

## СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

DOI 10.25987/VSTU.2018.52.4.012

УДК 691.327.32

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНИЦ ОБРАЗОВАНИЯ МИКРОТРЕЩИН В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПЛОТНОСТИ КЕРАМЗИТОБЕТОНА \*

С. Д. Семенюк<sup>1</sup>, Ю. Г. Москалькова<sup>2</sup>*Белорусско-Российский университет<sup>1,2</sup>  
Республика Беларусь, г. Могилев*

<sup>1</sup> Д-р техн. наук, проф. кафедры промышленного и гражданского строительства, тел.: +375(29)7433872, e-mail: skzs@tut.by

<sup>2</sup> Канд. техн. наук, доц. кафедры промышленного и гражданского строительства, тел.: +375(29)7429183, e-mail: julia43@tut.by

**Постановка задачи.** Важным показателем работы бетона под нагрузкой является образование и развитие микротрещин. Существующие методики определения значений пределов микротрещинообразования для легких бетонов не обеспечивают достаточную сходимость с экспериментальными данными. В связи с этим целесообразно вывести новые зависимости, применимые для легких бетонов.

**Результаты.** Приведены результаты испытания керамзитобетона различных классов по прочности на сжатие и по плотности, предложены формулы для определения пределов образования микро- и макротрещин. По результатам исследований введен эмпирический коэффициент, учитывающий класс плотности легкого бетона в расчете микротрещинообразования.

**Выводы.** Предложена методика определения верхнего и нижнего пределов микротрещинообразования для легких бетонов различных классов по прочности на сжатие и по плотности. Расчет гармонизирован с положениями Еврокода 2. При этом обеспечена хорошая сходимость с экспериментальными данными.

**Ключевые слова:** легкий бетон, керамзитобетон, границы микротрещинообразование, плотность, класс плотности.

**Введение.** Применение конструкционно-теплоизоляционных легких бетонов находит все более широкое применение в строительстве. Помимо хороших теплоизоляционных свойств такие бетоны обладают достаточной огнестойкостью [10], поэтому разработка положений по расчету и проектированию несущих конструкций из легких бетонов на сегодняшний день актуальна.

Главной особенностью легких бетонов на пористых заполнителях является то, что практически невозможно разработать точные составы бетонной смеси, поскольку по прочностным и деформативным характеристикам пористые заполнители сильно различаются, а значит, и прочность бетона на разных заполнителях будет варьироваться в большом диапазоне [13, 15]. В связи с этим прочность легкого бетона и его плотность не будут связаны напря-

© Семенюк С. Д., Москалькова Ю. Г., 2018

\* Исследования проведены в рамках государственной программы научных исследований по направлению «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии», подпрограмма 8.8 «Строительные материалы», № гос. рег. 20162027, дата рег. 30.05.2016, ГБ 1621Ф.



мую: при более низкой плотности можно получить более высокую прочность на осевое сжатие в результате применения других заполнителей или добавок [13]. Следует отметить, что для получения конструкционного легкого бетона в качестве мелкого заполнителя используется плотный песок (речной, кварцевый или карьерный), а не пористый (керамзитовый песок, например). Связано это с тем, что использование пористого мелкого заполнителя существенно снижает прочность бетона [6, 13, 14, 16].

Одним из параметров, характеризующих работу бетона под нагрузкой, является процесс формирования и развития микротрещин. В частности, очень важно определять верхнюю границу микротрещинообразования (так называемый критический уровень нагрузки), поскольку ее превышение знаменует переход в третью стадию напряженно-деформированного состояния (стадию разрушения), а это означает не только исчерпание прочности и снижение эксплуатационных показателей, но также изменение некоторых других параметров. Например, в [19] доказано, что стойкость к воздействию хлоридов при превышении критической границы резко уменьшается.

Границы образования микро- и макротрещин в легких бетонах на любых заполнителях значительно выше, чем в бетонах нормальной плотности [12, 13, 17]. Причем чем выше пористость, тем выше граница образования микротрещин [1]. Обусловлено это несколькими причинами. Сцепление цементной матрицы с пористым крупным заполнителем значительно выше, чем с плотным, так как отсутствует четкая граница по контакту заполнителя и цементного камня [13, 14, 16, 18], что видно на фотографиях, сделанных при помощи электронного микроскопа [13, 18]. А первые микротрещины образуются обычно по контакту крупного заполнителя и цементной матрицы [24]. В [21, 23] также отмечено, что вокруг зерен пористого крупного заполнителя пористость цементного камня меньше по сравнению с обычным бетоном ввиду высокого водопоглощения, в результате чего в легких бетонах цементный камень имеет более высокую прочность и долговечность, чем в тяжелых.

