## выводы

- Из большого числа методов для изучения поврежденности структуры бетона выделен микроскопический метод, который позволяет обнаруживать микротрещины на разных этапах их образования, начиная с 0,1 мкм.
- Разработана методика выявления микродефектов в структуре поврежденного бетона, включающая подготовку шлифов, подбор проявляющих веществ и исследование структуры под микроскопом. Для количественной оценки дефектной структуры предложено использовать отношение суммарной длины микротрещин на определённом участке к общей площади этого участка.

УДК 624.012.4:620.17.

Драган В.И, Загуляев С.В.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Шейкин А.Н., Чеховский Ю.В., Бруссер М.И. Структура и свойства цементных бетонов. - М.: Стройиздат, 1979. — 344 с.
- ГОСТ 22023-76. материалы строительные. Метод микроскопического количественного анализа структуры. -10 с.
- Зайцев Ю.В. Механика разрушения для строителей: Учеб. Пособие для строит. вузов. - М.: Высш. шк., 1991. -288 с.
- Капиллярный неразрушающий контроль: контроль проникающими веществами./ Прохоренко П.П., Мигун Н.П., Стойчева И.В., Секерин А.М. – Мн: ИПФ, 1998. -160 с.
- Дежкунов Н.В., Прохоренко П.П., Стойчева И.В. Метод подавления фонового свечения при контроле изделий из пористых материалов.// Дефсктоскопия. -1989.- №10. -С. 62-67.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗРЫВНОЙ МАШИНЫ ИР 5145-500-10

Одним из путей решения неотложных задач в области строительства являются дальнейшее повышение надежности и долговечности строительных конструкций зданий и сооружений. В связи с этим наиболее точное определение физикомеханических свойств является непременным условием для прогнозирования поведения строительных конструкций под нагрузкой. Из большого числа испытательных установок, наиболее полно отвечающих данным требованиям, нами использовалась разрывная машина ИР 5145-500-10 Ивановского ОАО "Точприбор".

Испытательная нагрузка при растяжении-сжатии данной машины составляет от 0 до 500 кH, при этом номинальная цена единицы наименьшего разряда при индикации нагрузки 0.01 кH, а предел допускаемой погрешности машины при измерении нагрузки в режиме растяжения +/-1%, сжатия +/-2%. Значение скорости перемещения активного захвата находится в пределах от 0.05 до 200 мм/мин.

Программное и техническое обеспечение позволяет проводить испытание следующих видов образцов: цилиндрических, плоских, целой трубы, сегмента трубы. При окончании испытания обеспечивается получение следующей информации: наибольшей нагрузки, достигнутой при испытании; значения перемещения активного захвата с учетом упругой и пластической деформации, соответствующего наибольшей нагрузке; нагрузки разрушения образца; временного сопротивления, истинного сопротивления разрыву; относительного удлинения начальной расчетной длины; относительного сужения площади поперечного образца после разрыва.

Принцип работы машины основан на принудительном деформировании образца при одновременном измерении нагрузки, прикладываемом к образцу, и соответствующей ей величины его деформации.

Функционально можно выделить следующие системы, обеспечивающие заданный режим работы машины: систему деформирования образца, систему электропривода (согласующий трансформатор, блок управления, сглаживающий реактор), систему автоматики (выключатель питающей сети, выключатель аварийного отключения, блок конечных выключателей, узел защиты), систему измерения силы (измеритель силы, пульт оператора ПО-3), систему измерения перемещения активного захвата испытательной установки (датчик,

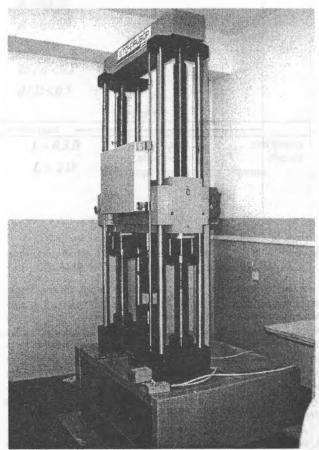


Рисунок 1 – Внешний вид разрывной машины ИР5145-500-10.

