

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПАРАМЕТРОВ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ БЕТОНА

С.Н. Леонович, Е.Н. Гузеев

БГПА, НИИЖБ

Минск, Москва

В статье проанализированы результаты экспериментальных исследований параметров трещиностойкости бетона, где варьировались вид образцов, схема испытаний, размер агрегативного включения, его прочность и прочность сцепления с матрицей и т.д.

Ключевые слова. Трещиностойкость бетона, вязкость разрушения, силовые и энергетические параметры, коэффициенты интенсивности напряжений.

В экспериментальных исследованиях силовых и энергетических параметров бетона детально рассмотрены процесс трещиностойкости бетона, вязкости разрушения.

На начальной стадии деформирования упругие деформации бетона сопровождаются диссипативными процессами вследствие раскрытия и развития микро- и макротрещин. На стадии активного формирования концевой зоны магистральной трещины (МТ) происходит переориентация и слияние развивающихся и собственных структурных трещин, что и заканчивается полной локализацией деформаций и стартом МТ. Стадия инициирования разрушения носит квазихрупкий характер деформирования для всех (независимо от заполнителя) бетонов, так как энергозатраты на нелинейные процессы здесь сравнительно невелики.

На стадии разупрочнения активизируются псевдопластические локальные деформации в концевой зоне движущейся МТ, сопровождаемые диссипативными процессами потери энергии. Первоначально псевдопластическое деформирование определяется процессами ветвления (бифуркации), а также роста вторичных (не связанных с вершиной МТ) трещин. В последующем - значительное увеличение (особенно в наполненных агрегатированных макроструктурах бетона) степени псевдопластического деформирования уже, по-видимому, связано с некоторой подвижкой агрегатов структуры в интенсивно разупрочняемой цементной матрице, зацеплением фрактальных поверхностей (дилатансией).

Отмеченный механизм деформации бетона на ниспадающей ветви и разупрочнения подтверждается данными опытов на образцах из бетона большого количества составов с заполнителями различной формы, крупности и прочности. Так при снижении крупности (максимальной) зерна включений нелинейность ниспадающего участка диаграммы P-V значительно снижается. Экспериментальные данные демонстрируют значимость факторов: размера агрегативного включения, его прочности и прочности сцепления с матрицей на трещиностойкость и сопротивляемость бетона разрушению. Эта зависимость фиксируется на уровне инициирования разрушения параметрами K_i и G_i и на всем этапе разрушения по параметру G_F (табл.1,2). Существенное влияние на перечисленные факторы оказывает вид образцов и схема их испытаний. К анализу привлечены результаты испытаний, выполненные на образцах призмах (изгиб) и кубах (внецентренное сжатие), а так же на цилиндрах (раскол) и плитах (растяжение) (табл.3). Во всех опытах наблюдается четкая зависимость параметра K_{Ic} от размера (максимального) зерна заполнителя. В опытах на раскалывание цилиндров из гидротехнического бетона на гравии с крупностью зерен от 30 до 90 мм тенденция связи K_{Ic} с размером агрегативного включения сохраняется. При этом

Таблица 1

Вид композита	R_b МПа	R_{bt} МПа	R_{btg} МПа	$E_b \cdot 10^4$ Мн/м ²	G_i Н/м	G_F Н/м	J Н/м	K_i Мн/м ^{3/2}	K_c Мн/м ^{3/2}
1. Серия "СШ" ^{х)}									
Цементный камень			1,31	0,7	5,41	17,64	3,65	0,2	0,16
2. Мелкозернистый бетон			2,11	1,219	9,11	39,39	6,24	0,33	0,27
3. Бетон со щебнем фракции 5-10 мм			4,74	2,055	21,77	142,4	13,3	0,67	0,57
4. Бетон со щебнем фракции 5-20 Серия "ЛЛ"			4,77	1,71	28,12	130,4	17,59	0,69	0,55
1. ШЦГР (ПЦ-40)									
2. ШЦ 1/1	17,2	0,83	1,44	2,67	5,24	17,5	2,63	0,38	0,34
3. ШЦ 1/3	18,3	0,857	1,47	2,75	8,79	31,4	5,06	0,49	0,43
4. ГЦГР	26,2	0,891	1,53	3,2	9,16	30,7	5,38	0,54	0,49
5. Г 1/1	21,1	1,07	1,84	2,93	7,09	20,8	4,59	0,46	0,41
6. Г 1/3	20,9	0,93	1,60	2,92	7,2	37,8	4,79	0,46	0,41
	15,9	0,8	1,38	2,57	4,6	26,7	2,43	0,32	0,84