Определение пределов микротрещинообразования (нижнего и верхнего) основано на эмпирических зависимостях и системе частных коэффициентов, учитывающих различные параметры. Традиционно для обычных бетонов используются формулы с использованием десятичного логарифма, предложенные в О. Я. Бергом [2], которые все чаще подвергаются критике в научной литературе, так как применимы только для бетонов на плотных заполнителях средней прочности [1, 3, 4, 7]. В работе [7] предложены зависимости с применением экспоненты, в [11] предложен метод конечных элементов для масштабного моделирования процесса микротрещинообразования и разрушения бетона. В [22] отмечено, что для определения момента образования первых трещин в железобетонных балках, выполненных из легких бетонов любого типа, большинство существующих методик расчета не обеспечивают корректный результат, и требуется введение поправочного коэффициента.

**1. Цель и задачи исследования.** Целью исследования является разработка методики расчета относительных значений нагрузок, соответствующих нижнему и верхнему пределам микротрещинообразования, для керамзитобетона, изготовленного на основе местного сырья.

Задачи исследования — учет влияния плотности керамзитобетона на величины пределов микротрещинообразования и гармонизация предлагаемой методики расчета с положениями *Eurocode 2*.

**2. Характеристика опытных образцов.** Для изготовления опытных образцов в виде кубов, призм и цилиндров использовались местные материалы:

- гравий керамзитовый фракций 5—10 мм с насыпной плотностью 382 кг/м<sup>3</sup>, относительной прочностью в цилиндре 2,68 МПа (изготовитель — ОАО «Завод керамзитового гравия», г. Новолукомль);
- гравий керамзитовый фракций 10—20 мм с насыпной плотностью 326 кг/м<sup>3</sup>, относительной прочностью в цилиндре 1,86 МПа (изготовитель — ОАО «Завод керамзитового гравия», г. Новолукомль);

- щебень керамзитовый фракций 5—10 мм с насыпной плотностью 585 кг/м<sup>3</sup>, относительной прочностью в цилиндре 10,26 МПа (изготовитель — Петриковский керамзитовый завод ОАО «Гомельский ДСК»);
- песок керамзитовый фракций 0—4 мм с насыпной плотностью 432 кг/м<sup>3</sup>, относительной прочностью в цилиндре 4,58 МПа (изготовитель — ОАО «Завод керамзитового гравия», г. Новолукомль);
- песок природный карьерный с насыпной плотностью 1580 кг/м<sup>3</sup>;
- портландцемент марки М500 с активностью 49,0 МПа, с показателем нормальной густоты 25—28 % (изготовитель — ОАО «Белорусский цементный завод»).

Подбор состава керамзитобетонных смесей производился в соответствии с [8].

Подробно состав бетонной смеси приведен в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики опытных керамзитобетонных образцов

Класс бетона		Характеристика материала*		Состав бетонной смеси		Плотность керамзитобетона в возрасте 28 сут, $\rho^m$ , кг/м <sup>3</sup>	Класс плотности согласно EN 1992 и расчетная плотность $\rho$
Прогнозируемый	Фактически полученный	Крупный заполнитель	Мелкий заполнитель	Ц: П: Г (Щ)	В/Ц		
LC 8/10	LC 8,4/10,3	Гравий керамзитовый фракций 5—10 и 10—20 мм	Песок керамзитовый фракции 0—4 мм	1:0,52:1,05	0,63	950	Класс 1,0 $\rho = 1050 \text{ кг/м}^3$
LC 10/12	LC 9,9/11,8	Гравий керамзитовый фракции 10—20 мм	Песок кварцевый с модулем крупности 1,8	1:2,41:1,37	0,51	1390	Класс 1,4 $\rho = 1450 \text{ кг/м}^3$
LC 16/18	LC 16,2/20,6	Гравий керамзитовый фракций 5—10 мм и 10—20 мм	Песок кварцевый с модулем крупности 1,8	1:1,84:0,79	0,46	1545	Класс 1,4 $\rho = 1450 \text{ кг/м}^3$
LC 25/28	LC 23,7/29,5	Щебень керамзитовый фракций 5—10 мм	Песок кварцевый с модулем крупности 1,8	1:1,89:0,74	0,42	1760	Класс 1,8 $\rho = 1850 \text{ кг/м}^3$
LC 30/33	LC 29,0/33,6	Щебень керамзитовый фракций 5—10 мм	Песок кварцевый с модулем крупности 1,8	1:1,84:0,79	0,40	1780	Класс 1,8 $\rho = 1850 \text{ кг/м}^3$

