

ВЛИЯНИЕ ТЕКСТУРЫ И СТРУКТУРЫ БЕТОНА НА ЕГО ВЯЗКОСТЬ РАЗРУШЕНИЯ

Гузев Е.А.

НИИЖБ, г. Москва

Леонович С.Н.

БГПА, г. Минск

Сопротивление деформированию от внешних воздействий, зарождению и развитию трещин в структуре композитного многомасштабного материала, как известно, обеспечивается физико-химическими связями, возникающими в процессе гидратации цемента. В этом процессе важную роль играют адгезионные силы на поверхностях контакта зерен заполнителей (песка и щебня), втопленных в цементную матрицу. Состояние поверхности, ее шероховатость и пористость, водоудерживающая способность и количество заполнителей в объеме во многом определяют уровень зонной локальной блокировки, сплошности и пористости макро и микроструктуры бетона и естественно сопротивление развитию размеров трещин, и главное деформирование при движении трещин в качестве поглотителей энергии.

В исследованиях приняты четыре вида крупных заполнителей фракции 5-20 мм: гранитный щебень, природный гравий, аглопоритовый щебень и керамзитовый гравий. Характеристики аглопоритового щебня и керамзитового гравия – в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики искусственных заполнителей

Вид крупного заполнителя	Размер фракции, мм	Марка по насыпной плотности, кг/м ³	Пустотность, %	Влажность, %
Аглопоритовый щебень	5÷20	700	54,8	1,0
Керамзитовый гравий	5÷20	450	42,6	1,0

Аглопоритовый щебень Минского завода строительных материалов и керамзитовый гравий Витебского ПО "Керамзит".

Таблица 2

Составы бетона по виду и количеству крупного природного заполнителя

Шифр состава	Вид заполнителя	Расход материалов на 1 м ³ бетона, кг				В/Ц	Прочность бетона на сжатие, МПа	Плотность бетона ρ, кг/м ³
		Ц	П	Щ	В			
Щ	Гранитный щебень	352	714	1125	153	0,44	25,0	2320
Г	Природный гравий	342	705	1102	153	0,45	25,0	2270

Примечание: Подвижность бетонных смесей – 7 см. Условия твердения – ТВО.

Таблица 3

Объемное содержание природных заполнителей в составах бетонов

Шифр образцов	Примерное соотношение составляющих бетонной смеси, %		Объемная концентрация КЗ, φ	Плотность бетонного образца ρ, кг/м ³
	цементно-песчаный раствор (ЦПР)	крупный заполнитель (КЗ)		
Щ ЦПР	100	0	0	2050,0
Щ 1/1	50	50	0,353	2310,0
Щ 1/3	25	75	0,621	2420,9
Г ЦПР	100	0	0	2079,4
Г 1/1	50	50	0,375	2264,6
Г 1/3	25	75	0,643	2370,0

Примечания: 1. Получение составляющих бетонных смесей достигалось путем просеивания через сито № 5 исходной смеси на растворную часть (ПР) и крупный заполнитель (КЗ).

2. Объемная концентрация φ определялась с учетом межзерновой пустотности заполнителя и примерного соотношения составляющих ЦПР и КЗ.

Таблица 4

Составы бетона по виду и количеству искусственных заполнителей

Шифр состава	Вид крупного заполнителя (КЗ)	Расход материала в исходной смеси, кг/м ³				В/Ц	Плотность бетона, кг/м ³	Прочность бетона при сжатии, МПа
		Ц	П	КЗ	В			
А-1	Аглопоритовый щебень	198	891	667	186	0,94	1910	15,0
А-2		401	902	695	205	0,51	1950	30,0
К-1	Керамзитовый гравий	220	830	388	212	0,96	1540	10,0
К'-2		530	1004	469	237	0,45	1570	15,0

Примечание. Подвижность бетонных смесей - 7 см.

Условия твердения - ТВО.

