

нии зависит от действующих нагрузок и геометрических характеристик болтов. Конструктивным решением для увеличения прочности болтового соединения является добавление втулок в конструкцию, что позволило увеличить диаметр поперечного сечения болтового соединения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Броек Д. Основы механики разрушения.— М: Высш. школа, 1974.— 368 с. 2. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения.— М: Наука, 1974. — 640с. 3. Кравчук А.С., Смалюк А.Ф., Чигарев А.В. ANSYS для инженеров.— М.: Машиностроение, 2004.— 510с. 4. Решетов Д.Н. Детали машин. Учебник для ВУЗов. 3-е издание М.: Машиностроение, 1974.

УДК 539.620.171.178-179

*Василевич Ю.В., Мойсейчик Е.А., Язневич А.М.*

## **ПРИМЕНЕНИЕ ТЕРМОГРАФИИ ПРИ ДЕФОРМИРОВАНИИ СТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ С КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ДЕФЕКТАМИ**

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь*

### I. Введение

На тепловые эффекты при деформирования твердых тел пристальное внимание обращается с начала 19 века [1,2]. Э.Эдлундом экспериментально доказано, что при увеличении в процессе деформации объема материала происходит снижение его температуры и наоборот при разгрузке [1]. При этом было установлено, что между изменением температуры и величиной приложенной нагрузки существует квадратичная зависимость. В 1855г. В.Томсон опубликовал свои теоретические идеи по термоупругому деформированию твердых тел и привел линейную зависимость для связи между мгновенными изменениями температуры тела и напряжения. Выводы В.Томсона хорошо подтверждались экспериментами Дж. Джоуля. В начале 20 века в опытах Хорта, Тейлора, Фаррена, Квинни [3] доказывалось, что лишь около 90% всей механической работы деформирования тела превращается в тепло, а другая часть работы накапливается в испытываемом деформационном упрочнение материале. В это же время появляются исследования по применению теплового эффекта при анализе различных видов деформаций стержней [3]. Проф. С.И.Дружинин обосновал возможность определения предела упругости материала по данным измерения температуры растягиваемого стандартного образца с большей чем механическими методами точностью [4]. А.Надаи предложил по изменению температуры деформации определять предел текучести [3]. Сдерживающим фактором для более широкого применения эффекта тепловыделения в экспериментальных исследованиях длительное время были трудности экспериментальной фиксации полей температур деформируемого тела. Появление компьютерных методик анализа инфракрасного теплового излучения [5] деформируемого тела позволило практически одновременно, за доли секунды, сканировать температурное поле поверхности деформируемого тела с высокой точностью (0,1 К и меньше). На основе компьютерных методик были созданы высокочувствительные экспериментальные системы исследования полей температур деформируемых тел (с точностью измерений до 0,001К) и напряжений при упругой работе материала [6]. Обобщение основных работ по термоупругости и термопластичности деформируемых тел, выполненных до 1990-х годов, дано в монографии Мэнджойна [7]. Тепловые методы активно используются при исследованиях в области конструкционного материаловедения и неразрушающего контроля [8].

В настоящей статье ставится цель продемонстрировать возможности термографии деформируемых образцов и стальных элементов с конструктивно-технологическими надрезами для выявления их предельного состояния.

## II. Теплообразование при растяжении стандартных образцов

Экспериментально установлено [1-4,6-7], что при деформировании растяжением стальных стандартных образцов происходит изменение температуры деформируемого материала. Такое изменение температуры деформируемых объемов образцов из различных марок стали протекает в соответствии со схемой рис. 1.