расположенный в неподвижной траверсе), систему измерения параметров испытания (пульт оператора ПО-3, программное обеспечение). Машина ИР 5145-500-10 работает в режимах растяжения, сжатия, циклирования нагрузки. Остановка испытания может производиться по достижению заданного значения нагрузки, заданного перемещения или по разрушению образца. За критерий разрушения образца и пре-

Загуляев Станислав Валерьевич. Аспирант каф. строительных конструкций Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

кращения испытания принят спад нагрузки за 0.1 сек. на заданное число процентов (на 25%, 50%, 75%). Возможно провеление испытаний до заданной нагрузки с учётом анализа разрушения образца или без него. Если анализ разрушения введён, то при наличии спада нагрузки за 0,1 сек на заданное число процентов (образец разрушается) процесс испытания будет остановлен, даже если заданная нагрузка недостигнута. Если анализ разрушения не вводится, то в процессе испытания система не реагирует на спады нагрузки, что даёт возможность, например при сжатии, исследовать физический процесс деформирования образца вплоть до его спрессовывания. После испытания подвижная траверса может возвращаться в исходное положение автоматически, или по команде оператора. Если указана предварительная нагрузка, можно указать производить ли остановку на ней.

Разрывная машина позволяет проводить испытание на усталость материала, при котором усталостное повреждение или разрушение происходит при упругопластическом деформировании. Количество циклов имеет диапазон ориентировочно от N=1 до  $N=10^3$ . Цикл напряжений имеет знакопостоянный, ассиметричный (рис. 2. а, б, в, г), отнулевой характер (рис. 2. б, в).

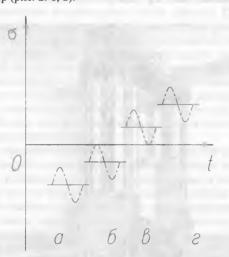


Рисунок 2 - Характеристики малоцикловых испытаний материалов на разрывной машине ИР 5145-500-10.

Характер процесса разрушения образца при сжатии отличен от характера разрушения образца при растяжении в зависимости от свойств испытываемого материала. При сжатии образца после его разрушения спад нагрузки длительный и пологий, без резких изменений. Поэтому для настройки автоматической остановки процесса испытания на сжатие имеется возможность ввести не только число процентов, но и время за которое этот спад определяется. Время и величина спада нагрузки в процентах вместе определяют скорость уменьшения нагрузки после разрушения образца.

Для определения скорости перемещения активного захвата, которая бы обеспечивала скорость нагружения в заданных пределах, надо воспользоваться выражением:

$$V_{a,z} = V_{\mu} \cdot \left( K_{a} + K_{\mu,\nu} \right) \cdot F_{a} \cdot 60 \,, \tag{1}$$

где  $V_{a,3}$  - скорость перемещения активного захвата, мм/мин;

 $V_{\mu}$  - заданная скорость нагружения, Н/мм<sup>2</sup>·с<sup>-1</sup>;

 $K_a$  - податливость образца, мм/Н;

 $K_{u,v}$  - податливость испытательной установки, которая для разрывной машины ИР 5145-500-10 составляет около 0,00002 MM/H;

 $F_{a}$  - площадь поперечного сечения рабочего участка об-

Податливость образца может быть определена из выраже-

$$K_o = \frac{1}{E \cdot F_o},\tag{2}$$

где  $K_o$  - податливость образца, мм/H;

рабочая длина образца по ГОСТ 1497, мм;

E - модуль продольной упругости, Н/мм<sup>2</sup>.

Скорость перемещения активного захвата можно корректировать в процессе испытания.

Полученные в процессе испытания результаты выводятся на монитор, или на принтер с пульта оператора ПО-3.

Для проверки силоизмерительной системы и ввода автоматической коррекции показаний силоизмерительной системы предусмотрен режим тарирования показаниями динамо-

Разрывная машина ИР 5145-500-10 с наибольшей предельной нагрузкой 500 кН предназначена для испытаний на растяжение образцов из металлов, прямоугольных и цилиндрических бетонных образцов, деревянных образцов, а также образцов на сжатие и изгиб.