Объемное содержание заполнителей в составах легких бетонов

Шифр образцов	Примерное соотношение составляющих бетонной смеси, %		Объемная концентрация КЗ ф	Плотность бетонного образца ρ , кг/м ³
	ЦПР	КЗ		
<u>А ЦПР</u>	100	0	0	2035,4
А 1/1	50	50	0,310	1895,6
А 1/3	25	75	0,580	1751,3
<u>А ЦПР</u>	100	0	0	2135,5
А 1/1	50	50	0,310	1944,5
А 1/3	25	75	0,580	1813,5
<u>К ЦПР</u>	100	0	0	2022,9
К 1/1	50	50	0,293	1617,9
К 1/3	25	75	0,579	1174,4
<u>К ЦПР</u>	100	0	0	2148,6
К 1/1	50	50	0,293	1646,9
К 1/3	25	75	0,579	1493,9

- Примечания: 1. Получение составляющих бетонных смесей достигалось путем просеивания через сито № 5 исходной смеси на растворную часть (ЦПР) и крупный заполнитель (КЗ).
2. Объемная концентрация заполнителя ϕ определялась с учетом межзерновой пустотности КЗ и примерного соотношения составляющих ЦПР и КЗ.

Составы бетонов с различными видами заполнителей приведены в табл. 2..5. По активности цемента, его количеству $352 \div 342$ кг/м³, параметрам $\phi_{цк} = 0,2$ и $0,16$, $\phi_{щ} = 0,48 \div 0,45$, при В/Ц = $0,44 \div 0,45$ составы Щ-1 и Г-1 – наиболее близки составу 5.1 (табл. V.I-2), что позволяет использовать в анализе результатов опытов и установление закономерности для обосновывающей роли количества крупного заполнителя и состояния его поверхности на трещиностойкость структуры бетона.

Составы на аглопорите А-1 и А-2 и керамзите К-1 и К-2 по расходу цемента $200-530$ кг/м³ и В/Ц = $0,45 \div 0,96$ охватывают обширный диапазон $\phi_{цк} = 0,18 \div 0,28$ и $0,25 \div 0,458$ и в то же время, по содержанию крупного заполнителя $\phi_{щ} = 0,35 \div 0,25 \div 0,3$ значительно уже, чем составы Щ-1 и Г-1.

Рассеивание бетона через сито № 5 для отделения растворной цементно-песчаной массы и последующее формирование составов: Ц:П:В = $600 + 1300 + 150 = 2050$ кг/м³

$$\text{Щ } 1/1 = \text{Ц} : \text{П} : \text{В} + \text{Щ} = 358,6 + 717 + 76 + 1150 = 2310 \text{ кг/м}^3,$$

приводило к значительному изменению концентрации цементного камня $\phi_{цк} = 0,365$ и $\phi_{щ}^{ш11} = 0,188$, что при равном В/Ц некоторым образом влияло на общий объем пор в бетоне (7,7 %) (табл. 6).

В зависимости от количества цемента и воды и степени гидратации цемента формировалась структура гелевого состава пор и капилляров в цементном камне и поровое пространство в бетоне. Таким образом в структуре композита возникла система активных сил и реактивных сил, обеспечивающих трещиностойкость бетона.

Испытания на определение трещиностойкости бетона проведены по методике ГОСТ 29167-91. Результаты испытаний приведены в табл.6 - 9.

Характер деформирования бетонов с различными видами крупного заполнителя имеет особенности, присущи каждому заполнителю. При примерно равной концентрации цементного камня ($0,18 \div 0,2$) (кроме $K_2-0,45$) и близких величинах общей пористости бетона ($13 \div 20\%$) в структуре сформированы существенно различные системы активных связей и реактивных сил. При этом как в активных связях, так и в реактивных важную часть занимают адгезионные силы.

Естественно, что адгезионные силы, их уровень определяется количеством заполнителей и состоянием геометрии поверхности зерен. Зависимости $K_I = f(\phi_{цк}; \phi_{п}; \phi_{щ})$ и $G_I = f(\phi_{цк}; \phi_{п}; \phi_{щ})$ приведены на рис. 1.