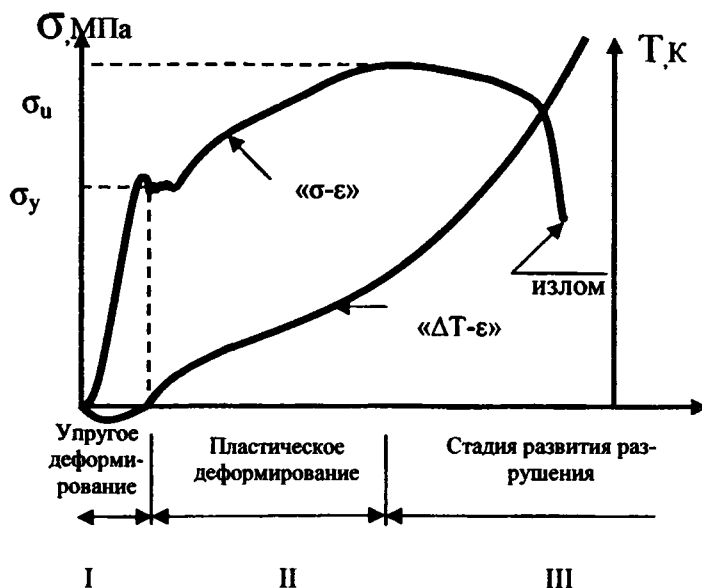


Рис. 1. Изменение температуры ( $\Delta T$ )

Этот процесс можно разделить на три стадии: на I-ой стадии при упругой работе металла происходит понижение его температуры (примерно до градуса при больших объемах деформируемого материала); для второй стадии характерно значительное повышение температуры (средняя температура рабочей зоны повышается на несколько десятков градусов); на последней стадии происходит резкий подъем температуры материала в окрестности излома и последующее его охлаждение. Такой ход изменения температуры деформируемых объемов материала предопределяется изменением в процессе нагружения материала его дислокационной структуры. При увеличении нагрузки на образец идет рост плотности дислокаций в материале, смена механизма и величины деформационного упрочнения. Выделение тепла происходит неравномерно по объему материала.

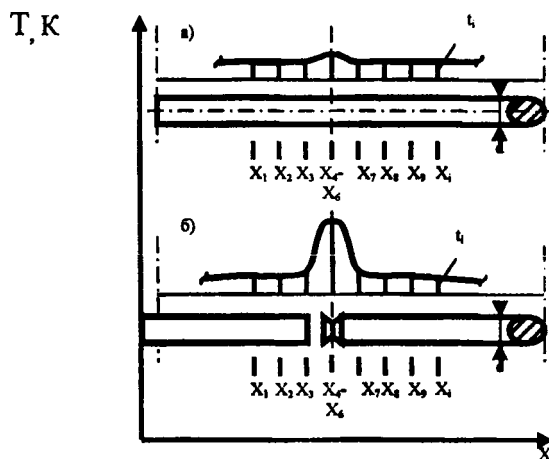


Рис. 2. Схемы распределения температуры вдоль оси гладкого (а) и надрезанного (б) образцов

Наиболее разогретыми (источниками тепла) являются зоны скольжения в материале, для которых характерно появление полос Чернова-Людерса. На таких участках активизируются химические процессы в структурных составляющих и на их границах. Так как скорость распространения тепла деформирования превышает скорость развития пластических деформаций по сечению, то еще до появления на поверхности образца полос Чернова-Людерса термограф фиксирует повышение температуры поверхности. При этом процесс протекания пластического деформирования является не одновременным актом[9]. Изменение температуры вдоль оси образца происходит в соответствии со схемой рис.2, а.

### III. Тепловыделение при деформировании образцов с дефектами

Схемы цилиндрических образцов - бездефектного (стандартного) и образца с надрезом (дефектного) - приведены на рис. 3.

Теплообразование в надрезанном образце зарождается и протекает в наиболее ослабленных сечениях. Для такого образца также характерна стадийность в развитии процесса тепловыделения. В зоне надреза наблюдаются названные в п.2 стадии образования тепла. При этом тепло, образующееся в надрезе, распространяется вдоль стержня и суммируется с теплом деформирования остальной части стержня. Изменение температуры вдоль оси надрезанного цилиндрического образца при его растяжении протекает по схеме рис.2б. При деформировании листовых образцов с надрезами (отверстия, вырезы и т.д.) по изменению тепловых полей поверхности можно судить о стадийности деформирования и развития разрушения образца, элемента. На термограммах просматривается, что процесс деформирования листового элемента вначале инициируется дефектом. Рост средней температуры у надрезов листовых образцов при одинаковой форме образцов значительно интенсивнее при увеличении толщины листа. При этом до образования видимой трещины у дефекта листового элемента наблюдается небольшой всплеск температуры, после чего образуется видимая трещина и происходит ее дальнейшее развитие. Движение трещины по сечению образца характеризуется значительным локальным повышением температуры перед устьем движущейся трещины. Нагрев металла перед устьем движущейся трещины в несколько раз выше чем в стадии зарождения трещины.