^{х)} В серии "СШ" данные приведены по результатам испытаний 8-15 образцов для каждого композита.

Таблица 2

Параметры трещин, прочностные, деформативные и силовые характеристики бетона

Вид композита	Номер состава	Компоненты кг/м ³ л/м ³				В/Ц	Прочность МПа		Трещины а _с × 10 ³ , м	Е дин. МПа	K _{тс} МПа м ^{1/2}
		Цемент	Песок	Щебень	Вода		R _{рр}	R _б			
							8	9			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Цементный камень	1	1350	-	-	540	0,4	2,82	35,2	5,03	-	0,20
	2	1097	549	-	439		3,35	47,1	-	-	
Мелкозернистый бетон	3	900	900	-	360	0,4	3,72	48,8	11,56	25,1	0,4
	4	757	1135	-	264		3,04	43,9	21,91	29,01	0,45
	5	660	1321	-	264		2,52	38,9	36,28	28,0	0,48
	6	586	1465	-	234		2,30	34,1	38,28	27,6	0,45
	7	515	1540	-	206		2,14	33,4	40,37	-	0,43
	8	543	272	1313	217		1,72	39,9	51,4	33,9	0,39
Бетон	9	592	296	1196	237		1,62	35,7	52,16	31,2	0,37
	10	408	612	1195	163		2,48	37,0	49,18	36,7	0,55
	11	438	631	1092	175	0,4	2,74	34,7	52,87	35,7	0,63
	12	503	705	871	201		3,37	43,9	49,53	23,2	0,75
	13	390	975	871	156		3,1	34,5	50,99	32,5	0,7
	14	441	1100	645	176		2,23	33,0	50,27	30,7	0,5
Цементный камень	1	1116	-	-	614	0,55	2,26	23,5	6,34	-	0,18
	2	765	765	-	421		2,73	34,2	27,17	-	0,45
Мелкозернистый бетон	3	682	1023	-	375		2,18	33,1	38,91	20,2	0,43
	4	608	1217	-	335		2,19	30,0	38,55	22,1	0,43
	5	544	1361	-	299	0,55	2,0	29,1	44,54	24,7	0,42
	6	485	1454	-	266		1,92	29,7	39,17	26,1	0,38
	7	440	1539	-	242		1,73	26,04	43,5	22,7	0,39

Продолжение таблицы 2

Бетон	8	294	735	1195	162		2,39	30,7	54,9	31,4	0,56
	9	362	904	871	199		2,43	31,3	55,02	30,2	0,57
	10	312	1093	754	172	0,55	1,9	23,0	56,09	28,9	0,46
	11	275	962	978	171		2,09	26,1	59,54	32,5	0,51
Цемент. кам. Мелкозернистый бетон	1	950	-	-	665	0,7	1,3	16,2	17,1	-	0,17
	2	565	1130		395		1,55	23	28,14	19,5	0,26
	3	501	1253		351		1,4	21	45,92	20,9	0,3
	4	461	1382		322	0,7	1,35	20,5	43,02	22,7	0,28
Бетон	5	416	1457		291		1,28	20,0	44,5	23,0	0,27
	6	388	1551		271		0,97	18,0	45,1	20,7	0,26
	7	225	786	1195	157,5		1,7	25,9	58,17	-	0,41
	8	241	845	1092	169	0,7	1,95	26,9	60,59	-	0,48
	9	260	908	978	182		2,0	23,5	62,5	-	0,5
	10	226	1019	378	158		1,81	20,4	61,81	22,1	0,45
	11	241	1086	871	169		1,71	22,0	66,21	-	0,44
	12	258	1160	754	180		1,41	16,8	68,19	-	0,36