Таблица 7

Влияние вида заполнителя на прочностные, деформативные характеристики и энергетические, силовые параметры трещиностойкости бетона

Вид заполнителя в бетоне	Прочностные и деформативные параметры, МПа			Энергетические и силовые параметры трещиностойкости		
	R	R _b	E _b × 10 ⁻⁴	W _m × 10 ⁻² Нм	W _c × 10 ⁻² Нм	W _l × 10 ⁻² Нм
Щебень(Щ)	20,8-24,5	16,2-18,3	1,920-2,458	2,79-1,44	3,79-4,12	21,60-15,80
Гравий (Г)	21,2-28,1	15,9-20,9	2,573-2,921	0,54-1,88	2,40-2,60	14,62-20,70
Аглопорит(А)	20,6-38,4	18,5-33,6	1,778-2,406	0,10-1,78	3,58-4,53	7,63-15,11
Керамзит(К)	23,0-19,1	18,4-18,3	1,875-1,634	0,94-0,56	2,58-3,21	3,71-6,30
Вид заполнителя в бетоне	Энергетические и силовые параметры трещиностойкости					
	G _i , Н/м	G _F , Н/м	J _i , Н/м	K _i , МН/м ^{3/2}	K _c , МН/м ^{3/2}	
Щебень (Щ)	10,72-8,79	41,35-31,49	6,87-5,07	0,45-0,49	0,40-0,42	
Гравий (Г)	4,61-7,21	26,75-37,88	2,43-4,79	0,35-0,46	0,34-0,39	
Аглопорит (А)	5,95-10,45	18,18-32,52	2,63-6,16	0,33-0,50	0,32-0,41	
Керамзит (К)	5,67-6,05	10,14-15,21	3,34-3,9	0,33-0,31	0,26-0,29	

На этапе упругого деформирования, упругая энергия затрачивается на создание напряжений в активных связях цементной матрицы, на адгезионные контакты с заполнителями и реактивные силы в вершинах трещин в капиллярах, пустотах, порах. С ростом напряжений усиливаются процессы делокализации трещин в блоках структуры, их движения в зоны инициирования предразрушения. При равных значениях $\phi_{щ}$ в структурах бетона с контактами цементной матрицы к гранитному щебню с шероховатой поверхностью граней зерен заметно выше, чем в структурах бетона с зернами почти шлифованного гравия $W_{сщ} = 3,79 \div 4,12 > W_{сг} = 2,4 \div 2,6$ Н.М (табл. 7). И еще выше уровень затрачиваемой работы в структурах с зернами ноздреватого аглопорита $W_{са} = 3,59 \div 4,53$ НМ. Роль адгезионных сил между матрицей и зернами керамзита очевидна. Контакт матрицы с зернами керамзита имеет высокий адгезионный уровень. Однако в опытах этот эффект погашается низкой прочностью керамзита и малым содержанием зерен $\phi_{щ} = 0,25 \div 0,29$, против аглопорита 0,35 и щебня 0,48. Этап инициирования разрушения, объединения микро и страгивания макротрещины объединяет в себе максимальную концентрацию напряжений в вершинах микротрещин в дефектах структуры капиллярах, порах и пустотах в контактных зонах матрицы с заполнителями. Баланс реактивных и активных сил в физико-химических связях цементного камня в зонах формирования вершины главной магистральной макротрещины в момент ее страгивания зависят от количества цемента и прочности матрицы и структуры дефектов в ней в виде пустот и количества заполнителя.

На ПРДД четко обозначены уровни критической силы трещины P_c в зависимости от этих параметров и характер движения магистральной трещины по структуре бетона, матрице и зернам заполнителей. Чем больше зерен ($\phi_{щ}$) заполнителя щебня с развитой поверхностью на пути движения трещины, тем выше вязкость разрушения и энергозатраты. Адгезионный фактор – слабое сцепление цементно-песчаного раствора с гладкой поверхностью зерен щебня проявился в обратном, чем больше слабых плоскостей контакта матрицы и зерен ($\phi = 0,63$), тем меньше затрат энергии на старт трещины $G_1 = 4,61$ Н/м³ против 7,21 Н/м³ при содержании зерен $\phi = 0,375$ (табл. 8).

