

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ КОНСТРУКЦИОННОГО ЛЁГКОГО БЕТОНА НА ПОРИСТЫХ ЗАПОЛНИТЕЛЯХ

Кравченко С.А., Постернак А.А., Агаева О.А.

Одесская государственная академия строительства и архитектуры

ул. Дидрихсона, 4, 65029, г. Одесса

alex.bk@ukr.net

Широкое применение отходов и вторичных продуктов промышленности для производства бетонных и железобетонных изделий, а также снижение массы строительных конструкций, экономия сырья и топливно-энергетических ресурсов являются основными направлениями снижения материалоемкости строительства. Одним из способов является применения многокомпонентного вяжущего, в состав которого, кроме уменьшенного количества портландцемента, входят негашеная известь, зола-унос ТЭЦ и химические добавки. Представляет интерес исследование физико-механических свойств таких бетонов. В работе приведены результаты экспериментальных исследований по определению верхней f_{cre}^v и нижней f_{cre}^0 границы микротрещинообразования конструкционного легкого бетона на пористых заполнителях. Определение границ области микротрещинообразования проводилось ультразвуковым методом под нагрузкой осевого сжатия. Положение параметрических точек f_{cre}^0 и f_{cre}^v определяли графически по зависимостям между сжимающими напряжениями и временем прохождения ультразвукового импульса; дифференциальным коэффициентом поперечных деформаций; коэффициентом объемных деформаций. Для количественной оценки зависимостей параметрических точек f_{cre}^0 и f_{cre}^v от исследуемых факторов состава составлены квадратичные уравнения регрессии. Увеличение расхода многокомпонентного вяжущего повышает границы микротрещинообразования f_{cre}^0 и f_{cre}^v в среднем на 14 % и 6 %. Существуют оптимальные расходы многокомпонентного вяжущего, зависящие от объемной концентрации керамзитового гравия в смеси, при которых параметрическая точка f_{cre}^0 принимает минимально возможные значения. Для каждого из видов бетона были получены линейные уравнения регрессии f_{cre}^0 / f_{cd} и f_{cre}^v / f_{cd} от обобщенного фактора состава, а также от прочности бетона. *Ключевые слова:* микротрещинообразование, конструкционный, лёгкий бетон, многокомпонентное вяжущее.

Дослідження мікротріщиноутворення конструкційного легкого бетону на пористих заповнювачах. Кравченко С.А., Постернак О.О., Агаєва О.А.

Широке застосування відходів і вторинних продуктів промисловості для виробництва бетонних і залізобетонних виробів, а також зниження маси будівельних конструкцій, економія сировини та паливно-енергетичних ресурсів є основними напрямками зниження матеріалоемності будівництва. Одним зі способів є застосування багатоконпонентного в'язучого, до складу якого, окрім зменшеної кількості портландцементу, належить негашене вапно, зола-унос ТЕЦ і хімічні домішки. Інтерес викликає дослідження фізико-механічних властивостей таких бетонів. У роботі наведені результати експериментальних досліджень щодо визначення верхньої f_{cre}^v та нижньої f_{cre}^0 границі мікротріщиноутворення конструкційного легкого бетону на пористих заповнювачах. Визначення границь області мікротріщиноутворення проводилось ультразвуковим методом під навантаженням осевого стиску. Положення параметричних точок f_{cre}^0 і f_{cre}^v визначали графічно за залежностями між стискаючими напруженнями та часом проходження ультразвукового імпульсу; диференційним коефіцієнтом поперечних деформацій; коефіцієнтом об'ємних деформацій. Для кількісної оцінки залежностей параметричних точок f_{cre}^0 і f_{cre}^v від досліджуваних факторів складені квадратичні рівняння регресії. Збільшення витрат багатоконпонентного в'язучого підвищує границі мікротріщиноутворення f_{cre}^0 і f_{cre}^v у середньому на 14 % і 6 %. Існують оптимальні витрати багатоконпонентного в'язучого, які залежать від об'ємної концентрації керамзитового гравію в суміші, при яких параметрична точка f_{cre}^0 приймає мінімально можливі значення. Для кожного з видів бетону були отримані лінійні рівняння регресії f_{cre}^0 / f_{cd} і f_{cre}^v / f_{cd} від узагальненого складу, а також від міцності бетону. *Ключові слова:* мікротріщиноутворення, конструкційний, легкий бетон, багатоконпонентне в'язуче.

