

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ЭНЕРГИИ РАЗРУШЕНИЯ НАПРЯГАЮЩЕГО БЕТОНА

Драган В.И., Загуляев С.В.

Основная идея механики хрупкого разрушения, предложенная А. Гриффитсом, состояла в том, что потенциальная энергии тела, накопленная им в процессе упругого деформирования, при разрушении полностью превращается в энергию образующихся новых поверхностей (поверхностную энергию материала γ). Рост трещины в данном случае является энергетически выгодным процессом (при котором количество запасенной в теле энергии уменьшается).

Рассмотрим энергетический баланс тела, в котором распространяется трещина (рис. 1). В процессе распространения трещины материал, непосредственно примыкающий к ее «берегам», разгружается (релаксирует). Это означает, что напряжения и деформации в нем уменьшаются, а упругая энергия, запасенная в этой зоне тела, высвобождается — переходит в поверхностную. Для упрощения можно принять, что область разгруженного материала (область релаксации) имеет форму окружности (рис. 1). Из теории упругости известно, что высвобожденная энергия деформации U равна половине произведения трех величин: напряжения σ , относительной деформации $\varepsilon = \sigma/E$ и площади релаксации πl^2 .

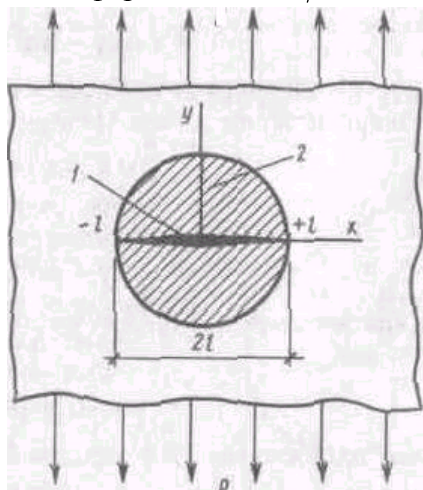


Рис. 1. Схема к определению энергетического баланса тела с трещиной:

1 — трещина; 2 — область релаксации

Это выражается следующей формулой:

$$U = \pi \sigma^2 l^2 / (2E) \quad (1)$$

С другой стороны, энергия, которая расходуется на образование двух новых поверхностей тела (трещины), равна

$$G = 2l\gamma \quad (2)$$

где γ — удельная плотность поверхности энергии.

Количество энергии, высвобождаемой при развитии трещины, пропорционально квадрату длины трещины, тогда как количество энергии, расходуемой на образование новых поверхностей трещины, пропорционально первой степени длины трещины. Следовательно, чем длиннее трещина, тем больше роль высвобождаемой энергии. Можно показать, что в рассматриваемой задаче Гриффитса, начиная с некоторой «критической» длины (зависящей от величины внешней нагрузки и свойств материала), трещина высвобождает больше энергии, чем потребляет. А так как тело всегда стремится уменьшить запасенную в нем энергию, то трещина длиннее критической развивается стремительно и безостановочно, разрушая образец материала. Критическая (для заданных напряжений σ) длина трещины $2l$ будет соответствовать максимуму общей энергии тела:

$$W \rightarrow \max. \quad (3)$$

Общая энергия тела W равна поверхностной энергии $2l\gamma$ минус энергия, которая была высвобождена, чтобы трещина достигла длины $2l$, т.е.

$$W = 2l\gamma - \pi \sigma^2 l^2 / (2E). \quad (4)$$

Максимум общей энергии находим из условия равенства нулю производной общей энергии W по длине трещины l .