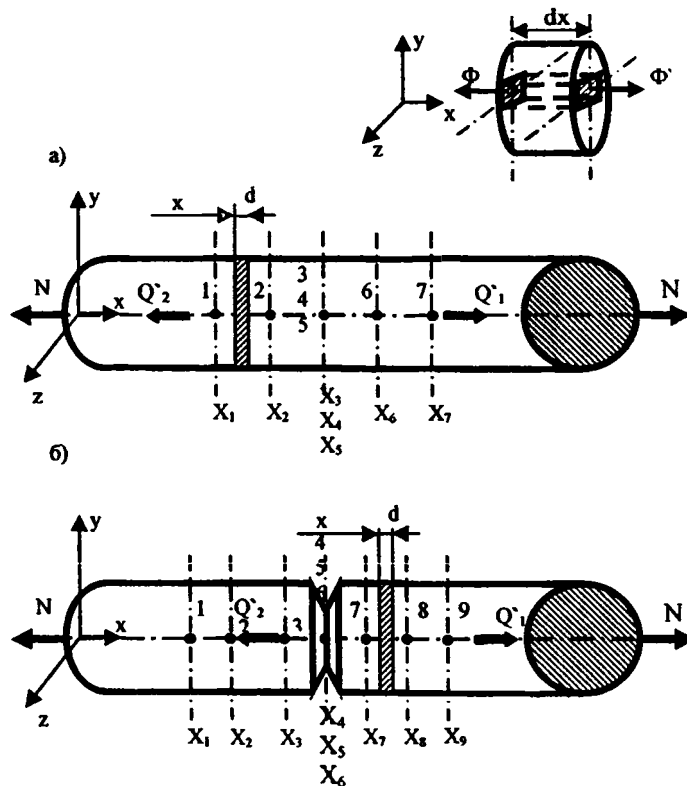


Рис.3. Схемы образцов: стандартного (а) и дефектного (б)

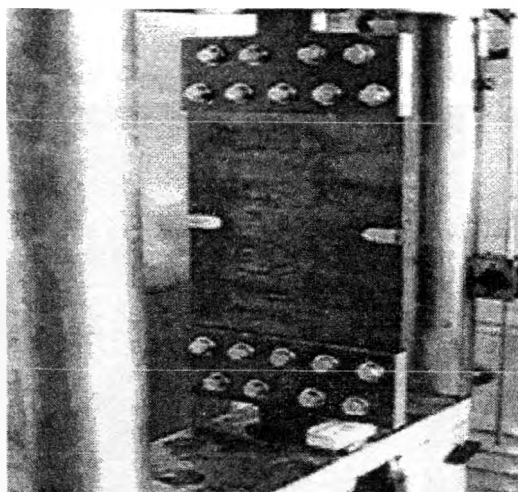


Рис. 4. Общий вид листового образца, подготовленного к испытанию

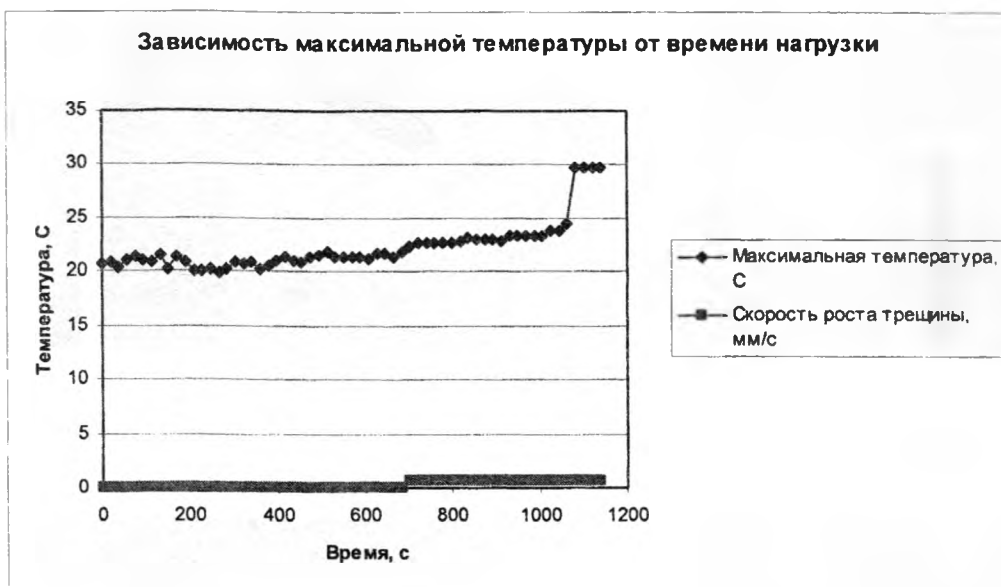


Рис.5. Изменение максимальной температуры поверхности образца при медленном развитии трещины (от начала нагружения до разрушения)

