в металлах и сплавах при локализации деформации в условиях квазистатического растяжения и в вершине усталостной трещины при циклическом нагружении. Показана возможность использования критерия по скорости и величине накопленной энергии для определения момента разрушения материала.
4. Метод оценки величины J -интеграла по данным ИКТ.

5. Кинетическое соотношение, полученное по экспериментальным данным контактного датчика на основе элемента Пельтье и ИКТ для скорости роста усталостной трещины как функции скорости диссипации энергии и текущей длины трещины.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Изюмова А.Ю., Плехов О.А., Вшивков А.Н., Прохоров А.А., Уваров С.В. Исследование скорости диссипации энергии в вершине усталостной трещины // ПЖТФ. – 2014. – т. 40. – вып. 18. – С. 72-77 (A.Yu. Izyumova, O.A. Plekhov, A.N. Vshivkov, A.A. Prokhorov, S.V. Uvarov. Studying the Rate of Heat Dissipation at the Vertex of a Fatigue Crack // Technical Physics Letters. – 2014. – Vol. 40. – No. 9. – P. 830–832).
2. Iziyumova A., Plekhov O. Calculation of the energy J-integral in plastic zone ahead of a crack tip by infrared scanning // Fatigue Fract Engng Mater Struct. – 2014. – Vol. 37. – P. 1330–1337.
3. Fedorova (Iziyumova) A., Bannikova M., Terekhina A., Plekhov O. Heat dissipation energy under fatigue based on infrared data processing // Qualitative Infrared Thermography Journal. – 2014. – Vol. 11. – Issue 1. – P. 2-9.
4. Kostina A., Fedorova (Iziyumova) A., Plekhov O. Energy dissipation and storage in iron under plastic deformation (experimental study and numerical simulation) // Fracture and Structural integrity. – 2014. – Vol. 27. – P. 28-37.
5. Plekhov O., Fedorova (Iziyumova) A., Kostina A., Panteleev I. Theoretical and experimental study of strain localization and energy dissipation at fatigue crack tip // Procedia Materials Science. – 2014. – Vol. 3. – P. 1020 – 1025.
6. Fedorova (Iziyumova) A.Yu., Bannikov M.V., Plekhov O.A. A study of the stored energy in titanium under deformation and failure using infrared data // Fracture and structural integrity. – 2013. – Vol. 24. – P. 81-88.
7. Fedorova (Iziyumova) A., Bannikov M., Plekhov O. Study of stored energy evolution at fatigue crack tip based on infrared data // Proceeding of the 13th International Conference on Fracture (ICF13), 16-21 June, Beijing, China. – 2013. – S18-039.
8. Bannikov M., Fedorova (Iziyumova) A., Terekhina A., Plekhov O., Naimark O. Experimental study of heat dissipation process into fatigue crack tip in titanium alloys // Proceeding of the 13th International Conference on Fracture (ICF13), 16-21 June, Beijing, China. – 2013. – S11-005.
9. Банников М.В., Федорова (Изюмова) А.Ю., Терехина А.И., Плехов О.А. Экспериментальное исследование фрактальных закономерностей роста усталостной

трещины и диссипации энергии в ее вершине // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2013. – № 2. – С. 21-36.

10. Fedorova (Iziumova) A.Yu., Bannikov M.V., Plekhova E.V., Plekhov O.A. Infrared thermography study of the fatigue crack propagation // Fracture and Structural Integrity. – 2012. – Vol. 21. – P. 46-53.
11. Plekhov O., Bannikov M., Terekhina A., Fedorova (Iziumova) A. Infrared Study of Heat Dissipation under Fatigue Crack Propagation // Proceedings of the 4th International Conference on CRACK PATHS (CP 2012), 19 - 21 September, Gaeta, Italy. – 2012. – P. 693-700.
12. Федорова (Изюмова) А.Ю., Банников М.В., Плехов О.А. Применение метода инфракрасной термографии для определения параметров линейной механики разрушения // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2012. – № 2. – С. 214-225.