вероятно предположить, что существенное влияние на отмеченную зависимость оказывает количество цементного клея и заполнителя, а также состояние зон их контактов, прочность сцепления. Технологический фактор состава компонентов в смеси весьма существенно определяет процесс инициирования разрушения. Важными факторами являются для наполненного композита характеристики свойств цементирующего клея. В то время как для цементного камня значения K_{IC} не существенно зависят от V/C : 0,2 при $V/C = 0,4$; 0,18 при $V/C = 0,55$ и 0,17 при $V/C = 0,7$ (табл.2).

Рассматривая взаимозависимость между характеристикой трещиностойкости K_{IC} и прочностью бетона на растяжение при раскалывании (R_{pp}) следует отметить, что композиты с более высоким сопротивлением растяжению имеют и более высокие значения K_{IC} . Однако четко прослеживается значимость фактора размера зерна в композите.

Анализ результатов неравновесных испытаний показывает, что в испытаниях образцов без надреза упругая энергия подается в образец в больших количествах (на поиск слабого звена). Это количество увеличивается в зависимости от размера образца, его конфигурации, схемы нагружения, но не от физических свойств бетона. Следовательно, при испытаниях образцов без инициатора трещины происходит завышение параметров деформирования и разрушения, искажение реальных свойств бетона. Так, значение G почти вдвое больше, а K_I до 30%.

При неравновесных испытаниях (табл.4,5) длина надреза заметно влияет на значение J_{IC} . С увеличением длины трещины от 15 до 35мм значение J_{IC} для мелкозернистого бетона уменьшилось вдвое. При равновесных испытаниях бетона фактор длины надреза оказывается инвариантным и J_{IC} сохраняет свое значение при увеличении длины надреза более чем в два раза.

Величина параметра K_{IC} для бетона связана с количеством цемента, воды, песка и щебня в его составе. Для трехкомпонентного композита - бетона при содержании песка и щебня $\varphi_3 \geq 0,65$ и равных количествах песка $\varphi_{п} = 0,35-0,4$ и щебня $\varphi_{щ} = 0,35-0,4$ от общего объемного содержания заполнителей параметр K_{IC} имеет более высокие значения. Для двухкомпонентного композита - мелкозернистого бетона наибольшее значения K_{IC} получены для составов, в которых $\varphi_{п} \approx 0,5$.

Для трехкомпонентного композита - бетона значения K_{IC} имеют широкий диапазон от 0,37 до 0,75 при $V/C = 0,4$; от 0,46 до 0,57 при $V/C = 0,55$ и от 0,36 до 0,5 при $V/C = 0,7$. Столь широкий диапазон является следствием варьирования количеством цемента от 592 кг до 390 кг, песка от 272 до 1100 кг и щебня от 1313 до 645 кг/м³. При этом и прочностные свойства бетона имели диапазон соответственно в пределах трех классов В-40... В-30, В-30... В-20 и двух классов В-20... В-15.

Для двухкомпонентного композита мелкозернистого бетона K_{IC} имеет несколько меньшие значения и более узкий диапазон: 0,4-0,48 при $V/C = 0,4$; 0,38-0,45 при $V/C = 0,55$ и 0,2-0,3 при $V/C = 0,77$. При этом прочностные свойства бетона находились в тех же пределах классы В-40... В-30, В-30... В-20 и В-20... В-15.

В опытах впервые получено подтверждение того, что только при проведении полностью равновесных испытаний бетона по принятой в исследованиях методике трехточечного изгиба призм с разгрузкой возможно получать инвариантные и достоверные величины контурного интеграла J_{IC} и K_{IC} для бетона с учетом его упругопластического деформирования в вершине трещины.