The study of microcrack formation of structural light weight concrete with porous aggregates. Kravchenko S., Posternak O., Ahaieva O.

The wide use of wastes and secondary products of industry for concrete and reinforced concrete item production, as well as reduction of mass of building structures, saving of raw materials, fuel and energy resources are the main directions of reduction of material consumption in construction. One method is application of the multicomponent binder which contains in its composition reduced amount of portland cement, unslaked lime, fly ash of combined heat and power plant and chemical additives. Research of physical and mechanical properties of such concretes is of interest. This paper presents the results of experimental researches on selection on the study of the upper f_{cre}^v and lower f_{cre}^0 boundaries of microcrack formation light weight concrete with porous aggregates. The boundaries of the microcrack formation area were determined by the ultrasonic method under axial compression load. Position of parametric points f_{cre}^0 and f_{cre}^v was determined graphically from the dependencies between the compressive stress and the time of the ultrasonic pulse; differential coefficient of lateral deformation; coefficient of volumetric deformations. The quadratic

regression equation were composed to quantitative assessment of dependence parametric points f_{cre}^0 and f_{cre}^V from the investigated factors. Increasing the consumption of the multicomponent binder increases the boundaries of microcrack formation f_{cre}^0 and f_{cre}^V by 14% and 6% on average, respectively. There are optimal rates of multicomponent binder depending on the volume concentration of the ceramic gravel in the mixture, at which the parametric point f_{cre}^0 takes the minimum possible values. For each of the accepted ages of concrete, linear regression equations $f_{\text{cre}}^0/f_{\text{cd}}$ and $f_{\text{cre}}^V/f_{\text{cd}}$ were obtained from the generalized composition factor and also from the strength of the concrete. *Key words*: microcrack formation, constructive, light weight concrete, multicomponent binder.

Постановка проблемы. Исследования и производственный опыт показывают, что преимущества строительства предусматриваются применением легких бетонов, особенно в тех случаях, когда имеется достаточно мощная база для производства местных пористых заполнителей [1]. Основными направлениями снижения материалоемкости в строительстве является снижение массы строительных конструкций на основе применения эффективных материалов; более широкое использование промышленных отходов; экономия сырья, топливно-энергетических ресурсов в производстве материалов и конструкций. Особое значение имеет широкое внедрение в производство бетонных и железобетонных изделий отходов и вторичных продуктов промышленности [2].

Актуальность исследования. Вопросы совершенствования структуры и свойств легких бетонов, а также их особенности и преимущества на смешанных заполнителях и композиционных вяжущих нашли отражение во многих отечественных и зарубежных исследованиях. Увеличить объем изготавливаемого бетона, снизив стоимость, можно путем применения многокомпонентного вяжущего, в состав которого, кроме уменьшенного количества портландцемента, входят негашеная известь, зола-унос ТЭЦ и химические добавки [1].

Как известно, полное представление о физико-механических свойствах бетонов не возможно без анализа микроразрушений их структуры в процессе нагружения. При этом область напряженного состояния, находящаяся в границах микроразрушений, имеет принципиальное значение для оценки многих важных процессов деформирования и прочности бетона.

Цель исследований заключалась в получении экспериментальных данных верхней и нижней границы микротрещинообразования конструкционного легкого бетона на пористых заполнителях.

Характеристика используемых материалов и методика исследований. В Одесской государственной академии строительства и архитектуры разработана технология малоцементных бетонов на основе 4-компонентного вяжущего содержащего, кроме портландцемента и молотой негашеной извести, также активную минеральную добавку (зола-уноса) и гипс [3; 6].