**Примечание:** \*вяжущее - портландцемент марки М500.

Бетонную смесь приготавливали вручную в лабораторных условиях. Для изготовления образцов использовались инвентарные металлические сборно-разборные формы. Экспериментальные образцы находились в естественных температурно-влажностных условиях твердения ( $t = 20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ , влажность — 90—95 %). Образцы были накрыты мешковиной и в течение первых 7 суток регулярно увлажнялись.

**3. Определение границ микротрещинообразования.** Пределы микротрещинообразования для опытных образцов определялись графическим методом по результатам испытаний.

Нижний предел микротрещинообразования  $\eta_{cr}^0$  определялся путем взятия второй производной от зависимости «уровень нагружения — коэффициент Пуассона». Верхний предел микротрещинообразования  $\eta_{cr}^v$  (уровень, соответствующий формированию макротрещин) — путем построения зависимости «уровень напряжений — объемная деформация» по усредненным экспериментальным данным.



Относительные значения пределов микротрещинообразования (нижнего и верхнего) могут быть определены по формулам (1), (2) соответственно [9, 20]:

$$\eta_{crc}^0 = 0,33k_{crc} \cdot \ln \frac{f_c}{f_{c,0}} - 0,15; \quad (1)$$

$$\eta_{crc}^v = 0,33k_{crc} \cdot \ln \frac{f_c}{f_{c,0}} + 0,1, \quad (2)$$

где  $f_c$  — прочность бетона, МПа;  $f_{c,0}$  — единичное значение прочности бетона,  $f_{c,0} = 1$  МПа.

В [9, 20] экспериментально установлено, что отношение  $\eta_{crc}^0/\eta_{crc}^v$  для бетона каждого вида остается постоянным (т. е. изменяется в небольшом диапазоне значений) и для исследованных видов бетона может быть принято:

- $\eta_{crc}^0/\eta_{crc}^v \approx 0,67$  — для бетона нормальной прочности на плотных заполнителях;
- $\eta_{crc}^0/\eta_{crc}^v \approx 0,70$  — для сталефибробетона;
- $\eta_{crc}^0/\eta_{crc}^v \approx 0,73$  — для бетона с использованием отходов металлургических производств в качестве мелкого заполнителя (ОМП-бетон);
- $\eta_{crc}^0/\eta_{crc}^v \approx 0,60$  — для керамзитобетона.

Был введен эмпирический коэффициент  $k_{crc}$ , принятый на основании значения  $\eta_{crc}^0/\eta_{crc}^v$ , который может быть использован при проектировании и поверочном расчете бетонных и железобетонных конструкций:

$$k_{crc} = k_{c1} \cdot \frac{\eta_{crc}^0}{\eta_{crc}^v}. \quad (3)$$

В [20] также отмечено, что для нормального бетона, сталефибробетона, ОМП-бетона значение коэффициента  $k_{c1} \approx 1$ , а для керамзитобетона  $k_{c1} \approx 1,2$ . То есть для керамзитобетона  $k_{crc} \approx 0,72$ .

Однако, как отмечалось ранее, для легких бетонов в целом и керамзитобетона в частности характерна следующая особенность [13, 14]: при одинаковой прочности плотность бетонной матрицы может существенно отличаться ввиду применения различных заполнителей. Поэтому коэффициент  $k_{c1}$  следует назначать с учетом плотности материала, и при накоплении достаточного количества корректных опытных данных необходимо вывести формулу для аналитического расчета.

Согласно EN 1992 [5], плотность легкого бетона учитывается параметром ( $\rho/2200$ ), где  $\rho$  — расчетная плотность легкого бетона, принимаемая по классу плотности [5, табл. 11.1]. Данный параметр фактически является относительной величиной верхнего предельного значения плотности легкого бетона соответствующего класса.