При проведении неравновесных испытаний с ростом длины трещины в бетоне увеличиваются значения K_{IC} . Интенсивность роста K_{IC} замедляется с увеличением крупности заполнителя. Для разных схем испытания при одной и той же глубине трещины значения K_{IC} могут существенно различаться. Влияние крупности заполнителя проявляется и в том, что при глубине начального надреза меньше d_{max} чувствительность образца к надрезу понижается. Значения K_{IC} при устойчивом распространении трещины больше, чем при неустойчивом росте.

Таким образом, наиболее достоверные инвариантные экспериментальные значения параметров K_{IC} , G_{IC} , J_{IC} для бетона могут быть получены только по методике полностью равновесного деформирования. Эти параметры характеризуют затраты упругой энергии на разрушение и затраты энергии на упругопластическое деформирование. В опытах установлена устойчивая связь параметров K_{IC} , G_{IC} и J_{IC} с прочностью бетона и размером зерна структуры. представляется обоснованным использовать разработанный метод для классификации бетона по более универсальным инвариантным параметрам энергии разрушения наряду с вариантным параметром прочности бетона.

Таблица 3

Характеристики прочности и трещиностойкости конструкционных материалов

№ пп	Материал	Схема нагружения	$R_{ср}$ МПа	$\sigma_{в}(R_b)$ МПа	G_{IC} Н/М	K_{IC} МН/м ^{3/2}	K_{IC} МН/м ^{3/2}
1	2	3	4	5	6	7	8
1.	Цементный камень	Растяжение при раскалывании Трехточечный изгиб равновесное испытание с надрезом.	2,82	35,5		0,17-0,2	-
			1,31		3,52	0,16	-
2.	Мелкозернистый бетон б=3мм В/Ц=0,4 В/Ц=0,55 В/Ц=0,70 Мелкозернистый бетон б=3 мм В/Ц=0,55 " - " " - " В/Ц=0,70	Растяжение при раскалывании	1,62-3,3	35,7-43,9	-	0,37-0,75	-
			1,87-2,73	26,0-34,5	-	0,39-0,45	-
			0,97-1,55	18,0-23,0	-	0,2-0,26	-
		Трехточечный изгиб равновесное испытание с краев. надрезом	2,11	-	5,98	0,27	-
			Внеш. сжатие призмы	1,29	-		0,106
					0,6	-	
3.	Песчаник мелкозернистый б=0,1мм с глинист. кварцевым цементом.	Внецентр. растяжение тоже компактного образца с трещиной	9,7	137,0		1,47 0,59-0,03 0,64-0,15	
4.	Песчаник сухой влажный					0,6	
						0,4	

Продолжение таблицы 3.

5.	Гранит	Трехточечный изгиб образца с краевой усталостн. тр-й Внецентрен. растяж.				1,17-0,17 1,01-1,07	
6.	Габбро	Трехточечный изгиб образца с краевой усталостн. тр-й. Внецентрен. растяж.				1,89-0,14 1,01-1,07	
7.	Керамика	Внецентрен. растяж.				4,33-0,06	
8.	Бетон б=5; 20 В/Ц=0,4 В/Ц=0,55 В/Ц=0,7 Бетон б=20мм В/Ц=0,5	Растяжение при раскалывании Трехточечный равновесный изгиб	1,62-3,37 1,9-2,43 1,4-2,0 4,77	35,7-43,9 23,0-31,3 16,8-23,5 17,73		0,37-0,75 0,46-0,57 0,36-0,5 0,55	
9.	Бетон б=10 В/Ц=	Внецентр. сжатие призмы	3,12			0,22	
10.	Бетон б=10 В/Ц=0,5	Внецентр. сжатие кубы срез трехточечн. плиты	2,2	33,1-38,3		0,306-0,337	3,76-3,78
11.	Сталь 3 40х20хГ 2 φ 22 80С	Трехточечный изгиб	250 340 480 66,0	500 600 800 1060	40,2 · 10 ³	22,0 93,0 30-45 39,7-40,6	- - - -

Продолжение таблицы 3.