Испытания на растяжение проводятся: для металлических образцов согласно ГОСТ 1497-84 "Металлы. Методы испытания на растяжение"[4] на стандартных образцах; для бетонных прямоугольных и цилиндрических образцов согласно ГОСТ 10180-90 "Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам"[3], для деревянных образцов вдоль и поперек волокон по ГОСТ 11493-65 "Древесина. Методы определения предела прочности при растяжении".

С помощью разрывной машины ИР 5145-500-10 возможно определение коэффициента интенсивности напряжения, используемого для однопараметрического описания полей напряжения и деформаций вблизи кончика трещины. Величина  $K_{\mathcal{C}}$  - комплексный инвариантный интегральный параметр свойств материала, его структуры, действующей нагрузки, его долговечности.

Для стальных круглых образцов с кольцевым надрезом коэффициент интенсивности напряжений:

$$K_{I} = \frac{P}{D\sqrt{d}}M_{I}$$

$$M_{I} = 0.7978 \sqrt{\frac{d}{D}\left[1 - \left(1 - \frac{2S}{D}\right)\frac{d}{D}\right]} \times \left[1 + \sqrt{1 + 3\frac{2S}{D}\left(\frac{D}{d} - 1\right)}\right]^{2}$$

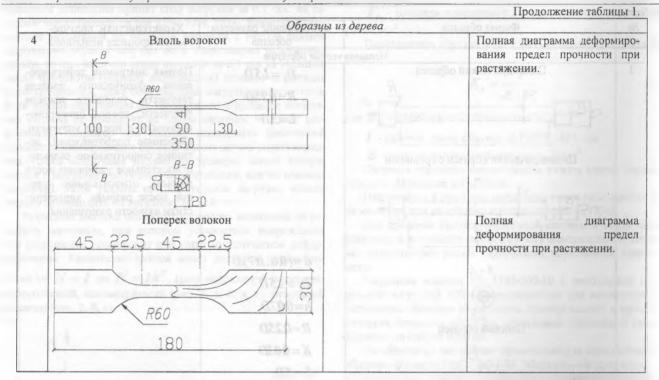
$$\sqrt{1 + \left(\frac{2S}{d} - 0.8012\right)\frac{d}{D}}$$
(3)

где P - разрушающая нагрузка, D - внешний диаметр образца, d - внутренний диаметр образца, образованный кольцевым концентратором, S - диаметр образца, при котором он начинает работать на сдвиг.

Для бетонных цилиндрических образцов диаметром  $\boldsymbol{D}$  с внешней кольцевой трещиной и внутренним контуром диаметром d коэффициент интенсивности напряжений представляют в виде [6]:

$$K_{IC} = \sigma_{H} \sqrt{\pi \alpha_{I}} , \qquad (4)$$

№ п/п	Форма образца	Соотношение размеров образца	Характеристики, получае- мые в процессе испытаний
	Металл	ические образцы	
1	Цилиндрический образец	$D_1 = 1.5D$	Полная диаграмма деформиро
	R	·	вания, физического предел
	FP	R=0.25D	текучести, условного предел
	CP -	L=5D	текучести, предел пропорцио
		1 - 32	нальности и предел упругости
	/		временное сопротивление, ис
	Цилиндрический образец с трещиной		тинное сопротивление разрыву
	A		относительное удлинение посл
	q R		разрыва, относительное суже ние после разрыва, характери
	P		стики вязкости разрушения.
	A		puspy mennin
-			
		1 (0( 07))	
	A - A	d = (0.607)D	
		$D_l = 1.5D$	
		h = 0.07D	2
	Плоский образец	R=0.25D	
	Тлюский образец		
	<u> </u>	K=0.03D	
	Pop	L=5D	
	1	2S/d < 0.1	A-100 - 51
	/	$d/D \leq 0.7$	ALL RAY
			1.
2		онные образцы	Пожила
2	Без инициирующей трещины	t = 0.3D	Полная диаграмм деформирования, преде
	11	L=2D	прочности на растяжение.
		- 10	
	1		
	> C==		
3	С инициирующей трещиной	h = 0.1D	Полная диаграмма деформиро
3	С инициирующей трещиной	h = 0.1D	вания, характеристики вязкост
3	С инициирующей трещиной	t = 0.3 D	
3	С инициирующей трещиной		вания, характеристики вязкост
3	С инициирующей трещиной	t = 0.3 D $L = 2 D$	вания, характеристики вязкост
3	С инициирующей трещиной	t = 0.3 D	вания, характеристики вязкост
3	С инициирующей трещиной	t = 0.3 D $L = 2 D$	вания, характеристики вязкост
3	С инициирующей трещиной	t = 0.3 D $L = 2 D$	вания, характеристики вязкост
3	С инициирующей трещиной	t = 0.3 D $L = 2 D$	вания, характеристики вязкост
3	С инициирующей трещиной	t = 0.3 D $L = 2 D$	вания, характеристики вязкост
3		t = 0.3 D $L = 2 D$	вания, характеристики вязкост
3	С инициирующей трещиной	t = 0.3 D $L = 2 D$	вания, характеристики вязкост
3		t = 0.3 D $L = 2 D$	вания, характеристики вязкост
3		t = 0.3 D $L = 2 D$	вания, характеристики вязкост
3		t = 0.3 D $L = 2 D$	Полная диаграмма деформиро вания, характеристики вязкост разрушения.
3		t = 0.3 D $L = 2 D$	вания, характеристики вязкост