Величина нагрева значительно увеличивается с ростом скорости деформирования материала. На рис.4-показан листовый образец шириной 500мм и термограммы изменения теплового поля на различных стадиях зарождения и развития в листе трещины. Резкий всплеск максимальной температуры в стадии излома (рис.6г) можно объяснить как возросшей мощностью двух встречных источников теплообразования, так и ростом температуры поверхности при выходе полос сдвига на поверхность листа.

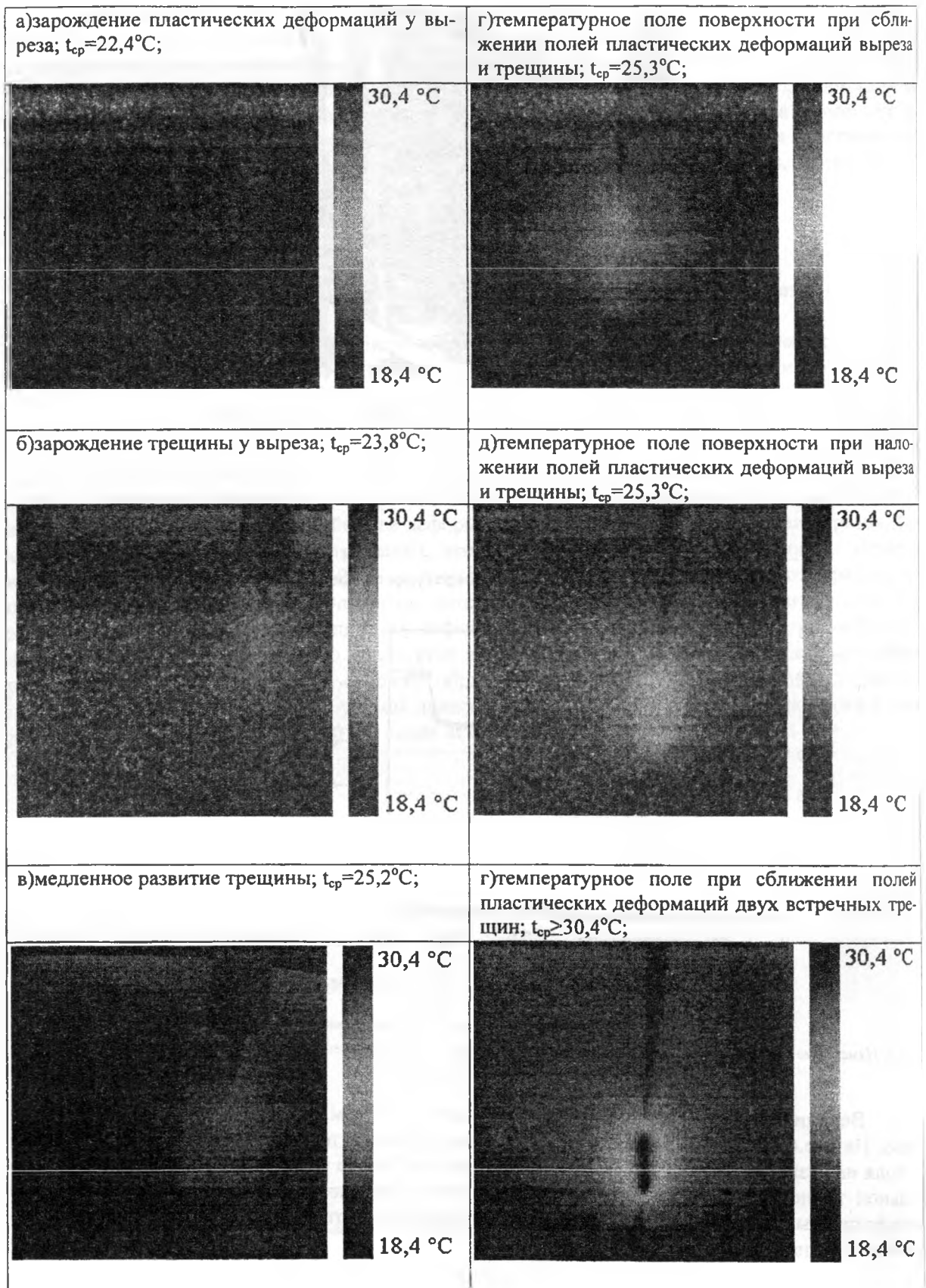


Рис. 6. Термограммы теплового поля поверхности у вершины надреза, трещины при медленном ее развитии в листе из низкоуглеродистой стали толщиной 0,5 мм

Рассмотренные процессы проявляются и при деформировании элементов и узлов конструкций. На рис. 7,8 показаны испытуемое сварное соединение арматурных стержней и графики изменения максимальной температуры в деформируемых объемах в различные моменты нагружения.



Рис. 7. Виды экспериментальных сварных образцов арматурных стержней

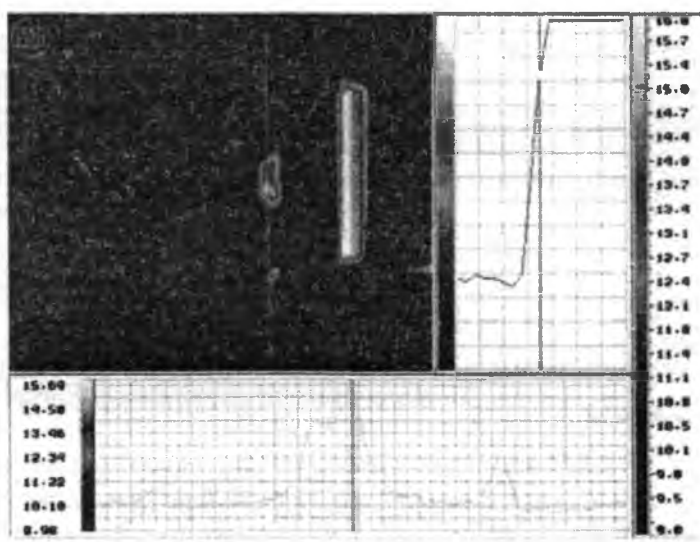


Рис. 8. Термограмма и графики изменения температуры вдоль оси соединения (снизу) и изменения максимальной температуры при деформировании (вертикальная полоса на термограмме справа от образца – термограмма маслопровода испытательной машины)