Определение нижней f_{cre}^0 и верхней f_{cre}^V границ области микротрещинообразования конструкционных бетонов проводилось ультразвуковым методом в соответствии с методикой [4] с помощью прибора УК-10 ПМС параллельно с определением

их прочностных и деформативных характеристик. Измерение времени прохождения ультразвуковых импульсов τ_{σ} через опытный образец с ростом нагрузки проводилось в перпендикулярном и диагональном по отношению к направлению осевого сжатия. В первом случае ультразвуковые щупы устанавливались на противоположных гранях образца строго друг против друга, а показания прибора снимали при трех положениях щупов: сверху, в середине и внизу образца. Во втором случае щупы устанавливали также на противоположных гранях образца: один сверху, другой – внизу. Таким образом охватывалась большая область одноосного напряженного состояния бетонной призмы.

Результаты исследований. Границы микротрещинообразования связывают с прочностью бетона и параметрами структуры [5]. Сравнение приведенных в ряде работ значений напряжений, соответствующих началу трещинообразования в материале, показывает, что величины их колеблются в широких пределах – от 0,5 до 0,8 f_{cd} . Поэтому определенный интерес вызывает установление параметрических точек f_{cre}^0 (нижняя граница микротрещинообразования) и f_{cre}^V (верхняя условная граница микротрещинообразования) процесса деформирования керамзитобетона на многокомпонентном вяжущем (МКВ) под нагрузкой осевого сжатия.

Изучение структурных изменений в исследуемом керамзитобетоне в процессе его нагружения проводили, решая следующие задачи:

1) выявление характера и степени влияния возраста керамзитобетона на изменение границ микротрещинообразования, характеризуемых параметрическими точками f_{cre}^0 и f_{cre}^V , в зависимости от факторов состава;

2) установление и анализ статистически надежных зависимостей $f_{\text{cre}}^0 = f(\text{МКВ}, r, B, t)$ и $f_{\text{cre}}^V = f(\text{ЦИЗ}, r, B, t)$.

Для решения поставленных задач использовали результаты опытов по определению параметрических точек f_{cre}^0 и f_{cre}^V . Положение параметрических f_{cre}^0 и f_{cre}^V определяли графически по зависимостям между сжимающими напряжениями σ (относительным уровнем напряжений η) и:

- а) временем прохождения ультразвукового импульса Δt , мкс;
- б) дифференциальным коэффициентом поперечных деформаций $\Delta \nu$;
- в) коэффициентом объемных деформаций $\Delta \theta$.

Для характеристики происходящих в структуре бетона изменений были сопоставлены относитель-

ные объемные деформации бетона θ , дифференциальное изменение объема $\Delta\theta$ и изменение дифференциального коэффициента поперечной деформации $\Delta\nu$ с диаграммой состояния материала, выраженной кривой изменения времени прохождения ультразвуковых колебаний в бетоне.

Анализ диаграмм состояний исследуемых составов керамзитобетона в возрастах п.п. и 28 сут. показывает, что начальные стадии нагружения вплоть до уровня напряжений $f_{\text{кр}}^0 / f_{\text{cd}}$ не вызывают образования микротрещин, которые можно было бы обнаружить косвенным путем измерения поперечных и продольных деформаций или скорости распространения ультразвуковых импульсов. Значение дифференциального коэффициента поперечных деформаций $\Delta\nu$ при этом не возрастает, приращение объема образца $\Delta\theta$ остается практически постоянным, а время прохождения ультразвуковых импульсов уменьшается, что свидетельствует об уплотнении материала.

Рост величины $\Delta\nu$ и увеличение времени распространения ультразвукового импульса является признаком начала микротрещинообразования, то есть превышение уровня $f_{\text{кр}}^0$. При дальнейшем нагружении развитие микротрещин ускоряется. Поперечные деформации растут быстрее продольных, то есть уменьшение объема сжимаемого образца замедляется, а время прохождения ультразвуковых импульсов увеличивается.

