

УДК 691.3

## ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ ЛЁГКИХ БЕТОНОВ НА ПОРИСТЫХ ЗАПОЛНИТЕЛЯХ

ПИРАДОВ К.А. <sup>1</sup> *д.т.н., проф.*,  
ГУРЕШИДЗЕ Г.Г. <sup>1</sup> *к.т.н., проф.*,  
ПОНОМАРЁВА Е.О. <sup>2</sup> *студ.*

<sup>1</sup> Грузинский технический университет, ул. Костава, 77, Тбилиси, Грузия, <http://www.gtu.ge>

<sup>2</sup> Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, г. Днепропетровск, Украина, тел. +38 (098) 973-11-05, e-mail: [ponomareva.len4ik@gmail.com](mailto:ponomareva.len4ik@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-7047-2850

**Аннотация.** *Цель.* Получение закономерностей изменения трещиностойкости легких бетонов в зависимости от варьирования пористого заполнителя. *Методика.* Проведен многофакторный эксперимент по варьированию следующих характеристик: цементно–водное отношение; количество цементного теста; максимальный размер зерна крупного заполнителя; влажность лёгкого бетона в момент его испытания; количество крупного пористого заполнителя в единице объёма лёгкого бетона; активность цемента. *Результаты.* Трещиностойкость лёгкого бетона при деформациях нормального отрыва и поперечного сдвига повышается с увеличением цементно–водного отношения и активности применяемого цемента и уменьшается с увеличением количества пористого заполнителя в единице объёма бетона, его диаметра и количества цементного теста. *Практическая значимость.* Подобраны оптимальные составы и концентрации ингибиторов коррозии на основе фосфоновых кислот.

*Ключевые слова:* легкий бетон, пористый заполнитель, трещиностойкость

## ТРИЩИНОСТІЙКІСТЬ ЛЕГКИХ БЕТОНІВ НА ПОРИСТИХ ЗАПОВНЮВАЧАХ

ПИРАДОВ К.А. <sup>1</sup> *д.т.н., проф.*,  
ГУРЕШИДЗЕ Г.Г. <sup>1</sup> *к.т.н., проф.*,  
ПОНОМАРЬОВА Е.О. <sup>2</sup> *студ.*

<sup>1</sup> Грузинський технічний університет, вул. Костава, 77, Тбілісі, Грузія, <http://www.gtu.ge>

<sup>2</sup> Державний вищий навчальний заклад "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури", вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (098) 973-11-05, e-mail: [ponomareva.len4ik@gmail.com](mailto:ponomareva.len4ik@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-7047-2850

**Анотація.** *Мета.* Отримання закономірностей зміни тріщиностійкості легких бетонів в залежності від варіювання пористого заповнювача. *Методика.* Проведено багатофакторний експеримент по варіюванню наступних характеристик: цементно-водне відношення; кількість цементного тесту; максимальний розмір зерна крупного заповнювача; вологість легкого бетону в момент його випробування; кількість крупного пористого заповнювача в одиниці об'єму легкого бетону; активність цементу. *Результати.* Тріщиностійкість легкого бетону при деформаціях нормального відриву та поперечного зсуву підвищується зі збільшенням цементно-водного відношення і активності застосовуваного цементу і зменшується зі збільшенням кількості пористого заповнювача в одиниці об'єму бетону, його діаметра і кількості цементного тесту. *Практична значимість.* Підібрані оптимальні склади і концентрації інгібіторів корозії на основі фосфонових кислот.