$$dW / (dl) = 0, \quad (5)$$

т. е.
$$\frac{dW}{dl} = 2\gamma - 2\pi \sigma^2 l / (2E) = 0. \quad (6)$$

Отсюда критическая полудлина трещины l для заданного напряжения σ определяется как

$$l_* = 2E\gamma / (\pi\sigma^2), \quad (7)$$

а критическое номинальное напряжение для заданной трещины:

$$\sigma_c = \sqrt{2E\gamma / (\pi l)}. \quad (8)$$

Для определения энергии, высвобождаемой при разрушении элементов конструкций была разработана уникальная методика эксперимента. Методика проведения экспериментальных исследований отвечала следующим требованиям: 1) экспериментальные исследования основывались на наблюдаемых особенностях работы конструкций; 2) разработанная методика предусматривала исследование образцов с высокой точностью измерения параметров эксперимента; 3) экспериментальные исследования обеспечивали возможность получения истинных, объективных значений исследуемых параметров; 4) исследования обладали свойством повторяемости для идентичных условий испытаний.

Характерной наблюдаемой особенностью разрушения элементов конструкций является энергетический характер этого процесса, сопровождаемый явлением перераспределения энергетического баланса. Экспериментальные исследования проводились на разрывной машине ИР 5145-500-10 Ивановского ОАО “Точприбор” [1]. Деформация образца контролировалась по индикаторам часового типа ИЧ-10 с ценой деления 0.01 мм на базе в 50 мм, а также программным комплексом самой машины со следующими параметрами: номинальная единица наименьшего разряда при индикации нагрузки 0.01 кН, предел допускаемой погрешности машины при измерении нагрузки при растяжении +/- 1%. Полученные данные, проверенные по двум вышеуказанным независимым измерительным системам, характеризуются стабильной сходимостью и представляют собой отражение объективных процессов, происходящих в момент разрушения.

Энергия разрушения определялась на цилиндрических образцах, конструкция и армирование которых показаны на рисунке 2.

Для создания условий набора напряжения в связи с конструктивными особенностями разрывной машины в ходе бетонирования в опалубку помещался металлический тяж и анкера, как показано на рис. 2. Тяж представлял собой гладкий стальной стержень, изолированный от бетона пластмассовой трубкой. Временное сопротивление стального центрального стержня при разрыве - 650 МПа. Предел текучести - 540 МПа. Модуль упругости $E_s = 20.6 \cdot 10^4$ МПа.

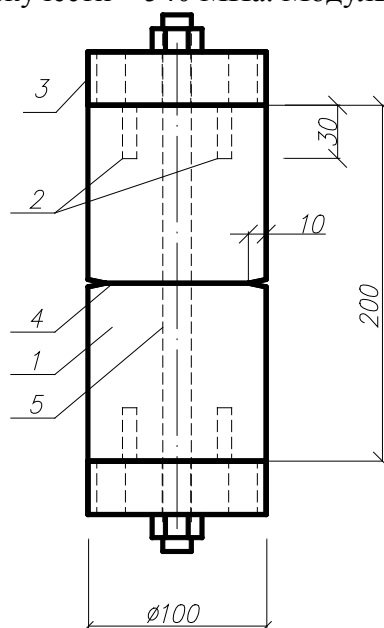


Рис. 2. Конструктивное решение опытных образцов, образец, твердеющий в условиях одноосного сжатия: 1 – бетонный образец; 2 – анкера; 3 – захваты приспособления; 4 – кольцевой концентратор; 5 – металлический стержень.

Опытные образцы бетонировали в металлической опалубке. Поверхность опалубки покрывалось машинным маслом для исключения сцепления бетонной смеси с металлом опалубки. Образцы имели иницирующую трещину, получаемую в ходе бетонирования за счет кольцевого концентратора, располагаемого в металлической опалубке. Кольцевой концентратор представлял собой металлическое кольцо, устанавливаемое перед бетонированием. Для предотвращения сцепления концентратора с бетоном, кольцо смазывалось маслом. В процессе бетонирования обеспечивалось вертикальное положение металлического стержня и горизонтальное положение кольцевых концентраторов.

Процесс самоупрочнения контролировали по связанным деформациям цилиндрических образцов (рис. 3). Степень ограничения деформаций расширения, создаваемая в плановом эксперименте металлическим тязом, соответствует 1% армирования. По результатам факторного эксперимента была получена экспериментальная зависимость энергии разрушения от величины самоупрочнения.