Поскольку относительное изменение объема по сравнению с первоначальным равно $\theta = \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2$, то минимуму объема отвечает условие $\Delta\theta = 0$ или $\Delta\nu = 0,5$, что означает равенство величин объемных деформаций сжатия и расширения материала. Это условие используется для определения второй параметрической точки $f_{\text{кр}}^v$, рассматриваемой как верхняя граница микроразрушений [5]. При этом анализ объемных относительных деформаций θ показывает, что вначале с ростом нагрузки объем тела уменьшается, а к концу загрузки начинает увеличиваться в связи с изменением знака его приращения. Такое состояние керамзитобетона на многокомпонентном вяжущем под действием нарастающего напряжения сжатия характерно для всех исследуемых составов, хотя количественные оценки параметрических точек $f_{\text{кр}}^0$ и $f_{\text{кр}}^v$ равные.

Для количественной оценки зависимостей параметрических точек $f_{\text{кр}}^0$ и $f_{\text{кр}}^v$ от исследуемых факторов состава – расхода многокомпонентного вяжущего (x_1) и агрегатно-структурного фактора γ (x_2) в возрасте керамзитобетона t (x_3) – (п.п.), 28 сут. использовали квадратичные уравнения регрессии, которые с учетом статистически незначимых коэффициентов выглядят так:

$$f_{\text{кр}}^0 = 0,491 + 0,036x_1 - 0,028x_2 + 0,029x_3 - 0,023x_1x_2 + 0,009x_1x_3 - 0,026x_2x_3 + 0,027x_1^2 - 0,011x_2^2 + 0,021x_3^2; \quad (1)$$

$$f_{\text{кр}}^v = 0,928 + 0,029x_1 - 0,027x_2 + 0,005x_3 + 0,009x_1x_2 + 0,009x_1x_3 - 0,017x_2\tilde{\theta}_3 - 0,017x_2x_3 - 0,003x_1^2 + 0,01x_2^2 + 0,018x_3^2; \quad (2)$$

Полученные уравнения по F-критерию Фишера адекватны ($F_{\text{ад}} < F_{\text{табл.}}$) и имеют информационную ценность ($F_{\text{инф.}} > F_{\text{табл.}}$). Графическая интерпретация указанных зависимостей приведена на рис. 1 и 2.

Анализ уравнений (1), (2) и графиков на рис. 1 и 2. показывает, что увеличение расхода многокомпонентного вяжущего в диапазоне изменения этого фактора повышает границы микротрещинообразования $f_{\text{кр}}^0$ и $f_{\text{кр}}^v$ в среднем на 14 % и 6 %. Из рис. 1 видно, что существуют оптимальные расходы многокомпонентного вяжущего, зависящие от объемной концентрации керамзитового гравия в смеси, при которых параметрическая точка $f_{\text{кр}}^0$ принимает минимально возможные значения. Для параметрической точки $f_{\text{кр}}^v$ такая закономерность не наблюдается.

Увеличение расхода многокомпонентного вяжущего монотонно повышает верхнюю границу области микротрещинообразований, что связано с увеличением прочности растворной составляющей керамзитобетона. Косвенными подтверждением этого является повышение границ области микротрещинообразования растворной составляющей керамзитобетона (кривая 3 на рис. 1 и 2).

Проведенный математико-статистический анализ выявил возможность использования линейного выражения для описания достаточно надежной статистической связи между $Y = f_{\text{кр}}$ и $x = [(В/МКВ) + \gamma]$; нулевая гипотеза о равенстве нулю генерального коэффициента корреляции ($H_0: \rho_{xy} = 0$) отвергнута в пользу альтернативной при уровне значимости $\alpha = 0,05$, что свидетельствует о наличии линейной связи между $f_{\text{кр}}$ и $[(В/МКВ) + \gamma]$ в каждом из принятых возрастов бетона.