*Ключові слова:* легкий бетон, пористий заповнювач, тріщиностійкість

## CRACK RESISTANCE OF LIGHTWEIGHT CONCRETES WITH POROUS AGGREGATES

PIRADOV K.A. <sup>1</sup> *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,  
GURESHIDZE G.G. <sup>1</sup> *Cand. Sc. (Tech.)*,  
PONOMAROVA E.O. <sup>2</sup> *student.*

<sup>1</sup> Georgian Technical University, ul. Kostava 77, Tbilisi, Georgia, <http://www.gtu.ge>

<sup>2</sup> State Higher Educational Institution «Prydniprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture», 24a, Chernyshevs'kogo St., Dnipropetrovs'k, Ukraine, 49600., phone. +38 (098) 973-11-05, e-mail: [ponomareva.len4ik@gmail.com](mailto:ponomareva.len4ik@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-7047-2850

**Annotation. Goal.** Getting the laws of change of fracture toughness of lightweight concrete, depending on the variation of the porous filler. **Methods.** Spend a multivariate experiment on variation of the following characteristics: water-cement ratio; the amount of cement paste; the maximum grain size of coarse aggregate; Humidity lightweight concrete at the time of testing; a large number of porous aggregate lightweight concrete per unit volume; cement activity. **Results.** Crack lightweight concrete with normal strains and shear separation increases with the cement-water ratio and used cement activity and decreases with the increase in the number of porous aggregate concrete per unit volume, the diameter and the amount of cement paste. **Practical significance.** Optimal compositions and concentrations of corrosion inhibitors on the basis of phosphonic acids.

*Keywords:* lightweight concrete, porous filler, crack

Трещиностойкость бетона является параметром малоизученным. Сегодня эта характеристика качества бетона вызывает больше вопросов по своей единице измерения, методам определения и численным значениям её величины, чем у учёных имеется ответов на эти самые вопросы! Важно отметить, что трещиностойкость и её количественная характеристика является основным показателем качества материала при использовании методов расчёта конструкций с использованием законов механики разрушения твёрдых тел! Что влияет на трещиностойкость бетона? Большое количество различных факторов, среди которых есть те, что влияют и на прочность, и на трещиностойкость, а есть те, которые оказывают доминирующее влияние только на трещиностойкость! Здесь надо отметить, что многофакторный эксперимент практически во всём зависит только от самих исследователей, которые и должны выбрать факторы влияния на изучаемую характеристику, опираясь на свой опыт, на своё понимание формирования структуры материала и его работы под нагрузкой, на свои знания и на свой дар предвидения, наконец! Вопросов по трещиностойкости бетонов гораздо больше, чем имеющихся в нашем распоряжении ответов. Какие компоненты больше всего влияют на трещиностойкость? Какие внешние факторы влияют на сопротивление бетона развитию трещин? Какие факторы самые значимые? На эти, да ещё на многие другие вопросы поможет нам ответить рациональный многофакторный эксперимент! Почему трещиностойкость является более правильным параметром при определении качества материала, чем традиционная и привычная всем инженерам прочность? Да потому, что прочность – вариантная характеристика, зависящая от размеров образца, вида испытания и других факторов, считается, что прочность бетона во времени увеличивается, поэтому прочность фактически непригодна при расчётах длительной прочности и долговечности. Трещиностойкость же и её характеристики – критический коэффициент интенсивности напряжений  $K_C$  и энергия разрушения  $G_C$  – инвариантные параметры и с ростом дефектов структуры в бетоне уменьшаются по величине, значит могут быть использованы для расчётов конструкций во времени. Сегодня мы поговорим о лёгком бетоне. Мы выбрали в качестве основной характеристики его трещиностойкости величину  $K_C$  ввиду того, что при деформациях нормального отрыва методика её ( $K_{IC}$ ) определения нормирована

[1], а при поперечном сдвиге ( $K_{IIIC}$ ) – хорошо апробирована [2].