12.	Железобетон Бетон б=10 мм Сталь 35 ГС $\mu = 0,9\%$ 1ф 8 $\mu = 1,8\%$ 2ф 8 $\mu = 2,8\%$ 2ф 10 Бетон б=10мм Фибра Ст. 3 1% 2% Бетон б=10мм Ар-ра 1ф 4 $\mu = 0,25\%$ 1ф 8 $\mu = 1,0\%$ 1ф 10 $\mu = 1,5\%$	Трехточечный изгиб, статическое нагружение		22-25			
					3060-3730	9,2	
					1707-3620	8,5	
					1770-2910	8,1	
		Плита с двумя надрезами срез трехточечный	2	22,67	35,2-37,1	0,38-0,59	3,3-5,55
			2,1-3,1		36,4-37,3	0,49-0,6	6,83
		Плита с двумя надрезами, срез трехточечный	2,22		38,3	0,506	3,26-3,55
				0,306	4,9-6,23		
				0,306	4,3-5,47		

Таблица 4

Результаты испытаний бетона по равновесной и неравновесной схемам.

Вид и размеры образцов	Длина иниц. надреза мм	R_{bf} МПа	$E_b \times 10^4$ МПа	J НМ	K_i МН/м ^{3/2}	K_{iC} МН/м ^{3/2}	Схема испытаний
Бетон состава 1:1,63:3,41 В/Ц=0,6 $R_{ц}=38,2$ МПа	15	5,66	3,81	21,37	0,63	0,9	Трехточечный изгиб с упру- гим кольцом -равновесные
Песок М-2,14 Щебень 5...10мм Размеры: 50x50x320мм $R_b=25,2$ МПа	25	5,47	3,71	20,96	0,54	0,88	
Мелкозернистый бетон состав 1:3; В/Ц=0,85 $R_{ц}=38,2$ МПа	35	5,97	3,79	20,53	0,48	0,88	
Песок М=2,14 $R_b=17,7$ МПа размеры 70x70x280мм	15	2,77		7,85	0,36		Трехточечный изгиб на прессе - не равновесные
	25	1,46		5,22	0,31		
	35	2,31		3,89	0,27		

Таблица 5

Исследования инвариантности параметров разрушения бетона.

Размеры инициирующих надрезов	Параметры разрушения									Шифр вида испытаний	Вид испытаний
	R_{ch} , МПа	$E_b \times 10^4$	G_i , Н/м	G_f , Н/м	$G_{сф}$, Н/м	$G_{св}$, Н/м	J_1 , Н/м	K_1 , Н/м $_{3/2}$	K_c , Н/м $_{3/2}$		
1. Без надреза	4,6	2,4	73,31	333,3	343,3	-	-	1,33	-	Не равновесн.	Без разгрузки
2. $a_c=35$ мм; $a_d=5$ мм Ширина 1...1,2мм	6,28	2,58	40,58	133,3	147,1	-	-	1,02	-		
3. Без надреза	4,62	2,4	76,3	293,4	296,9	-	-	1,36	-	Равновесн	" - "
4. $a_c=35$ мм; $a_d=5$ мм	6,37	2,36	35,1	138,1	144,8	29,25	21,67	0,91	0,83	" - "	" - "
5. " - " " - "	6,55	2,4	34,5	138,2	144,1	29,2	21,67	0,92	0,83	" - "	С разгруз.
6. $a_c=25$ мм; $a_d=5$ мм	4,84	2,3	39,3	143,3	152,2	30,94	20,66	0,96	0,86	" - "	" - "
7. $a_c=45$ мм; $a_d=5$ мм	7,51	2,4	36,7	129,7	138,5	28,24	22,58	0,95	0,83	" - "	" - "
8. $a_c=35$ мм; $a_d=5$ мм	6,48	2,3	34,8	136,9	143,7	28,1	21,06	0,9	0,81	" - "	" - "

Испытания проведены на образцах призмах 100x100x400 мм по схеме трехточечного изгиба с разгрузкой на ниспадающей ветви диаграммы деформирования. Бетон со щебнем фракции 5...15 мм.