В результате применения регрессионного анализа для каждого из принятых возрастов бетона были получены линейные уравнения регрессии:

$$f_{\text{кр}}^0 (\text{п.п.}) = 0,6956 - 0,2207 (В/ЦИЗ) + \gamma, \quad (3)$$

$$f_{\text{кр}}^0 (28) = 0,7893 - 0,3197 (В/ЦИЗ) + \gamma, \quad (4)$$

$$f_{\text{кр}}^v (\text{п.п.}) = 0,9726 - 0,0457 (В/ЦИЗ) + \gamma, \quad (5)$$

$$f_{\text{кр}}^v (28) = 0,984 - 0,0615 (В/ЦИЗ) + \gamma, \quad (6)$$

Графическая интерпретация зависимости параметрических уравнений $f_{\text{кр}}^0 / f_{\text{cd}}$ и $f_{\text{кр}}^v / f_{\text{cd}}$ в возрасте $t = \text{п.п.}, 28 \text{ сут.}$ от обобщенного фактора состава $(В/МКВ) + \gamma$ в границах 95 % доверительных интервалов приведены на рис. 3 и рис. 4. Результаты графического анализа позволяют сделать вывод о линейности кривых регрессий без дополнительной проверки значимости коэффициентов регрессии v_1 . Полученные зависимости 7 и 8 для определения $f_{\text{кр}}^0 / f_{\text{cd}}$ и $f_{\text{кр}}^v / f_{\text{cd}}$ хоть и характеризуют степень влияния на эти величины различных факторов, но не

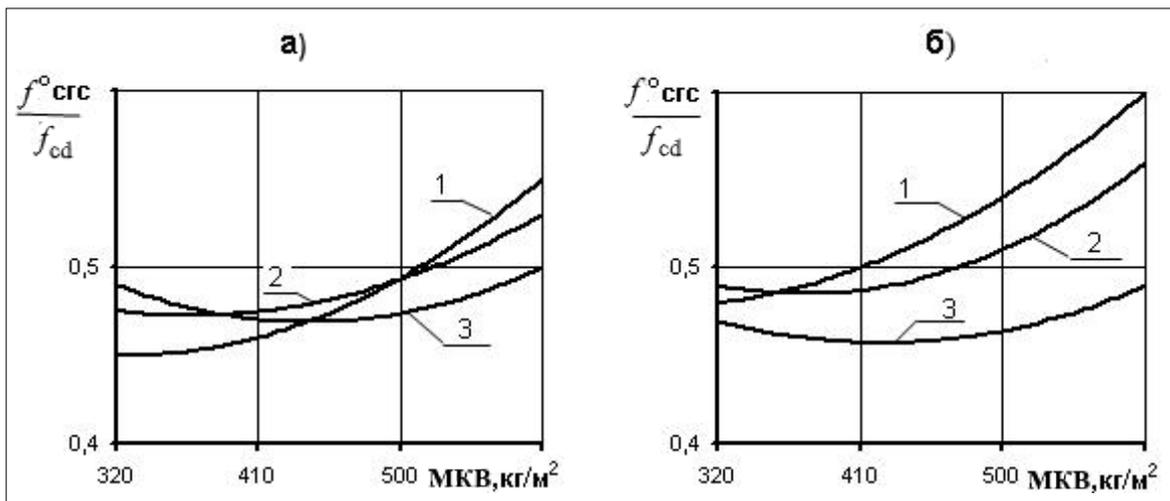


Рис. 1. Зависимость нижней границы микротрещинообразования керамзитобетона на многокомпонентном вяжущем f^0_{crc} / f_{cd} от расхода МКВ вяжущего и агрегатно-структурного фактора r ; а; б в возрасте соответственно п.п.; 28, 1; 2; 3 – при значении r соответственно 0,35; 0,45; 0,55