#### IV. Работа деформации и теплообразование

Рассмотрим в некоторый момент времени  $t$  материальный объем  $W$ , ограниченный поверхностью  $\Sigma$ . Для элементарного объема  $dW$  можно определить внутреннюю энергию  $dE$  и энтропию  $dS$  с использованием понятий удельной внутренней энергии  $e$  и удельной энтропии  $s$ , отнесенных к единице массы плотностью  $\rho$ . Тогда имеем  $dE = e \rho dW$ ,  $dS = s \rho dW$ . Из допущения об аддитивности внутренней энергии и энтропии имеем:

$$E = \iiint_W e \rho dW, S = \iiint_W s \rho dW. \tag{3}$$

Закон сохранения энергии для деформируемого объема  $W$  можно [10] записать в виде

$$\frac{dK}{dt} + \frac{dF}{dt} = \frac{\delta A}{dt} + \frac{\delta Q}{dt}. \quad (4)$$

В законе изменения энергии термомеханического континуума, представленного в виде (4),  $\frac{dF}{dt} = \frac{d}{dt} \iiint_W \rho \frac{de}{dt} dW = \iiint_W \rho \frac{de}{dt} dW$ ,  $\frac{\delta A}{dt}$  - мощность внутренних поверхностных и массовых сил, действующих на объем  $W$ , т.е. работа  $A$ , которую внешние силы производят над объемом  $W$  в единицу времени. Символ « $\delta$ » означает, что приращения работы  $\delta A$  и теплоты  $\delta Q$ , соответствующие времени  $dt$ , не являются полными дифференциалами.

