

## ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЕ ПРИ ДЕФОРМИРОВАНИИ РАСТЯНУТЫХ АРМАТУРНЫХ ИЗДЕЛИЙ И ИХ ТЕРМОГРАФИЯ

*Канд. техн. наук, доц. МОЙСЕЙЧИК Е. А.*

*Белорусский национальный технический университет*

При деформировании металлов, других материалов поверхности разрушения излучают энергию [1] в основном инфракрасного диапазона. Изменение потока фотонов инфракрасного излучения  $\Delta\Phi$  можно получить, дифференцируя уравнение Стефана – Больцмана [2]:

$$\Delta\Phi = 13eB'T^2\Delta T. \quad (1)$$

Выражение (1) представим в виде

$$\Delta\Phi = -3eB'T^3K_m\Delta\sigma, \quad (2)$$

где  $B'$  – постоянная Стефана – Больцмана для фотонной эмиссии ( $1,52041 \cdot 10^{15}$  фотон  $\cdot$  с $^{-1}$   $\cdot$  м $^{-2}$   $\cdot$  К $^{-3}$ ).

Более полно выявить и связать процессы, происходящие при деформировании

твердого тела, позволяют термодинамические представления о его деформировании [3–6].

Рассмотрим материальный объем  $W$ , ограниченный поверхностью  $\Sigma$ , в некоторый момент времени  $t$ . 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  $dE = e\rho dW$ ;  $dS = s\rho dW$ . Из допущения об аддитивности внутренней энергии и энтропии имеем:

$$E = \iiint_W e\rho dW; \quad S = \iiint_W s\rho dW. \quad (3)$$

Закон сохранения энергии для деформируемого объема  $W$  [3] запишем 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):  $\frac{dF}{dt} = \frac{d}{dt} \iiint_W \rho \frac{de}{dt} dW = \iiint_{dW} \rho \frac{de}{dt} dW$ ,  $\frac{\delta A}{dt}$  – мощность внутренних поверхностных и массовых сил, действующих на объем  $W$ , т. е. работа, которую внешние силы производят над объемом  $W$  в единицу времени. Символ  $\delta$  означает, что приращения  $\delta A$  и  $\delta Q$ , 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 выразим через вектор теплового потока  $\bar{q}$ , характеризующий поток теплоты 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 теплоты  $z$ . Тогда скорость притока теплоты к среде  $\delta Q/dt$  можно определить из уравнения теплового баланса рассматриваемого тела по формуле

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

Преобразуя выражение (3), запишем 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

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

Изложенное выше свидетельствует о том, что по данным термографии деформируемых арматурных изделий можно проследить процесс зарождения и развития разрушения в их элементах.

**Методика проведения исследований.** При деформировании образцов арматурных изделий кинетика изменения их состояния фиксировалась компьютерным термографом «ИРТИС-200И» в виде как отдельных термограмм, так и термофильмов. В процессе эксперимента образцы нагружались статической нагрузкой на 100-тонной универсальной машине. Средняя скорость нагружения изменялась в пределах 2,76–7,67 кН/с и регулировалась по показаниям силоизмерителя. Термографические измерения вели в спектральном диапазоне 3–5 мкм. Реперные точки контролировали в течение эксперимента контактным способом. Термограф устанавливался под углом 80–85° к вертикальной плоскости испытательной машины и 10–15° – к горизонтальной. Сканирование вели в автоматическом режиме через 4,95 с. Результаты сканирования

заносили в память компьютера, что позволило анализировать термоизображения на любой стадии исследования. Полученное термоизображение обрабатывали с помощью программного пакета «NewIRTIS 2003». При обработке строили графики изменения температуры по поперечным и продольным сечениям элементов образцов, моделирующих исследуемые арматурные изделия.

По данным термографирования построены зависимости изменения температуры поверхности изделий за время нагружения. Характерные примеры таких зависимостей показаны рис. 1.

**Результаты исследований и их обсуждение.** Проведенные исследования показали высокую эффективность применения ИК-термографии для изучения деформированного состояния конструктивных элементов в условиях их интенсивного нагружения и выявили следующие особенности динамики теплового излучения при деформировании образцов, моделирующих арматурные изделия.

На графиках изменения максимальных температур деформируемого металла выделяются два участка: а) участок, на котором происходит понижение температуры деформируемого образца на 0,5–1,2 °С; б) участок, на котором происходит непрерывное повышение температуры деформируемого образца. Первый участок соответствует упругому деформированию материала стержней. Повышение температуры образца происходит после начала текучести в стержнях. При этом температура поверхности неизолированных образцов повышалась на 6–50 °С. Образцы диаметрами 25 и 32 мм нагревали до более высоких температур, чем образцы диаметром 12 мм.

Интенсивный нагрев происходил в областях расположения дефектов (надрезов) на образцах, а другие участки этих образцов имели значительно более низкие температуры. В моменты разрушения и обнажения поверхностей разрушения температура на таких поверхностях скачкообразно возрастала.