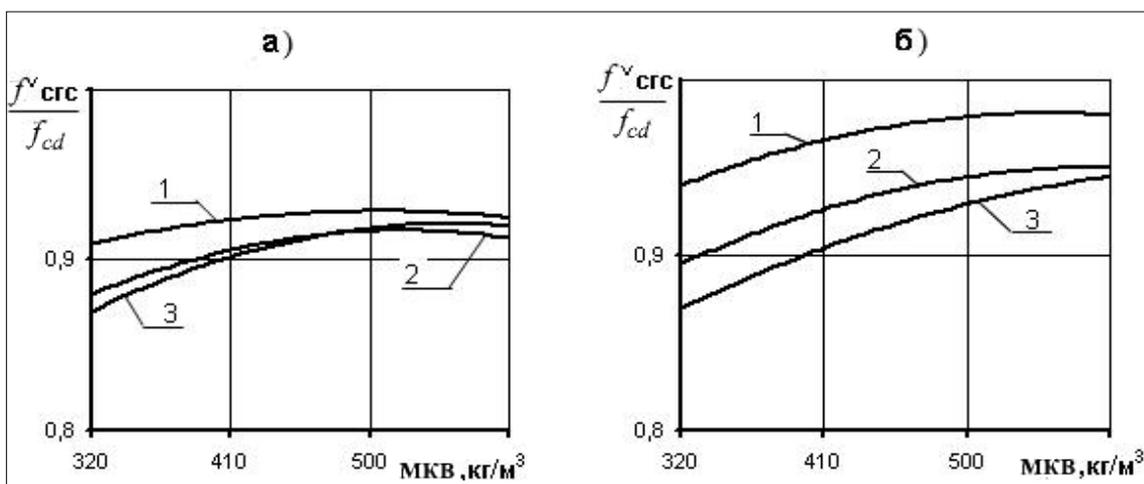


Рис. 2. Зависимость верхней границы микротрещинообразования керамзитобетона на многокомпонентном вяжущем f^v_{crc} / f_{cd} от расхода МКВ вяжущего и агрегатно-структурного фактора r ; а; б в возрасте соответственно п.п.; 28, 1; 2; 3 – при значении r соответственно 0,35; 0,45; 0,55

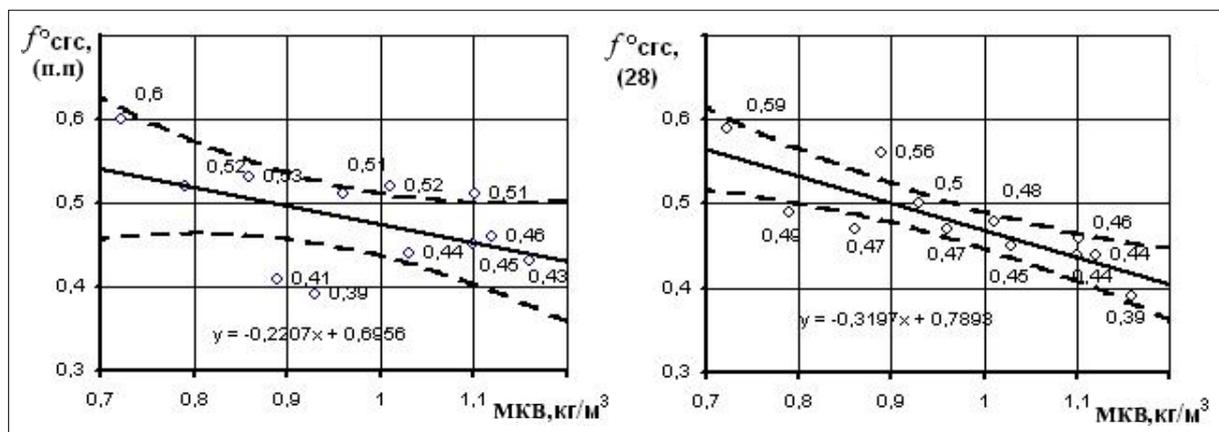


Рис. 3. Зависимость нижней границы микротрещинообразования керамзитобетона на МКВ вяжущем f^0_{crc} / f_{cd} от обобщенного фактора состава