Энергия самоупрочнения рассчитывалась исходя из абсолютной деформации арматуры, определяемой на лабораторном штативе по индикатору часового типа (рис. 3).

Величина самоупрочнения образца S_p (МПа) определяли по формуле [10]:

$$S_p = \frac{\Delta}{l_{обр}} \rho_1 \cdot E_s \quad (9)$$

где Δ и $l_{обр}$ - соответственно полная деформация образца в процессе самоупрочнения бетона и его длина;

ρ_1 - приведенный коэффициент армирования образца;

E_s - модуль упругости стали, принимаемый равным $20.6 \cdot 10^4$ МПа.



Рисунок 3. Измерение деформаций связанного расширения в контрольных образцах

В исследованиях применяли напрягающий цемент типа М промышленного помола. Приготовление напрягающего цемента осуществлялось в шаровой мельнице вместимостью 600 кг при совместном помоле бездобавочного портландцемента, гипса и глиноземистого цемента.

В качестве результатов эксперимента были получены диаграммы деформирования бетонного образца с армированием. На всех диаграммах можно выделить несколько этапов.

Первый этап. Участок ОА. Вначале нагружения металлический стержень и бетон образца работали совместно. Увеличение нагрузки происходило пропорционально деформациям.

Второй этап. Участок АВ. На участке происходит резкий спад напряжений с развитием магистральной трещины. В момент развития трещины нагрузка на бетон снимается и передается на стальной стержень. В пиковой точке усилие, приходящееся на бетон и металлический стержень, распределяется пропорционально жесткостям бетона и стали.

Третий этап. Точка В. В нижней точке бетон разрушился. Вся нагрузка перераспределилась на стержень. Накопленная системой в процессе растяжения энергия трансформировалась в энергию разрушения бетона и энергию деформирования стального стержня.

Площадь ОАС представляет собой полную работу по деформированию образца. Соединив точку О с точкой В получим A_c - полную работу разрушения для бетонной части образца, равную площади треугольника ОАВ.

$$A_c = \int_1^{\max} (F - F_{ст}) dl \quad (10)$$

Отношение полной работы разрушения A_c к площади поверхности разрушения W является энергией разрушения

$$G_{1c} = A_c / W \quad (11)$$

Коэффициент интенсивности напряжений определяется через энергию разрушения по формуле $K_{IC} = \sqrt{G_{IC} \cdot E} \cdot K_{IC}$ является характеристикой материала, определяющий сопротивление развитию трещины, который не зависит от формы и размера образца, расположения и длины трещины.