В качестве факторов варьирования – измеримых переменных величин, принимающих некоторые определённые значения и соответствующих одному из возможных способов воздействия на трещиностойкость лёгкого бетона, – на основании анализа механизмов трещинообразования и сопротивления бетона развитию трещин были выбраны следующие шесть характеристик: цементно-водное отношение  $C/W$ ; количество цементного теста  $t$ ; максимальный размер зерна крупного заполнителя  $d_{max}$ ; влажность лёгкого бетона в момент его испытания  $W$ ; количество крупного пористого заполнителя в единице объёма лёгкого бетона  $K_{la}$ ; активность цемента  $R_C$ , имеющие дискретные ограниченные области определения. Эта совокупность факторов варьирования отвечает требованиям отсутствия корреляции между любыми двумя факторами и совместимости факторов, то есть любые комбинации их значений, каждое из которых лежит внутри области определения, могут быть осуществлены.

Нами была реализована 1/8 реплика от полного факторного эксперимента типа  $2^6$ . Насыщение реплики производилось за счёт эффектов взаимодействия. Матрица планирования эксперимента показана в таблице 1. Выбор нулевого уровня и интервалов варьирования каждого из факторов объясняется как технологическими возможностями изготовления и укладки бетона, так и наличием определённых видов цемента ( $R_C$ ), а также размерами опытных образцов и длиной инициированных трещин. Для каждого фактора варьирования использовались значения, соответствующие верхней (основной уровень плюс интервал варьирования) и нижней (основной уровень минус интервал варьирования) границам интервала варьирования, то есть эксперимент был запланирован на двух уровнях: верхнем и нижнем. Опытные образцы всех восьми серий были изготовлены на пористом заполнителе Стойленского месторождения (Курская магнитная аномалия, Белгородская область, Российская Федерация) фракций 0 – 5. В качестве вяжущих были использованы: для верхнего уровня портландцемент Новороссийского завода (город Новороссийск, Российская Федерация) марки 500, для нижнего уровня – шлакопортландцемент Шуrowsкого завода (город Коломна, Российская Федерация) марки 400. Составы бетонов, которые были подобраны по заданным на верхнем и нижнем

уровнях значениям факторов варьирования C/W, t и K<sub>C</sub>, приведены в так же в таблице 1. К моменту всех испытаний возраст бетона всех образцов составлял стандартные 28 суток. Результаты экспериментальных исследований после их соответствующей обработки показаны в таблице 2, в которой наряду с параметрами трещиностойкости приведены и прочностные и деформативные характеристики исследованных лёгких бетонов. Внимательно изучив таблицу 2, мы можем обнаружить, что прочностные характеристики и показатели трещиностойкости вовсе не коррелируют друг с другом, например, величины K<sub>IC</sub> и K<sub>IIС</sub> составов 5, 6 и 7 практически одинаковы, тогда как прочность на сжатие их (кубиковая R<sub>m</sub> и призмная R<sub>b</sub>) отличаются более чем в два раза. Значит, прочностных характеристик для изучения работы бетона под нагрузкой недостаточно. Контроль качества и свойств бетона должен также производиться по основным характеристикам

трещиностойкости K<sub>IC</sub> и K<sub>IIС</sub>. Заметим, что в таблице 2 R<sub>bt</sub> – это прочность бетона на растяжение, а E<sub>b</sub> – модуль его упругости.

Интересно, что на трещиностойкость лёгкого бетона наибольшее влияние оказывает лёгкий заполнитель: его количество и диаметр (определить это можно по коэффициентам регрессии). Тогда как на прочностные и деформативные характеристики в основном влияют свойства матрицы (C/W). Анализ таблицы 2 также показывает некоторую корреляцию между величинами K<sub>IC</sub> и R<sub>bt</sub>, а также между K<sub>IIС</sub> и R<sub>m</sub> или R<sub>b</sub>, что указывает на доминирующее влияние отрывных деформаций при растяжении и сдвиговых – при сжатии.