Исходя из опытных данных методом линейной аппроксимации была выведена зависимость для расчета коэффициента  $k_{c1}$  в зависимости от параметра ( $\rho/2200$ ):

$$k_{c1} = 2,075 - 1,1 \cdot \frac{\rho}{2200}, \quad (4)$$

где  $\rho$  — в кг/м<sup>3</sup>.

**4. Сравнение опытных и расчетных данных.** В табл. 2 приведено сравнение опытных и расчетных значений относительных пределов микротрещинообразования керамзитобетона. Расчетные значения получены по предлагаемой методике.

Из расчета в табл. 2 видно, что предлагаемая методика обеспечивает удовлетворительную сходимость с опытными данными.



Таблица 2

Сравнение опытных и теоретических значений  
нижнего  $\eta_{crc}^0$  и верхнего  $\eta_{crc}^v$  пределов микротрещинообразования

Возраст бетона, сут	Призменная прочность $f_{lc}$ , МПа	Кубиковая прочность $f_{lc, куб}$ , МПа	Расчетная плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Отношение $\eta_{crc}^0 / \eta_{crc}^v$		Эмпирические коэффициенты		Пределы микротрещинообразования				Отклонение расчетных значений от опытных, %	
				фактическое	принятое	$k_{c1}$	$k_{crc}$	нижний		верхний		$\Delta\eta_{crc}^0$	$\Delta\eta_{crc}^v$
								$\eta_{crc}^0$	$\eta_{crc}^v$	$\eta_{crc}^{on}$	$\eta_{crc}^{расч}$		
<b>Фактический класс керамзитобетона</b>													
<b>LC 8,4/10,3</b>													
7	6,4	8,06	1050	0,639	0,6	1,55	0,93	0,45	0,42	0,701	0,67	6,3	4,5
14	6,88	8,64		0,596	0,6	1,55	0,93	0,42	0,44	0,711	0,69	-4,2	2,7
<b>28</b>	<b>8,36</b>	<b>10,30</b>		<b>0,674</b>	<b>0,6</b>	<b>1,55</b>	<b>0,93</b>	<b>0,52</b>	<b>0,50</b>	<b>0,769</b>	<b>0,75</b>	<b>3,1</b>	<b>2,3</b>
<b>LC 9,9/11,8</b>													
14	7,12	8,92	1450	0,627	0,6	1,35	0,81	0,47	0,37	0,750	0,62	20,3	16,7
21	8,27	10,11		0,632	0,6	1,35	0,81	0,48	0,41	0,759	0,66	13,6	12,4
<b>28</b>	<b>9,89</b>	<b>11,82</b>		<b>0,612</b>	<b>0,6</b>	<b>1,35</b>	<b>0,81</b>	<b>0,48</b>	<b>0,46</b>	<b>0,779</b>	<b>0,71</b>	<b>3,0</b>	<b>8,5</b>
60	11,17	13,61		0,650	0,6	1,35	0,81	0,51	0,50	0,791	0,75	3,7	5,8
<b>LC 16,2/20,6</b>													
7	13,11	16,04	1450	0,628	0,6	1,35	0,81	0,54	0,54	0,857	0,79	0,0	8,1
14	14,68	18,10		0,654	0,6	1,35	0,81	0,53	0,57	0,812	0,82	-7,0	-0,8
<b>28</b>	<b>16,21</b>	<b>20,56</b>		<b>0,651</b>	<b>0,6</b>	<b>1,35</b>	<b>0,81</b>	<b>0,51</b>	<b>0,59</b>	<b>0,776</b>	<b>0,84</b>	<b>-17,7</b>	<b>-8,8</b>
60	17,56	21,47		0,742	0,6	1,35	0,81	0,56	0,62	0,755	0,87	-10,0	-14,7
<b>LC 23,7/29,5</b>													
14	19,34	26,67	1850	0,646	0,6	1,15	0,69	0,488	0,52	0,755	0,77	-7,5	-2,6
21	21,19	28,72		0,650	0,6	1,15	0,69	0,501	0,55	0,771	0,80	-8,8	-3,2
<b>28</b>	<b>23,67</b>	<b>29,53</b>		<b>0,654</b>	<b>0,6</b>	<b>1,15</b>	<b>0,69</b>	<b>0,515</b>	<b>0,57</b>	<b>0,788</b>	<b>0,82</b>	<b>-10,8</b>	<b>-4,1</b>
60	24,69	31,04		0,673	0,6	1,15	0,69	0,535	0,58	0,795	0,83	-8,4	-4,4
<b>LC 29,0/33,6</b>													
14	21,37	24,60	1850	0,741	0,6	1,15	0,69	0,65	0,55	0,874	0,80	15,6	8,8
21	27,24	30,86		0,746	0,6	1,15	0,69	0,63	0,60	0,849	0,85	4,8	-0,4
<b>28</b>	<b>28,99</b>	<b>33,63</b>		<b>0,714</b>	<b>0,6</b>	<b>1,15</b>	<b>0,69</b>	<b>0,65</b>	<b>0,62</b>	<b>0,903</b>	<b>0,87</b>	<b>4,4</b>	<b>4,0</b>
60	29,86	34,07		0,717	0,6	1,15	0,69	0,64	0,62	0,895	0,87	2,9	2,4
Ранее проведенные исследования [20]													
<b>LC 9,1/11,7</b>													
28	9,1	11,7	1450	0,577	0,6	1,35	0,81	0,41	0,44	0,71	0,69	-7,4	2,8
<b>LC 10,7/13,5</b>													
28	10,7	13,5	1450	0,603	0,6	1,35	0,81	0,44	0,48	0,73	0,73	-9,9	-0,5
<b>LC 11,2/14,2</b>													
28	11,2	14,2	1450	0,603	0,6	1,35	0,81	0,44	0,50	0,73	0,75	-12,7	-2,2
<b>LC 15,9/20,2</b>													
28	15,9	20,2	1650	0,667	0,6	1,25	0,75	0,5	0,53	0,75	0,78	-6,9	-4,6
<b>LC 17,7/22,7</b>													
28	17,7	22,7	1650	0,600	0,6	1,25	0,75	0,45	0,56	0,75	0,81	-24,7	-8,2
Среднее отклонение $\sum \Delta\eta_{crc}/n$ , %											-2,4	1,0	
Среднее отклонение по абсолютной величине $\sum  \Delta\eta_{crc} /n$ , %											8,9	5,6	