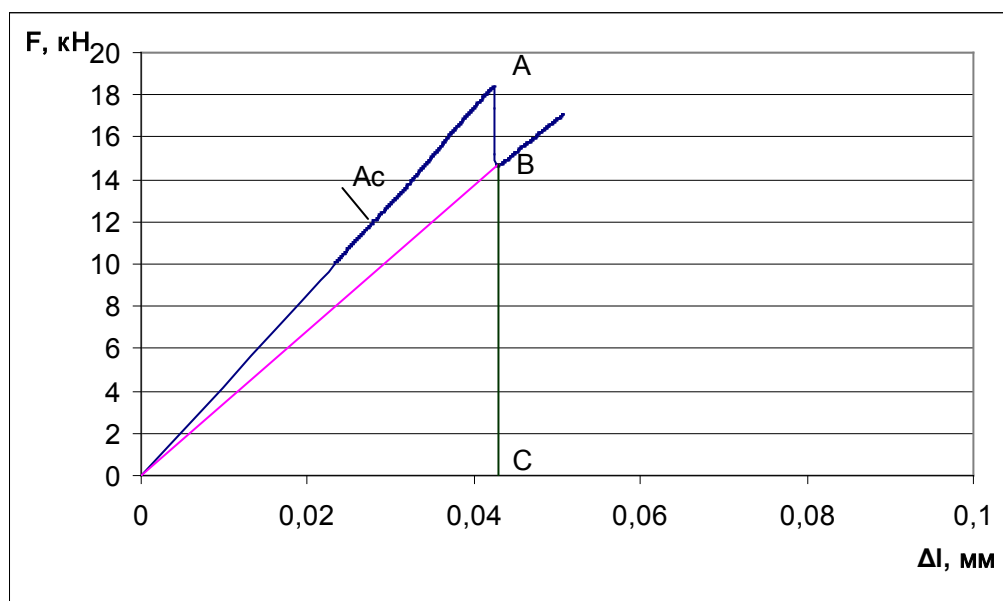


Рис. 4 Определение энергии разрушения напрягающего бетона по диаграмме деформирования образца с армированием

С другой стороны, изучив методику испытаний, конструкцию образца, диаграммы деформирования, получаемые в процессе испытаний и проанализировав данные, получим следующее.

До старта магистральной трещины потенциальная энергия, накопленная в процессе нагружении равна работе бетонной части образца и работе стального стержня [12]:

$$P_1 = A_1^{cm} + A^\delta \quad (12)$$

Потенциальная энергия, определенная по формуле [12] – площадь ОАС.

В момент старта трещины происходит перераспределение энергии. Часть энергии идет на разрушение бетонной части образца, другая часть воспринимается стальным стержнем [13]:

$$P_2 = A_2^{cm} + W, \quad (13)$$

где W – работа, потраченная на разрушение образца (энергия разрушения).

В точке В на диаграмме деформирования (рис. 4) вся внешняя нагрузка воспринимается стальным стержнем. Площадь ОВС – это работа стержня, после разрушения бетонной части образца. Потенциальная энергия, накопленная в ходе проведения эксперимента, по закону сохранения энергии должна равняться потенциальной энергии стержня после разрушения бетонной части и энергии разрушения бетонной части образца, т.е. $P_2 = P_1$. Из формул [12, 13] энергия разрушения бетона определяется как $W = A_1^{cm} + A^\delta - A_2^{cm}$, что соответствует площади ОАВ.

Площадь ОАВ, получаемая на образцах вследствие скачка есть работа, затраченная на разрушение образца. По затраченной работе можно определить критическую скорость высвобождения энергии по формуле [11].

Пример определения энергии разрушения для образцов полуфакторного эксперимента (3 партия 1 серия).

Диаграмма деформирования образцов с самоупрежением представлена на рис. 5.

В таблице 1 представлены результаты определения силовых параметров разрушения опытных образцов с набранным самоупрежением первой серии третьей партии, полученных из анализа диаграмм деформирования на рис. 5.