Роль количества и формы пустот в матрице цементного камня в составах бетона со щебнем и гравием на этом этапе проявилась в равной степени, так как их количество практически равное (табл. 6).

Анализируя явление адгезионного фактора на трещиностойкость бетона при использовании зерен ноздреватого аглопорита, необходимо иметь ввиду, что состав А₁ имеет $\phi_{щк} = 0,28$, а $\phi_{щ} = 0,356 < 0,48$ для состава со щебнем и гравием и В/Ц = 0,51 > 0,44.

Важным фактором реактивной составляющей в составах А и А₁ являются значительная пустотность зерен и повышенная пустотность в цементном камне 40 ÷ 63% и

общая пористость бетона 18÷21%. Эти факторы явились причиной повышенной трещиностойкости аглопоритобетона. Вариации факторов пустотности зерен, цементного камня и адгезионной составляющей объясняют соответствующий уровень энергозатрат на процессы делокализации трещин в блоках структуры при различном количестве цементного камня, развития микротрещин в вершинах капилляров, пор и пустотах заполнителей при их разном объемном содержании (рис. V.I.2 – 3..V.I.2–4). В составе А и А' удельные затраты работы на упругое деформирование при концентрации зерен 0,31 больше, чем при концентрации 0,58 вследствие того, что относительно большее количество более прочного раствора привело к увеличению количества активных связей, при несколько пониженном уровне адгезионных связей, но и относительно меньшем количестве инициаторов роста напряжений в пустотах зерен. С увеличением фщ возрастает уровень реактивных сил в структурных трещинах зерен и цементного камня, что вероятно понижает роль адгезионных сил. Изложенные соображения подтверждаются и в анализах величин удельных энергозатрат на упругое деформирование G_i , полных энергозатрат G_F и по величинам констант K_c (табл. 9). Аналогичные явления имеют место в процессе деформирования керамзитобетона, на этапе делокализации зерен в матрице и в зернах инициирования разрушения в микротрещинах матрицы 1 и в зернах участок ОС и на этапе формирования и предразрушения, старта и движения магистральной трещины по структуре, матрице, околосерновым зонам и зернам.

Наиболее вероятными являются факторы, влияющими на уровень параметров трещиностойкости, уровень активных связей в матрице, уровень реактивных сил в ней, объемное содержание зерен с внутренними пустотами, обладающими активностью к развитию микротрещин в своей структуре. Баланс этих факторов подтверждается величинами удельных энергозатрат на упругое деформирование и квазистатическое страгивание макротрещины G_i для состава K_1 при $B/C=0,96$, объемной концентрации $\varphi_{цк}=0,25$ и $\varphi_{щ}=0,365$ составляет 2,08 Н/м. При увеличении фщ до 0,633 величина G_i возрастает до 4,37 Н/м. Для состава K_2 при $B/C=0,45$ $\varphi_{цк}=0,25$ и $\varphi_{щ}=0,365$ энергозатраты на инициирование разрушения составляют 5,87, что значительно выше, чем G_i при увеличенной объемной концентрации $\varphi_{щ}=0,633$

Зависимости показателей трещиностойкости бетонов от вида и количества крупного заполнителя наглядно представлены на рис.2–4 и объемных диаграммах рис. 5–7.