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

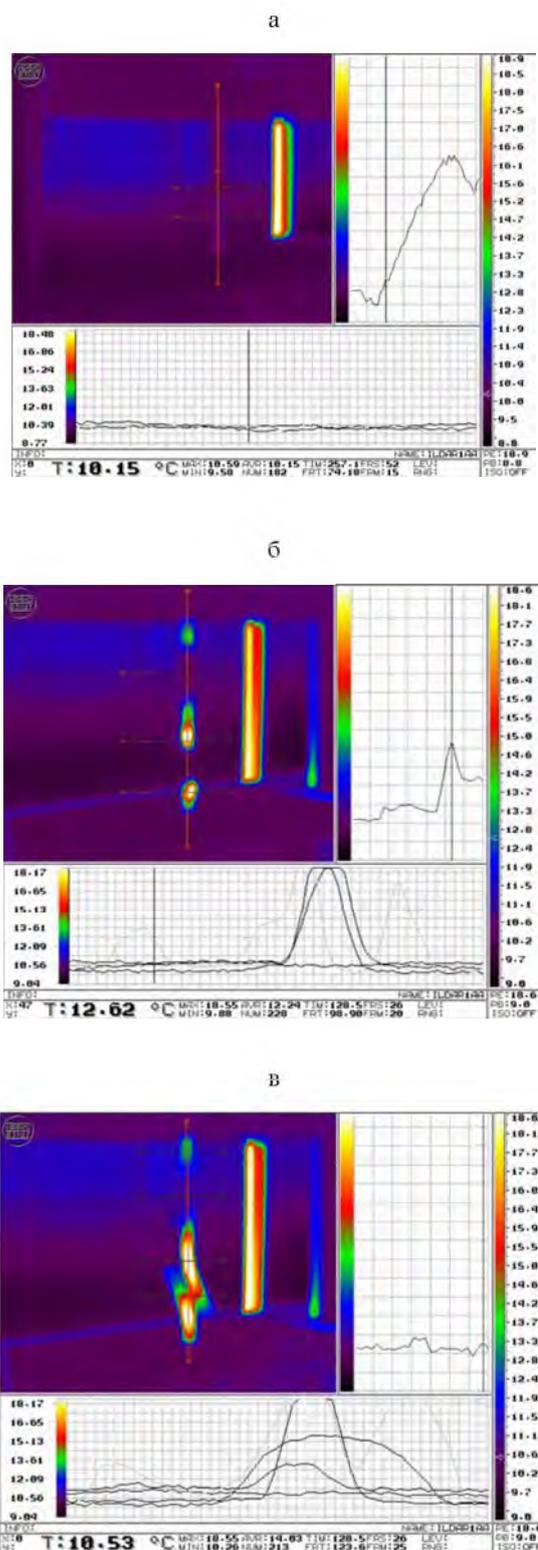


Рис. 1. Термограммы и графики изменения температуры образца № 4-44(Ø25): а – изменение температуры по оси образца при упругом деформировании; б – то же при нагружении образца в стадии начала пластического течения; в – динамика изменения температуры вдоль оси стержня в стадии разрушения

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

### ВЫВОД

Разработана методика исследования процесса зарождения и развития разрушения в деформируемых растяжением элементах арматурных изделий с использованием теплоты механического деформирования, и выполнен термографический анализ работы различных типов арматурных изделий.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Инфракрасное** излучение, возникающее при деформации и разрушении металлов / К. В. Абрамова [и др.] //

Журнал технической физики. – 1988. – Вып. 4, т. 58. – С. 817–821.

2. **Экспериментальная** механика: в 2 кн. / под ред. А. Кобаяси. – М.: Мир, 1990. – Кн. 2. – 552 с.

3. **Мейз, Дж.** Теория и задачи механики сплошных сред / Дж. Мейз; пер. с англ. под ред. М. Э. Эглит. – М.: Мир, 1974. – 319 с.

4. **Мойсейчик, Е. А.** Определение расчетного сопротивления статически нагруженных элементов стальных конструкций с учетом эффекта термомеханического деформирования материалов / Е. А. Мойсейчик // Механика-99: II Белорусский конгресс по теоретической и прикладной механике, 29–30 июня 1999 г. – Минск: БелНИИС, 1999. – С. 82–88.

5. **Мойсейчик, Е. А.** Энергетическая характеристика разрушения металлических конструкционных материалов / Е. А. Мойсейчик, М. К. Балькин // Актуальные проблемы расчета зданий, конструкций и их частей: теория и практика. – Минск: Технопринт, 2002. – С. 112–117.

6. **Термомеханические** эффекты при деформировании конструкционных материалов: отчет о НИР / Е. А. Мойсейчик [и др.] // № ГР 2001315. – Минск: БНТУ, 2002. – 162 с.

Поступила 07.07.2008

УДК 624.072.21.7

## ВАРИАЦИОННО-РАЗНОСТНЫЙ ПОДХОД В РЕШЕНИИ КОНТАКТНОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ НЕЛИНЕЙНО-УПРУГОГО НЕОДНОРОДНОГО ОСНОВАНИЯ. ПЛОСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА\*

### ЧАСТЬ 2

*Докт. техн. наук, проф. БОСАКОВ С. В., КОЗУНОВА О. В.*

*Белорусский национально-технический университет,  
Белорусский государственный университет транспорта*

Вначале решается задача в линейной постановке. По вычисленным значениям перемещений  $i$ -й узловой точки  $u_i(x)$ ,  $v_i(y)$  с помощью геометрических уравнений (4) и конечно-разностных соотношений (11) определяются

интенсивность деформаций (3) и интенсивность напряжений в центрах ячеек (2).

Имея значения напряжений и перемещений, полученные в результате решения задачи в первом приближении, определяем касательный

\* О к о н ч а н и е. Начало см. «Вестник БНТУ» № 1 с. г.