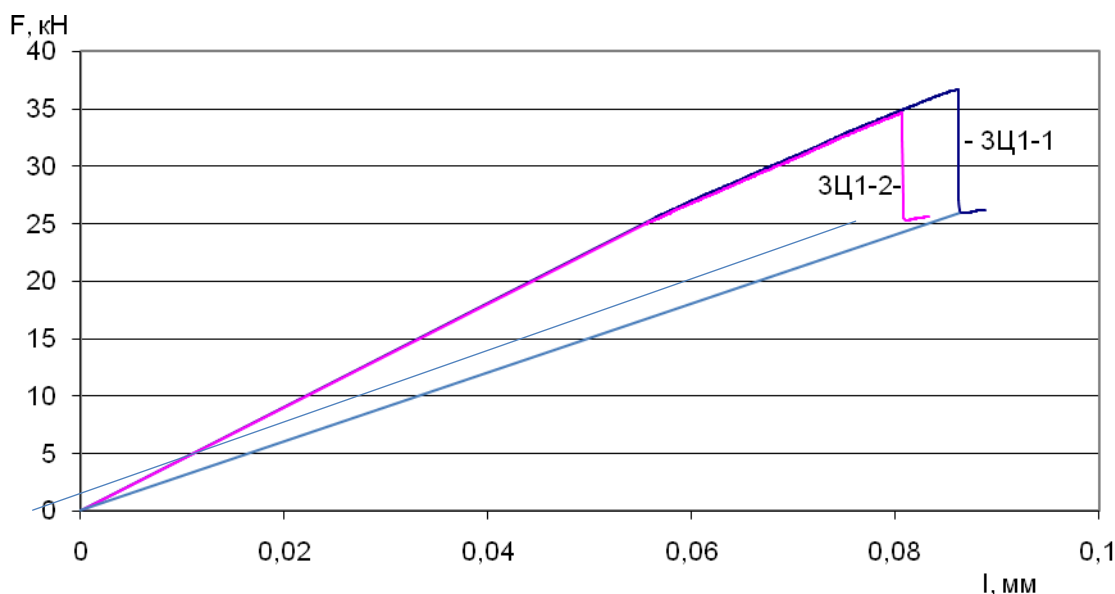


Рисунок 5 – Диаграмма деформирования образцов с самоупрежением 3Ц1-1, 3Ц1-2

Таблица 1 Результаты механических испытаний образцов первой серии третьей партии.

Образец	σ_{CE} , МПа	$F_{разр}$, кН	$F_{разр}^b$, кН	$A_{общ}$, мм·кН	$A_{общ}^b$, мм·кН	G_{IC} , м·МПа
1	2	3	4	5	6	7
3Ц1-1	3,9	36,5	31	1,645192	0,541382	$6,84 \cdot 10^{-5}$
3Ц1-2	3,7	34,65	29,6	1,590893	0,523832	$6,55 \cdot 10^{-5}$

Выводы.

1. Разработанная методика позволяет проводить разнообразные экспериментальные исследования, связанные с определением характеристик бетонов на растяжение.
2. Описанный способ определения энергии разрушения представляет собой непосредственное определение физической величины энергии разрушения.
3. Основными параметрами, определенными в результате исследований являются: энергия разрушения, коэффициент интенсивности напряжений

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. В. И. Драган, С. В. Загуляев // Вестник Брестского государственного технического университета – 2002. – №1. Строительство и архитектура. – С. 25–29
2. В. И. Драган, П. Радзишевский, С. В. Загуляев, М. Н. Строк // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2003. – №1. Строительство и архитектура. – С. 41–45
3. В. И. Драган, С. В. Загуляев // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2004. – №1. Строительство и архитектура. – С. 80–85
4. В. И. Драган, С. В. Загуляев // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Бела-русь: сб. тр. XI Международного научно-методического межвузовско-го семинара. В 2 ч. – Брест, БрГТУ, 2004. – Ч.1. – С. 16–23.
5. С. В. Загуляев // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2004. – №1. Строительство и архитектура. – С. 74–80
6. ГОСТ 29167-91. Бетоны. Методы определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. – М.: Издательство стандартов, 1992. – 18с.
7. Е.А.Гузеев, С.Н.Леонович, К.А.Пирадов. Механика разрушения бетона: вопросы теории и практики. – Брест: БПИ, 1999. – 217 с.
8. Механика разрушения и прочность материалов: Справ. Пособие: В 4 т./ Под общей ред. Панасюка В.В. – Киев: Наук. Думка, 1988 – ISBN 5-12-000300-1
9. Зайцев Ю.В. Механика разрушения для строителей: Учеб. Пособие для строит. вузов. – М.: Высш. Шк., 1991. – 288 с
10. Технология напрягающего цемента и самоупреженных железобетонных конструкций. Под ред. В. В. Михайлова и С. Л. Литвера. М., Стройиздат, 1975. 183 с. (Госстрой СССР. Науч.-исслед. ин-т бетона и железобетона. НИИЖБ).
11. СТБ 13-37. Бетон напрягающий. Технические условия