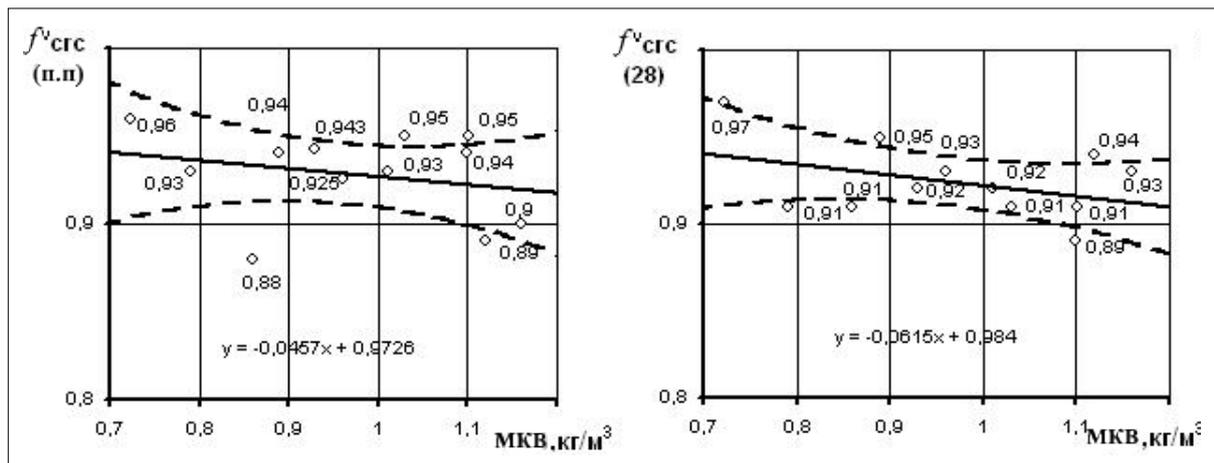


Рис. 4. Зависимость верхней границы микрокрешинообразования керамзитобетона на МКВ вяжущем f^v_{crc}/f_{cd} от обобщенного фактора состава

очень удобны для практических расчетов, поскольку связаны с использованием параметров, обычно неизвестных при проектировании.

Многие исследователи связывают параметрические уровни f^0_{crc}/f_{cd} и f^v_{crc}/f_{cd} с прочностью бетона. Такой подход относительно прост и обладает существенным расчетным преимуществом. Используя значения f^0_{crc}/f_{cd} и f^v_{crc}/f_{cd} , применяя метод наименьших квадратов, получены такие зависимости:

$$f^0_{crc}/f_{cd} = 0,389 + 0,078 \lg f_{cd}, \quad (7)$$

$$f^v_{crc}/f_{cd} = 0,863 + 0,063 \lg f_{cd}, \quad (8)$$

Главные выводы. Область напряженного состояния, находящаяся в границах микроразрушений, имеет принципиальное значение для оценки многих важных процессов деформирования и прочности бетона. Факторы состава оказывают существенное влияние на границы области микроразрушений: увеличение расхода многокомпонентного вяжущего и концентрация керамзитового гравия повышает f^0_{crc} и f^v_{crc} . Для определения границ микроразрушений в зависимости от прочности керамзитобетона рекомендуется использовать выражение (7) и (8).

Литература

1. Основные свойства легких бетонов на пористых заполнителях / А.А. Постернак, С.А. Кравченко, И.П. Агафонова, С.С. Иванова. Научный журнал «Вчені записки ТНУ імені І.В. Вернадського. Серія: Технічні науки. Том 29(68) № 6, ч. 2. Київ, 2018. С. 189–193.
2. Постернак О.О., Кравченко С.А., Костюк А.І. Несуча здатність і деформативність керамзитобетонних огорожувальних конструкцій : монографія. Одеса : ОДАБА, 2018. 176 с.
3. Кравченко С.А., Постернак О.О., Столевич І.А. Конструкційні та конструкційно-теплоізоляційні легкі бетони на пористих заповнювачах. Ресурсоекономні матеріали, конструкції,будівлі та споруди : зб. наук. праць, вип. № 31. Рівне : УДУВГП, 2015. С. 213–221.
4. Методические рекомендации по определению механических характеристик бетонов при кратковременном и длительном нагружении. М. : НИИЖБ, 1984. 48 с.
5. Проектування керамзитобетонів з урахуванням рецептурно-технологічних факторів і конструкцій на їх основі для монолітного будівництва : монографія / В.С. Дорофеев, А.І. Костюк та ін. Одеса : ОДАБА, 2014. 176 с.
6. Рекомендации по применению в бетонах золы, шлака и золошлаковой смеси тепловых электростанций. М. : НИИЖБ, 1986. 80 с.