Закономерности зависимости основной расчетной характеристики K_{IC} от объемного содержания крупного заполнителя с различным уровнем адгезионных сил на поверхности зерен для проведения опытов приведены на рис. 8

Эмпирическая зависимость K_{IC} от фщ может быть выражена прямолинейной

$$K_I = A + B\varphi_{щ}$$

При этом по данным экспериментальных исследований в рамках изученных уровней параметров, характеризующих составы бетонов, вид и состояние поверхности зерен и на уровень адгезионных сил отображает энергетический коэффициент

Важным фактором трещиностойкости бетона на различных видах заполнителей является так же и элементы структуры в виде капилляров и гелевых пор, характеризующих условно реактивные силы, возникающие в вершинах трещин этих элементов, как правило заполненные жидкостью или паром.

Так уровень основного расчетного параметра трещиностойкости K_{IC} связан с величиной капиллярной пористости цементного камня в бетоне на гранитном щебне зависимостью:

$$K_{IC} = 1,05 - 0,015\Pi_{цк}^{кап}$$

В исследованиях установлено, что вид зерен крупных заполнителей влияет на уровень K_{IC} через коэффициент

В исследованиях установлено, что капиллярные поры цементного камня также являются значимым фактором трещиностойкости бетона (рис.V.I.2-). Из экспериментальных данных следует, что чем выше содержание капиллярных пор в цементном камне, тем большим сопротивлением развитию трещин обладает структура бетона.

Закономерность выражается эмпирической зависимостью:

$$K_{IC} = 0,3 + 0,066(\Pi_{цк}^{кап} - 10)$$

При этом некоторое влияние на установленную закономерность имеет вид крупного заполнителя, вероятно его плотность или наличие трещинообразных дефектов в зоне адгезионных контактов, и в самой структуре зерен.

Влияние вида заполнителя на трещиностойкость близких по прочности бетонов

Вид крупного заполнителя в бетоне	R, МПа	$E_b \times 10^{-4}$, МПа	Силовые и энергетические параметры трещиностойкости бетона										
			$W_m \times 10^{-2}$, Н.м	$W_e \times 10^{-2}$, Н.м	$W_l \times 10^{-2}$, Н.м	$W_c \times 10^{-2}$, Н.м	G_i , Н/м	G_{F_s} , Н/м	J_i , Н/м	K_i , МН/м ^{3/2}	K_e , МН/м ^{3/2}	$W_m - W_c$, %	W_l / W_c , %
Щ фцк=0,2 фщ=0,48	24,5	2,758	1,44	4,12	15,80	21,36	8,79	31,49	5,07	0,49	0,42	26,0	73,9
			0,54	2,40	14,62	17,55	4,61	26,75	2,43	0,46	0,35	16,8	83,3
Г фцк=0,16 фм=0,485	21,2	2,573	0,89	3,58	7,63	12,12	5,95	18,18	2,63	0,33	0,32	38,9	83,0
			0,94	2,58	3,71	7,23	5,67	10,14	3,34	0,33	0,28	48,7	51,3
А фцк=0,18-0,28 фщ=0,35-0,35	20,8	1,778	0,94	2,58	3,71	7,23	5,67	10,14	3,34	0,33	0,28	48,7	51,3
			0,94	2,58	3,71	7,23	5,67	10,14	3,34	0,33	0,28	48,7	51,3
К фцк=0,25-0,35 фщ=0,25-0,29	23,0	1,875	0,94	2,58	3,71	7,23	5,67	10,14	3,34	0,33	0,28	48,7	51,3
			0,94	2,58	3,71	7,23	5,67	10,14	3,34	0,33	0,28	48,7	51,3

Таблица 8

Влияние вида и количества крупного заполнителя на факторы разрушения бетона на щебне и гравии