## Выводы

1. В результате проведенного исследования установлено влияние плотности керамзитобетона на значения пределов микротрещинообразования.
2. Предложены зависимости для расчета относительных значений нагрузок, соответствующих нижнему и верхнему пределам микротрещинообразования. Формулы (1), (2) могут



быть применены для бетонов различных классов по прочности на сжатие, а также для бетонов разных видов.

3. Влияние плотности керамзитобетона на величины пределов микротрещинообразования учтено эмпирическим коэффициентом  $k_{c1}$ . Определение значения указанного коэффициента основано на расчетной плотности легкого бетона, принимаемой по классу плотности согласно *Eurocode 2*.

Библиографический список

1. **Ахмедов, А. И.** Влияние микроразрушений бетона на эксплуатационные качества строительных конструкций: автореф. дис.... канд. техн. наук: 05.23.01 / А. И. Ахмедов. — М., 2006. — 22 с.
2. **Берг, О. Я.** Физические основы теории прочности бетона и железобетона / О. Я. Берг. — М.: Госстройиздат, 1962. — 96 с.
3. **Бобров, В. В.** Методы оценки влияния различных факторов на процесс микроразрушений бетона под нагрузкой: автореф. дис.... канд. техн. наук: 05.23.01 / В. В. Бобров. — М., 2015. — 26 с.
4. **Бобров, В. В.** Микроразрушения бетона при центральном сжатии / В. В. Бобров // *Архитектура и строительство России*. — 2009. — № 10. — С. 26—37.
5. **Еврокод 2.** Проектирование железобетонных конструкций. Ч. 1-1. Общие правила и правила для зданий: ТКП EN 1992-1-1-2009: введ. 01.01.10. — Минск: Минстройархитектуры РБ, 2015. — 206 с.
6. **Зінченко, С. В.** Міцність та деформативність конструкцій із цементно-зольного керамзитобетону: автореф. дис.... канд. техн. наук: 05.23.01 / С. В. Зінченко. — Одеса, 2010. — 21 с.
7. **Истомин, А. Д.** Зависимость границ микротрещинообразования бетона от его прочности и напряженного состояния / А. Д. Истомин, Н. А. Беликов // *Вестник МГСУ. Строительство. Архитектура*. — 2011. — № 2—1. — С. 159—162.
8. Рекомендации по подбору составов, изготовлению и применению модифицированных химическими и минеральными добавками конструкционно-теплоизоляционного и конструкционного керамзитобетонов / РУП «Институт БелНИИС». — Минск, 2013. — 38 с.
9. **Семенюк, С. Д.** Прочность и деформативность изгибаемых железобетонных элементов, усиленных наращиванием сжатой зоны, при статическом и малоцикловом нагружениях / С. Д. Семенюк, Ю. Г. Москалькова. — Могилев: Белорус. — Рос. ун-т, 2017. — 274 с.
10. **Bodnarova, L.** Behaviour of Lightweight Expanded Clay Aggregate Concrete Exposed to High Temperatures / Lenka Bodnarova, Rudolf Hela, Michala Hubertova, Iveta Novakova // *Engineering and Technology International Journal of Civil and Environmental Engineering*. — 2014. — Vol. 8, № 12. — P. 1210—1213.
11. **Boma, M. B.** A continuum model of micro-cracks in concrete / Malika Bongué Boma, Maurizio Brocato // *Continuum Mechanics and Thermodynamics*. — 2010. — Vol. 22, № 2. — P. 137—161. — DOI: 10.1007/s00161-009-0130-4.