Рассмотрим тепловой поток  $Q$  через поверхность  $\Sigma$ . Величины теплового потока  $Q$  и его изменения  $\delta Q/dt$  со временем можно выразить через вектор теплового потока  $\vec{q}$ , характеризующий поток тепла через единицу площади в единицу времени. Кроме теплового потока  $Q$  через поверхность  $\Sigma$  деформируемого объема  $W$  происходит приток тепловой энергии извне под действием распределенных тепловых источников интенсивностью  $z$ , т.е. в единице массы тела за единицу времени выделяется вследствие каких-то процессов, действующих извне или внутри тела, количество тепла  $z$ . Тогда скорость притока тепла к среде  $\delta Q/dt$  можно определить из уравнения теплового баланса рассматриваемого тела по выражению

$$\frac{\delta Q}{dt} = - \iint_{\Sigma} q_n d\Sigma + \iiint_W \rho z dW. \quad (5)$$

Преобразуя выражение (4) можно записать уравнение сохранения энергии в локальной форме

$$\rho \frac{de}{dt} = \sigma_{ik} \xi_{ik} - \frac{\partial q_i}{\partial x_i} + \rho z. \quad (6)$$

Предполагая, что тензор скоростей  $T_{\xi}$  можно представить в виде суммы  $T_{\xi} = T_{\xi}^e + T_{\xi}^p$ , уравнение (6) запишем в виде

$$\rho \frac{de}{dt} = \sigma_{ik} \xi_{ik}^e + \sigma_{ik} \xi_{ik}^p - \frac{\partial q_i}{\partial x_i} + \rho z. \quad (7)$$

Величина  $\sigma_{ik} \xi_{ik}^p$ , называемая диссипативной функцией, представляет собой скорость рассеяния энергии внутренними напряжениями в единице объема и предопределяет нагрев материалов при деформировании. Для большинства реальных ситуаций выполняется соотношение

$$\sigma_{ik} \xi_{ik}^p \geq \sigma_{ik} \xi_{ik}^e. \quad (8)$$

Деформирование растяжением происходит в соответствии со схемой рис. 1. При этом нагрев деформируемого объема является результатом его упругого охлаждения и пластического нагрева. На работу упругой деформации затрачивается часть работы деформирования  $A_e$ , а основная часть (работа пластической деформации  $A_p$ ) превращается в теплоту (рис. 9), т.е.

$$A_p = A - A_e$$

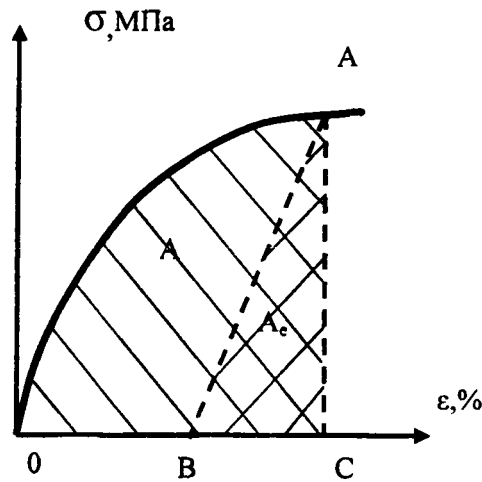


Рис.9. Схема определения величины работы при растяжении образца

Выделенная в процессе пластической деформации (в полосах сдвига) теплота распределяется в прилегающем объеме материала (потоки  $\Phi$  и  $Q$  на рис.2) и частично отдается окружающей среде. Распределение температуры в произвольной точке деформируемого объема материала в любой момент времени  $\tau$  можно определить из уравнения распространения тепла в вещественной среде [11], в частности при отсутствии движения тела, постоянных физических характеристиках материала ( $\lambda$ -коэффициент теплопроводности;  $c$ -удельная теплоемкость;  $\gamma$ -плотность),- по дифференциальному уравнению (10):

$$\lambda \left( \frac{\partial^2 T(x,y,z,\tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x,y,z,\tau)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(x,y,z,\tau)}{\partial z^2} \right) + q_v = c \gamma \frac{\partial T}{\partial \tau}, \quad (10)$$

где  $q_v$  – мощность деформационного источника тепла.

Решение уравнения (10) для конкретного образца и при известных термограммах позволяет определить и мощность деформационного источника тепла.