Далее мы приведём зависимости, позволяющие прогнозировать значения характеристик трещиностойкости по известным составам бетона и качеству его некоторых компонентов. Итак, уравнения регрессии для определения величин K<sub>IC</sub> и K<sub>IIС</sub> – это нижеследующие зависимости (1) и (2):

$$K_{IC} = 0,300 + 0,039 C/W - 0,002 t - 0,006 d_{max} - 0,258 K_{Ia} + 0,002 R_C, \quad (1)$$

$$K_{IIС} = 3,120 + 0,485 C/W - 0,001 t - 0,038 d_{max} + 0,025 W - 2,663 K_{Ia} + 0,001 R_C. \quad (2)$$

Таблица 1

**Матрица планирования и составы бетонов / Planning Matrix and concrete compositions**

Уровни и интервалы варьирования	Факторы варьирования						Составы бетонов, кг/м <sup>3</sup>				
	C/W	t	d <sub>max</sub>	W	K <sub>Ia</sub>	R <sub>C</sub>	Цемент	Вода	Вода поглощённая	Щебень	Песок
Основной уровень	2,0	360	15	6,8	0,43	461					
Интервал варьирования	0,4	60	5	2,2	0,08	47					
Кодированные значения	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>					
1	+	+	-	+	-	-	560	233	91	497	309
2	+	-	-	-	+	+	400	167	119	727	252
3	-	+	+	-	+	-	438	274	104	708	78
4	-	-	+	+	-	+	313	196	101	484	481
5	+	+	+	-	+	-	560	233	91	497	309
6	+	-	+	+	-	+	400	167	119	727	252
7	-	+	-	+	-	-	438	274	104	708	78
8	-	-	-	-	+	+	313	196	101	484	461

Таблица 2

**Результаты реализации матрицы планирования / The results of the implementation of the planning matrix**

№ составов бетона	Параметры оптимизации, МПа м <sup>1/2</sup>		Другие характеристики, МПа			
	K <sub>IC</sub>	K <sub>IIС</sub>	R <sub>m</sub>	R <sub>b</sub>	R <sub>bt</sub>	E <sub>b</sub>
1	0,2992	3,62	27,10	25,78	1,76	18920
2	0,2566	2,88	20,08	17,01	1,38	18900
3	0,1540	2,32	10,43	10,11	1,00	13266
4	0,2259	2,65	16,43	14,02	1,02	16494
5	0,2010	2,43	23,50	22,18	1,22	17650
6	0,2006	2,41	18,60	16,11	1,24	17198
7	0,2012	2,10	11,92	11,06	1,26	15240
8	0,2517	2,72	19,60	17,10	1,40	18700

Итак, проанализировав данные таблицы 2 и зависимости (1) и (2), можно сделать следующие выводы: трещиностойкость лёгкого бетона при деформациях нормального отрыва и поперечного сдвига повышается с увеличением цементно–водного отношения и активности применяемого цемента и уменьшается с увеличением количества пористого заполнителя в единице объёма бетона, его диаметра и

количества цементного теста. Это связано, видимо, с тем, что в составах 3 и 7, где параметр  $t$  находился на верхнем уровне, матрица была практически без песка, и структура полученного в результате бетона была иррациональной, а также с тем, что именно в матрице образуются трещины, в дальнейшем приводящие к разрушению бетона.

#### **СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. ГОСТ 29167–91. Бетоны. Методы определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. – М.: Издательство стандартов, 1992. – 18 с.
2. Пирадов К.А., Мамаев Т.Л., Абдуллаев К.У. Методика определения критического КИН бетона при поперечном сдвиге// Сборник трудов НИИЖБ, 1993. – с. 81 – 84.

#### **REFERENCES**

1. GOST 29167-91. Concretes. Methods for determination of fracture toughness properties (toughness) under static loading. - Moscow .: Publishing house standards, 1992. - 18 p.
2. Piradov KA, Mamaev TL, Abdullayev KU Methods of determining the critical SIF concrete transverse shear // Proceedings NIIZhB, 1993. - p. 81 - 84.

*Статья рекомендована к публикации д-ром техн. наук, В.И. Большаковым и д-ром техн. наук, Д.В. Лаухиным (Украина)*