12. **Byard, V. E.** Cracking tendency of lightweight concrete. Submitted to The Expanded Shale, Clay, and Slate Institute. Research Report / E. Benjamin, Anton K. Schindler. — Harbert Engineering Center Auburn University, 2010. — 93 p.
13. **Chandra, S.** Lightweight aggregate concrete. Science, Technology, and Applications / Satish Chandra, Leif Berntsson. — New York, U. S. A.: Noyes Publications; William Andrew Publishing, 2002. — 407 p.
14. **Clarke, J. L.** Structural Lightweight Aggregate Concrete / John L. Clarke. — Glasgow, UK: Blackie Academic & Professional, 2005. — 161 p.
15. **Dehn, F.** Fracture mechanical behaviour of lightweight aggregate concrete [Электронный ресурс] / Frank Dehn // International Association of Fracture Mechanics for Concrete and Concrete Structures (IA-FraMCoS). — Режим доступа: <http://framcos.org/FraMCoS-5/Dehn.Fracture.pdf>.
16. Development of Light Weight Concrete by using Autoclaved Aerated Concrete / Mr. M. Gunasekaran, G. Saranya, L. Elamaran [et al.] // *IJRST — International Journal for Innovative Research in Science & Technology*. — 2016. — Vol. 2, № 11. — P. 518—522.
17. Experimental study on early cracking sensitivity of lightweight aggregate concrete / X. F. Wang, C. Fang, W. Q. Kuang [et al.] // *Construction and Building Materials*. — 2017. — Vol. 136. — P. 173—183.
18. **Fenyvesi, O.** Affect of lightweight aggregate to early age cracking in concrete / Oliver Fenyvesi // *Periodica Polytechnica. Civil Engineering*. — 2011. — № 55/1. — P. 63—71. — DOI: 10.3311/pp.ci.2011-1.08.
19. **Lim, C. C.** Microcracking and chloride permeability of concrete under uniaxial compression / C. C. Lim, N. Gowripalan, V. Sirivivatnanon // *Cement and Concrete Composites*. — 2000. — Vol. 22, № 5. — P. 353—360.
20. **Moskalkova, Yu. H.** Behavior of claydite at the stage of microcrack formation / Yu. H. Moskalkova // *Наука та будівництво*. — 2017. — № 3 (13). — P. 40—43.
21. **Tao, Ji.** Evaluation method of cracking resistance of lightweight aggregate concrete / Tao Ji, Binbin Zhang, Yong-bo Chen, Yi-zhou Zhuang // *Journal of Central South University*. — 2014. — Vol. 21, № 4. — P. 1607—1615.



22. **Tomičić, I.** Analysis of lightweight aggregate concrete beams / Ivan Tomičić // *Građevinar*. — 2012. — № 64 (10). — P. 817—824.
23. Water absorption in internally cured mortar made with water-filled lightweight aggregate / R. Henkensiefken, J. Castro, D. Bentz [et al.] // *Cement and Concrete Research*. — 2009. — Vol. 39, № 10. — P. 883—892. — DOI: 10.1016/j.cemconres.2009.06.009.
24. **Yang, Z.** Interaction between Micro-Cracking, Cracking, and Reduced Durability of Concrete: Developing Methods for Considering Cumulative Damage in Life-Cycle Modeling / Zhifu Yang, W. Jason Weiss, Jan Olek. — Indiana: Purdue University, 2005. — 265 p.