где 
$$\sigma_{_H} = \frac{4P}{\pi d^2}$$
;  $\alpha_{_I} = \frac{\beta(1-\beta_{_I})D}{2(4-3.2\beta_{_I})}$ ;  $\beta_{_I} = \frac{d}{D}$ .

Характеристика материала  $K_{IC}$  связана с его удельной поверхностной энергией зависимостью [7]:

$$K_{IC} = \sqrt{2E\gamma} / (1 - v^2). \tag{5}$$

При испытании призматических образцов, коэффициент интенсивности напряжений определяется по формуле [2]:

$$K_C^* = \frac{F_C^*}{b^{1/2}t} \sqrt{\frac{\pi\lambda}{1-\lambda^3}}$$
 (6)

Безразмерный коэффициент интенсивности напряжений определяется в зависимости от [8]:

$$F_I^m = \frac{K_I}{\sigma_n \sqrt{\pi dc / D}} \,, \tag{7}$$

гле

$$F_{I}^{'''} = \frac{1}{2}(1 + \frac{1}{2}\lambda + \frac{3}{8}\lambda^{2} - 0.363\lambda^{3} + 0.731\lambda^{4}) \times$$

$$\times [1+0.1] \left(\frac{2c}{D}\right)^{1/2} \left(1-\frac{2c}{D}\right)^2 ], \quad \lambda = \frac{d}{D}, \quad c = \frac{D-d}{2}.$$

По результатам испытаний определяют следующие основные силовые критерии — коэффициент интенсивности напряжений  $(K_{IC})$ , энергетические — удельных энергозатрат (G) и джей-интеграла (J).

Определяемые характеристики трещиностойкости бетонов (наряду с другими характеристиками механических свойств) используют для:

- сравнения различных вариантов состава, технологических процессов изготовления и контроля качества бетонов;
- сопоставления бетонов при обосновании их выбора для конструкций;
- расчетов конструкций с учетом их дефектности и условий эксплуатации;

анализа причин разрушений конструкций.