Изложенное показывает, что по данным термографии деформирования элементов, изделий можно проследить процесс зарождения и развития разрушения в их элементах, а также - изменение в процессе деформирования механических характеристик материала и наступление предельного состояния исследуемого изделия [12,13].

## V. Заключение

Проведенные исследования показали высокую эффективность применения инфракрасной термографии для изучения деформированного состояния конструктивных элементов в условиях их интенсивного нагружения и позволяют выявить следующие особенности динамики теплового излучения деформируемых изделий.

На графиках изменения температур деформируемого металла выделяются три стадии: на I-ой стадии при упругой работе металла происходит понижение его температуры; для второй стадии характерно значительное повышение температуры (средняя температура рабочей зоны повышается на несколько десятков градусов); на последней стадии происходит резкий подъем



температуры материала в окрестности излома и последующее его охлаждение. Интенсивный нагрев происходил в областях расположения дефектов (надрезов) на образцах, а другие участки этих образцов имеют значительно более низкие температуры. В моменты разрушения и обнажения поверхностей разрушения температура на таких поверхностях скачкообразно возрастает.

Термофильмы процесса деформирования образцов позволяют проследить кинетику деформирования образца в целом и его отдельных участков, выявить очаги зарождения разрушения, динамику развития разрушения.

При дальнейших экспериментальных исследованиях деформируемых образцов необходимо для увеличения информативности измерений повысить коэффициент излучения поверхности образца, например, ее зачернением, теплоизолировать поверхность образца, а измерение температур в наиболее нагретых зонах параллельно с ИК-термографированием проводить с помощью пленочных и др. термопар.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел. Белл Ф. Дж. В 2-х частях. Часть I. Малые деформации: Пер. с англ./ Под ред. А.П.Филина.- М.: Наука, 1984.-600с.
2. Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел. Белл Ф. Дж. В 2-х частях. Часть II. Конечные деформации: Пер. с англ./ Под ред. А.П.Филина.- М.: Наука, 1984.-432с.
3. Пластичность и разрушение твердых тел. Надаи А. Том.2.-М.:Мир,1969.-863с.
4. Теория сопротивления материалов. Дружинин С.И.-Л.:Кубуч, 1930.-478с.
5. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение: Пер.с франц.-М.Мир, 1988.-416с.
6. Экспериментальная механика: В 2-х книгах.: Кн.2. Пер. с англ./ Под ред. А.Кобаяси.-М.:Мир,1990.-552с.
7. Maugin. G.A. The thermomechanics of plasticity and fracture.-Cambridge: Cambridge University press.-1992.-350р.
8. Лукин Е.С. Исследование предельного состояния конструкционных сталей по термопластическому эффекту. Автореферат дисс. на соискание уч. степени канд.техн.наук.- Якутск:ИФТПС РАН,2005г.-23с.
9. Максимкин О.П., Гусев М.Н., Тиванова О.В. и др. Стадийность пластической деформации и разрушения облученных нейтронами металлических материалов// *Материаловедение*.-2002.-№3.-С.23-30.
10. Мейз Дж. Теория и задачи механики сплошных сред. Пер.с англ. Под ред.М.Э.Эглит.-М.:Мир,1974.-319с.
11. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. Изд.2-е.-М.-Л.: Машгиз,1962.-456с.
12. Мойсейчик Е.А., Балыкин М.К. Энергетическая характеристика разрушения металлических конструкционных материалов// *Актуальные проблемы расчета зданий, конструкций и их частей: теория и практика*.-Мн.: Технопринт,2002.-112-117с.
13. Мойсейчик Е.А., Филатов С.А. и др. Термомеханические эффекты при деформировании конструкционных материалов. Отчет по НИР. № гос.рег. 2001315.- Мн.:БНТУ, 2002.-162с.

УДК 621.94.084

*Ширвель П.И.*

## ПРИМЕНЕНИЕ ФУНКЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ ЭРИ В ПРОЧНОСТНОМ РАСЧЕТЕ ТВЭЛОВ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь*

Одним из главных факторов, определяющих работоспособность реактора АЭС, являются температурные условия работы его ТВЭЛов. Жёсткость условий работы ТВЭЛов (большие тепловые и радиационные нагрузки, высокое внешнее давление теплоносителя) предполагает повышенные требования к ним. В связи с этим возрастает роль теплофизических методов расчета тепловыделяющих элементов реактора.