## References

1. **Akhmedov, A. I.** Vliyanie mikrorazrusheniya betona na ekspluatatsionnye kachestva stroitel'nykh konstruksii: avtoref. dis.... kand. tekhn. nauk: 05.23.01 / A. I. Akhmedov. — M., 2006. — 22 s.
2. **Berg, O. Ya.** Fizicheskie osnovy teorii prochnosti betona i zhelezobetona / O. Ya. Berg. — M.: Gosstroizdat, 1962. — 96 s.
3. **Bobrov, V. V.** Metody otsenki vliyaniya razlichnykh faktorov na protsess mikrorazrusheniya betona pod nagruzkoi: avtoref. dis.... kand. tekhn. nauk: 05.23.01 / V. V. Bobrov. — M., 2015. — 26 s.
4. **Bobrov, V. V.** Mikrorazrusheniya betona pri tsentral'nom szhatii / V. V. Bobrov // *Arkhitektura i stroitel'stvo Rossii*. — 2009. — № 10. — S. 26—37.
5. **Evrokod 2.** Proektirovanie zhelezobetonnykh konstruksii. Ch. 1-1. Obshchie pravila i pravila dlya zdaniy: TKP EN 1992-1-1-2009: vved. 01.01.10. — Minsk: Minstroiarhitektury RB, 2015. — 206 s.
6. **Zinchenko, S. V.** Mitsnist' ta deformativnist' konstruksii iz tsementno-zol'nogo keramzitobetonu: avtoref. dis.... kand. tekhn. nauk: 05.23.01 / S. V. Zinchenko. — Odesa, 2010. — 21 s.
7. **Istomin, A. D.** Zavisimost' granits mikrotreshchinoobrazovaniya betona ot ego prochnosti i napryazhennogo sostoyaniya / A. D. Istomin, N. A. Belikov // *Vestnik MGSU. Stroitel'stvo. Arkhitektura*. — 2011. — № 2—1. — S. 159—162.
8. Rekomendatsii po podboru sostavov, izgotovleniyu i primeneniyu modifitsirovannykh khimicheskimi i mineral'nymi dobavkami konstruksionno-teploizolyatsionnogo i konstruksionnogo keramzitobetonov / RUP «Institut BelNIIS». — Minsk, 2013. — 38 s.
9. **Semenyuk, S. D.** Prochnost' i deformativnost' izgibaemykh zhelezobetonnykh elementov, usilennykh narashchivaniem szhatoy zony, pri staticheskom i malotsiklovom nagruzheniyakh / S. D. Semenyuk, Yu. G. Moskal'kova. — Mogilev: Belarus. — Ros. un-t, 2017. — 274 s.
10. **Bodnarova, L.** Behaviour of Lightweight Expanded Clay Aggregate Concrete Exposed to High Temperatures / Lenka Bodnarova, Rudolf Hela, Michala Hubertova, Iveta Novakova // *Engineering and Technology International Journal of Civil and Environmental Engineering*. — 2014. — Vol. 8, № 12. — P. 1210—1213.
11. **Boma, M. B.** A continuum model of micro-cracks in concrete / Malika Bongué Boma, Maurizio Brocato // *Continuum Mechanics and Thermodynamics*. — 2010. — Vol. 22, № 2. — P. 137—161. — DOI: 10.1007/s00161-009-0130-4.
12. **Byard, B. E.** Cracking tendency of lightweight concrete. Submitted to The Expanded Shale, Clay, and Slate Institute. Research Report / E. Benjamin, Anton K. Schindler. — Harbert Engineering Center Auburn University, 2010. — 93 p.
13. **Chandra, S.** Lightweight aggregate concrete. Science, Technology, and Applications / Satish Chandra, Leif Berntsson. — New York, U. S. A.: Noyes Publications; William Andrew Publishing, 2002. — 407 p.
14. **Clarke, J. L.** Structural Lightweight Aggregate Concrete / John L. Clarke. — Glasgow, UK: Blackie Academic & Professional, 2005. — 161 p.
15. **Dehn, F.** Fracture mechanical behaviour of lightweight aggregate concrete [Elektronnyi resurs] / Frank Dehn // *International Association of Fracture Mechanics for Concrete and Concrete Structures (IA-FraMCoS)*. — Rezhim dostupa: <http://framcos.org/FraMCoS-5/Dehn.Fracture.pdf>.
16. Development of Light Weight Concrete by using Autoclaved Aerated Concrete / Mr. M. Gunasekaran, G. Saranya, L. Elamaran [et al.] // *IJRST — International Journal for Innovative Research in Science & Technology*. — 2016. — Vol. 2, № 11. — P. 518—522.
17. Experimental study on early cracking sensitivity of lightweight aggregate concrete / X. F. Wang, C. Fang, W. Q. Kuang [et al.] // *Construction and Building Materials*. — 2017. — Vol. 136. — P. 173—183.
18. **Fenyvesi, O.** Affect of lightweight aggregate to early age cracking in concrete / Oliver Fenyvesi // *Periodica Polytechnica. Civil Engineering*. — 2011. — № 55/1. — P. 63—71. — DOI: 10.3311/pp.ci.2011-1.08.
19. **Lim, C. C.** Microcracking and chloride permeability of concrete under uniaxial compression / C. C. Lim, N. Gowripalan, V. Sirivivatnanon // *Cement and Concrete Composites*. — 2000. — Vol. 22, № 5. — P. 353—360.
20. **Moskalkova, Yu. N.** Behavior of claydite at the stage of microcrack formation / Yu. N. Moskalkova // *Nauka ta budivnitstvo*. — 2017. — № 3 (13). — P. 40—43.
21. **Tao, Ji.** Evaluation method of cracking resistance of lightweight aggregate concrete / Tao Ji, Bin-bin Zhang, Yong-bo Chen, Yi-zhou Zhuang // *Journal of Central South University*. — 2014. — Vol. 21, № 4. — P. 1607—1615.