Для экспериментального определения величены  $K_{IC}$  используются различные образцы: главное, чтобы существовало численное решение для тела данной конфигурации при данном приложении нагрузки. Все существующие методы получения экспериментальных данных для определения  $oldsymbol{K}_{IC}$ можно условно разбить на две группы: проводимые по равновесной и неравновесной схеме. Равновесные испытания на стадии локального деформирования образца характеризуются обеспечением адекватности изменения внешних сил внутренним усилиям сопротивляемости материала с соответствующим статическим развитием магистральной трещины. Неравновесные испытания характеризуются потерей устойчивости процесса деформирования образца в момент локализации деформации по достижении максимальной нагрузки, с соответствующим динамическим развитием магистральной трещины. Важной особенностью разрывной машины ИР 5145-500-10 является ее способность обеспечить полную равновесность механических испытаний образцов. Высокая жесткость испытательной установки и одновременное методическое соблюдение равенства потенциальных энергий машины и образца обеспечивают получение полностью равновесных диаграмм деформирования материала. При проведении испытаний исключается приводящее к спонтанному разрушению влияние потенциальной энергии, накапливаемой на упругой стадии деформирования образца, обеспечивается поэтапной адекватности уровня внешних сил и внутренних усилий сопротивляемости материала в образце при каждом единичном дискретном продвижении макротрещины по сечению на стадии локального деформирования. Практически при экспериментальных исследованиях полная равновесность выражается возможностью останавливать нагружение на любом этапе развития макротрещины. Важным преимуществом концепции равновесных испытаний является то, что вычисляемые по ПРДД энергетические и силовые параметры разрушения бетона инвариантны относительно условий испытания.

Кроме силового критерия разрушения может быть использован и энергетический [5]:



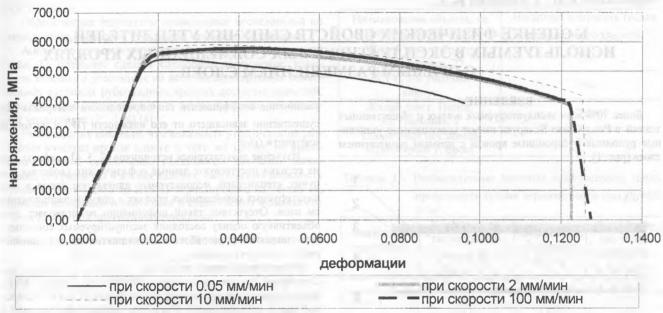


Рисунок 3 - Диаграмма деформирования стали 45 при испытаниях с различной скоростью нагружения.

$$G = G_c \tag{8}$$

Для плоской деформации [5]:

$$G = \frac{1 - v^2}{F} \left( K_I^2 + K_{II}^2 \right), \tag{9}$$

где  $G_c$  - удельная (эффективная) работа разрушения.

Величина G характеризует энергию, необходимую для образования единицы новой поверхности. Рассчитывают ее по формуле:

$$G = \pi \sigma^2 a / E \,, \tag{10}$$

где а - полудлина трещины.

В настоящее время одним из наиболее перспективных критериев разрушения при наличии трещин, как в упругой, так и в упругопластических областях является J-интеграл.

Экспериментальная методика определения  $\emph{\textbf{J}}$ -интеграла основана на измерении энергии деформации образца  $\emph{\textbf{U}}$  [6]:

$$J = -\frac{\partial U}{\partial a} \frac{1}{b} \tag{11}$$

Энергия U измеряется как функция длины трещины, а затем дифференцируется в отношении длины трещины.

Разрывная машина ИР 5145-500 позволяет осуществлять различные скорости нагружения. Определение влияния скорости нагружения на прочностные характеристики было проведено при испытаниях на растяжение металлических образцов на стали 45.

Результаты испытаний представлены на рис. 3. при увеличении скорости нагружения наблюдается упрочнение материала, а также увеличение относительной деформации.

Необходимо дальнейшие исследования для установления четкой зависимости между скоростью нагружения и характеристиками нагружения.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- ГОСТ 25.506-85. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. М.: Издательство стандартов, 1986. 61с.
- 2. ГОСТ 29167-91. Бетоны. Методы определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. М.: Издательство стандартов, 1992.
- ГОСТ 10180-90. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. – М.: Издательство стандартов, 1986. – 61с.
- 4. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытания на растяжение. М.: Издательство стандартов, 1986. 61с.
- 5. Е.А.Гузеев, С.Н.Леонович, К.А.Пирадов. Механика разрушения бетона: вопросы теории и практики. Брест: БПИ, 1999. 217 с.
- 6. 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.
- Зайцев Ю.В. Механика разрушения для строителей: Учеб. Пособие для строит. вузов. – М.: Высш. Шк., 1991. – 288 с.
- Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений: В 2-х томах.: Пер.с англ./Под ред. Ю.Мураками. М.: Мир, 1990. 1016 с.