Вид крупного заполнителя	Объемная концентрация КЗ ф	Прочностные и деформационные характеристики, МПа			Силовые и энергетические параметры трещиностойкости							
		R	R _b	E _b × 10 ⁻⁴	W _m × 10 ⁻² , Н.м	W _e × 10 ⁻² , Н.м	W ₁ × 10 ⁻² , Н.м	G _i , Н/м	G _F , Н/м	J _i , Н/м	K _i , МН/м ^{3/2}	K _e , МН/м ^{3/2}
Гранитный щебень	0,0	23,0	17,2	2,674	0,33	2,89	7,88	5,25	17,58	2,83	0,38	0,36
	0,353	24,5	18,3	2,758	1,44	4,12	15,80	8,79	31,49	5,07	0,49	0,42
	0,621	35,7	26,2	3,2-5	2,36	3,36	15,84	9,16	30,77	5,38	0,54	0,43
Природный гравий	0,0	28,5	21,1	2,938	1,60	2,73	10,02	7,09	20,88	4,59	0,48	0,36
	0,375	28,1	20,9	2,921	1,87	2,60	20,90	7,21	37,88	4,79	0,46	0,35
	0,643	21,2	15,9	2,573	0,54	2,40	14,62	4,61	26,75	2,43	0,35	0,31

Таблица 9

Влияние объемной концентрации крупного заполнителя на трещиностойкость аглопоритобетона

Состав исходного бетона	Объемная концентрация КЗ ф	Прочностные и деформационные характеристики, МПа			Силовые и энергетические параметры трещиностойкости							
		R	R _b	E _b × 10 ⁻⁴ , МПа	W _m × 10 ⁻² , Н.м	W _e × 10 ⁻² , Н.м	W ₁ × 10 ⁻² , Н.м	G _i , Н/м	G _F , Н/м	J _i , Н/м	K _i , МН/м ^{3/2}	K _e , МН/м ^{3/2}
Состав А	0,0	14,6	13,1	1,479	0,30	1,33	2,75	2,69	6,75	1,43	0,20	0,18
	0,310	20,6	18,5	1,778	0,89	3,58	7,63	5,95	18,8	2,63	0,33	0,32
	0,580	16,9	15,2	1,605	1,00	2,91	5,15	6,19	12,75	3,60	0,32	0,27
Состав А'	0,0	30,8	27,8	2,128	0,80	2,33	5,35	5,15	12,65	2,97	0,33	0,29
	0,310	36,8	33,1	2,271	2,56	5,01	11,19	12,23	26,19	7,71	0,53	0,43
	0,580	15,8	14,3	1,551	1,01	3,68	7,89	7,85	18,88	4,22	0,35	0,31

Примечание: Состав А и А' - исходные аглопоритобетоны с прочностью при сжатии соответственно 15 и 30 МПа, на основе которых получены бетоны с различной концентрацией заполнителя ф.

Влияние объемной концентрации крупного заполнителя на трещиностойкость керамзитобетона

Состав исход- ного бетона	Объем- ная кон- центр. К3 ф	Прочностные и де- формативные харак- теристики, МПа		Силовые и энергетические параметры трещиностойкости								
		R	R _b	E _b × 10 ⁻⁴ , МПа	W _m × 10 ⁻² , Н.м	W _e × 10 ⁻² , Н.м	W ₁ × 10 ⁻² , Н.м	G _i , Н/м	G _f , Н/м	J _i , Н/м	K _i , МН/м ^{3/2}	K _c , МН/м ^{3/2}
Состав К-1	0,0	17,3	13,8	1,626	0,28	0,62	2,66	4,99	9,09	2,41	0,29	0,26
	0,365	11,2	9,0	1,258	0,22	1,06	2,05	2,08	5,03	3,02	0,16	0,15
	0,633	6,7	5,4	0,880	0,99	1,60	4,40	4,37	10,11	2,87	0,20	0,16
Состав К'-2	0,0	28,6	22,9	2,483	0,52	2,93	4,25	5,56	11,54	2,91	0,37	0,34
	0,365	23,0	18,4	1,875	0,94	2,58	3,71	5,87	10,14	3,34	0,33	0,28
	0,633	10,0	8,0	1,168	0,75	1,57	9,20	3,72	17,29	2,31	0,21	0,18

Примечание: Состав К и К' - исходные керамзитобетоны с прочностью при сжатии соответственно 10 и 15 Мпа, на основе которых получены бетоны с различной концентрацией заполнителя ф.