22. **Tomičić, I.** Analysis of lightweight aggregate concrete beams / Ivan Tomičić // Građevinar. — 2012. — № 64 (10). — P. 817—824.
23. Water absorption in internally cured mortar made with water-filled lightweight aggregate / R. Henkensiefken, J. Castro, D. Bentz [et al.] // Cement and Concrete Research. — 2009. — Vol. 39, № 10. — P. 883—892. — DOI: 10.1016/j.cemconres.2009.06.009.
24. **Yang, Z.** Interaction between Micro-Cracking, Cracking, and Reduced Durability of Concrete: Developing Methods for Considering Cumulative Damage in Life-Cycle Modeling / Zhifu Yang, W. Jason Weiss, Jan Olek. — Indiana: Purdue University, 2005. — 265 p.

## CALCULATION METHOD FOR THE FORMATION OF MICROCRACKS TAKING INTO ACCOUNT THE DENSITY OF CLAYDITE CONCRETE

S. D. Semenyuk<sup>1</sup>, Yu. G. Moskal'kova<sup>2</sup>

*Belarusian-Russian University<sup>1,2</sup>  
Republic of Belarus, Mogilev*

---

<sup>1</sup> *D. Sc. in Engineering, Prof. of the Dept. of Industrial and Civil Construction, tel.: +375(29)7433872,  
e-mail: skzs@tut.by*

<sup>2</sup> *PhD in Engineering, Assoc. Prof. of the Dept. of Industrial and Civil Construction, tel.: +375(29)7429183,  
e-mail: julia43@tut.by*

---

**Statement of the problem.** An important aspect of concrete behaviour under loading is the formation and development of microcracks. The existing methods for the calculation of values of the limits of microcrack formation for lightweight aggregate concrete do not provide sufficient convergence with the experimental data. In this regard, it is advisable to derive new formulas applicable for lightweight aggregate concrete.

**Results.** The paper presents the test results on concrete of different strength and density classes. It also suggests new formulas for the calculation of the limits of micro- and macrocrack formation. According to the obtained research results, an empirical coefficient is introduced based on the density class of lightweight aggregate concrete.

**Conclusions.** The calculation method of the upper and lower limits of microcrack formation for lightweight aggregate concrete of various strength and density classes is proposed. The method is harmonised with the provisions of the Eurocode 2. At the same time, good convergence with the experimental data is provided.

**Keywords:** lightweight aggregate concrete, claydite, limits of microcrack formation, density, density class.

