

Таблица 4

Зависимость категорий долговечности *A, B, C* бетона от аналитических параметров критической трещиностойкости K_{Ic}^b и K_{IIc}^b

Классы бетона по энергии разрушения (по прочности)	$B_G - 90$ C20			$B_G - 105$ C30			$B_G - 120$ C40		
Категория долговечности бетона	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
Коэффициент интенсивности напряжений при отрыве K_{Ic} , МН/м ^{3/2}	0,6 ... 0,7	0,8 ... 0,9	0,9 ... 1,05	0,5 ... 0,6	0,7 ... 0,8	0,85 ... 0,95	0,4 ... 0,5	0,6 ... 0,75	0,8 ... 0,95
Коэффициент интенсивности напряжений при сдвиге K_{IIc} , МН/м ^{3/2}	6,9 ... 8,0	9,2 ... 10,8	10,4 ... 12,2	5,8 ... 6,9	8,1 ... 9,2	9,8 ... 11,1	4,7 ... 6,8	5,8 ... 8,1	9,2 ... 11,1
Критерий трещиностойкости, $K_c = \sqrt{K_{Ic}^2 + K_{IIc}^2}$, МН/м ^{3/2}	6,92 ... 8,13	9,23 ... 10,43	10,43 ... 12,24	5,82 ... 6,93	8,13 ... 9,23	9,83 ... 11,14	4,7 ... 6,82	5,82 ... 8,13	9,23 ... 11,14

ВЫВОД

Сформулировано понятие долговечности бетона при внешних воздействиях. Разработан метод расчета долговечности бетона с использованием подходов механики разрушения, который опирается на концепцию накопления дефектов в структуре в виде пор, капилляров и трещин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гузеев, Е. А. Механика разрушения бетона: вопросы теории и практики / Е. А. Гузеев, С. Н. Леонович, К. А. Пирадов. – Брест, 1999. – 218 с.

2. Леонович, С. Н. Трещиностойкость и долговечность бетонных и железобетонных элементов в терминах силовых и энергетических критериев механики разрушения / С. Н. Леонович. – Минск: Тыздзень, 1999. – 266 с.

3. Снежков, Д. Ю. Неразрушающие методы оценки качества монолитного бетона / Д. Ю. Снежков, С. Н. Леонович. – Минск: БНТУ, 2006. – 250 с.

4. Леонович, С. Н. Прочность конструкционных бетонов при циклическом замораживании-оттаивании с позиции механики разрушения / С. Н. Леонович. – Брест: Изд-во БрГТУ, 2006. – 380 с.

Поступила 30.05.2008

УДК 539.620.171.178-179

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 взаимоувязать процессы, происходящие при деформировании

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

Рассмотрим материальный объем W , ограниченный поверхностью Σ , 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 ρ . 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 δ означает, что приращения δA и δQ , соответствующие времени dt , не являются полными дифференциалами.

Рассмотрим тепловой поток Q через поверхность Σ . 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 Σ 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_{ξ} 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.

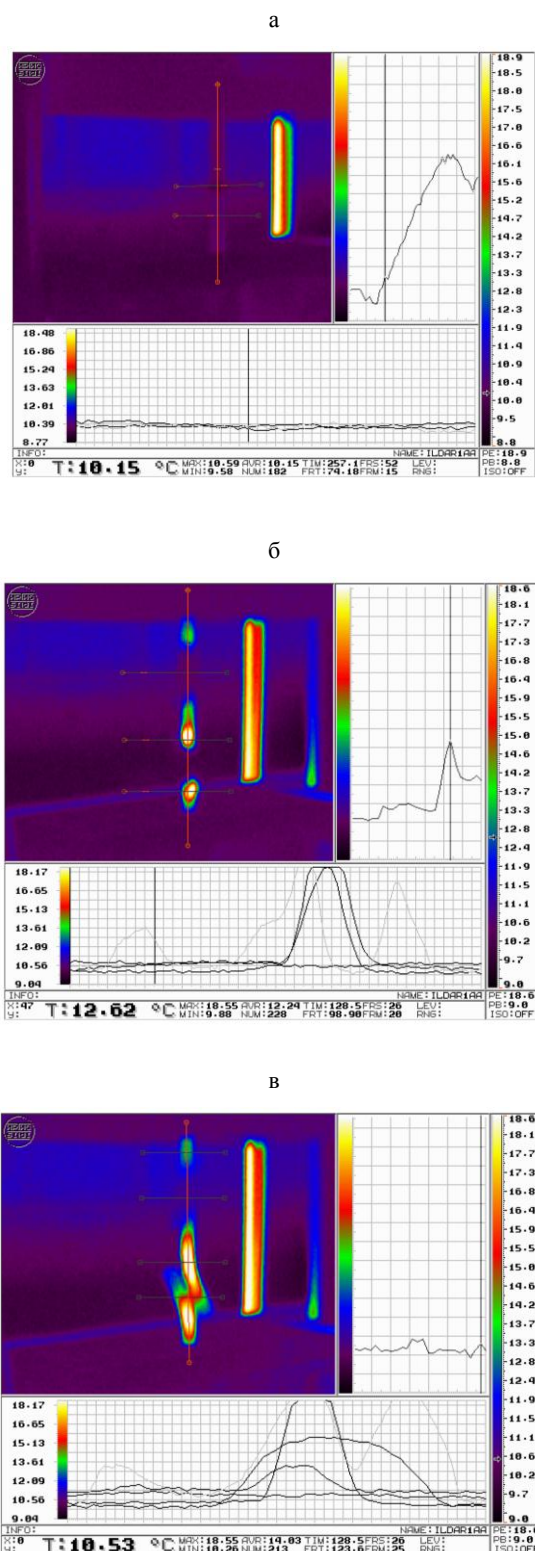


Рис. 1. Термограммы и графики изменения температуры образца № 4-44(Ø25): а – изменение температуры по оси образца при упругом деформировании; б – то же при нагружении образца в стадии начала пластического течения; в – динамика изменения температуры вдоль оси стержня в стадии разрушения

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 конструктивных материалов / Е. А. Мойсейчик, М. К. Балыкин // Актуальные проблемы расчета зданий, конструкций и их частей: теория и практика. – Минск: Технопринт, 2002. – С. 112–117.
6. **Термомеханические** эффекты при деформировании конструктивных 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.