

строит. РБ, РУП «Институт БелНИИС», 2008. – 92 с. – рег. № 044. **19.** Руководящие технические материалы по проектированию и применению сталефибробетонных строительных конструкций: РТМ 17-01-2002. – Введ. 01.09.2002. – М.: Госстрой РФ. – 2003. – 80 с. **20.** Дробышинец, С.Я. Вплив повторних малоциклових навантажень на механічні характеристики сталефібробетону та роботу згинальних елементів на його основі: дис. канд. техн. наук: 05.23.01 / С.Я. Дробышинець. – Луцк, 2005. – 174 с.

**УДК 624.012**

## **ПРЕДЕЛЫ МИКРОТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ БЕТОНОВ РАЗНЫХ ВИДОВ**

### **CRAZING LIMITS FOR CONCRETE DIFFERENT SPECIES**

**Москалькова Ю.Г.** (Белорусско-Российский университет, г. Могилев, Республика Беларусь)

**Moskalkova Y.G.** (Belarusian-Russian University, Mogilev, the Republic of Belarus)

**В статье представлены результаты экспериментальных значений пределов микротрещинообразования тяжелого бетона, сталефибробетона, керамзитобетона, бетона на основе отходов металлургических производств.**

**The article presents the results of experimental values outside crazing limits for heavy concrete steelfibreconcrete, lightweight concrete, concrete-based metallurgical wastes.**

#### **Ключевые слова:**

Бетон, сталефибробетон, легкий бетон, диаграмма деформирования, сжатие, отходы производств.

Concrete, steelfibreconcrete, lightweight concrete, stress-strain diagram, compression, waste production.

**Важными характеристиками** прочности и деформативности бетона являются пределы верхнего и нижнего микротрещинообразования. Структура бетона содержит начальные дефекты и повреждения, определяющие его поведение под нагрузкой, а также при различных физических и химических воздействиях. Бетон состоит одновременно из трех материальных фаз: твердой, жидкой и газообразной. Жесткий скелет структуры формируют зерна крупного и мелкого заполнителя и непрогидратировавшие зерна цемента.

Жесткий скелет заполнен коллоидальным раствором продуктов гидратации цемента, а также воздухом, содержащимся в порах.

При центральном кратковременном сжатии бетонного образца на начальной стадии наблюдается незначительное увеличение числа контактных микротрещин на границе частиц заполнителя и цементного камня до уровня, соответствующего нижней границе микротрещинообразования  $\eta_{crc}^0$ .

При превышении уровня  $\eta_{crc}^0$  наблюдается интенсивное увеличение длины, ширины раскрытия и числа контактных микротрещин, что приводит к появлению нелинейного участка на графике зависимости «Напряжения – относительные деформации». Эта стадия характеризуется незначительным количеством микротрещин в цементном камне. Вместе с тем начинают появляться комбинированные микротрещины, объединяющие, главным образом, контактные микротрещины вокруг зерен заполнителя. Следует отметить, что формирование этих трещин хотя и не нарушает стабильного состояния системы, приводит к скольжению зерен заполнителей относительно матрицы, что обуславливает проявление ярко выраженных неупругих свойств бетона.

При достижении верхней границы микротрещинообразования  $\eta_{crc}^V$  увеличивается число и суммарная длина комбинированных трещин, возрастает их ширина раскрытия. На этой стадии начинают формироваться ярко выраженные микротрещины в цементном камне.

**Интенсивное развитие комбинированных микротрещин** не ведет к незамедлительному исчерпанию прочности материала, однако возникает опасность усталостного разрушения при длительном нагружении: в процессе приложения нагрузки в бетоне развиваются псевдопластические деформации, происходит накопление микроразрушений, в результате чего имеет место слияние микротрещин в макротрещины, которые приводят к разрушению бетонной матрицы.

При действии малоцикловых нагрузок верхнюю границу микротрещинообразования называют «критической границей», при достижении которой малоцикловое нагружение оказывает негативное влияние на прочностные и деформативные характеристики бетона [1, 2].

Определение верхнего предела микротрещинообразования производилось графическим методом по результатам испытания стандартных образцов в виде призм с размерами 150×150×600 мм для всех серий опытных образцов графическим методом по усредненным экспериментальным данным путем построения зависимости «Уровень нагружения  $\eta$  – объемная деформация  $\varepsilon^V$ ». Объемные деформации  $\varepsilon^V$  при этом определялись по формуле (1) [2–4]:

$$\varepsilon^V = \varepsilon_c - 2\varepsilon_v, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_c$  – продольные относительные деформации;  
 $\varepsilon_v$  – поперечные относительные деформации.

Определение нижнего предела микротрещинообразования  $\eta_{cr}^0$  также производилось графическим методом по экспериментальным данным. Сначала определялись значения секущих модулей по упругопластическим продольным  $E'_c$  относительным деформациям, для которых были выведены линейные зависимости « $\eta - E'_c$ » методом линейно-корреляционного анализа [6–9]. Линейный характер зависимости « $\eta - E'_c$ » был эмпирически обоснован в работе [1]. На основании полученных зависимостей были определены значения коэффициента Пуассона  $\nu$ . По корреляционным кривым зависимостей « $\frac{d\nu}{d\eta} - \eta$ » и « $\frac{d^2\nu}{d\eta^2} - \eta$ » были определены соответственно верхняя  $\eta_{cr}^v$  и нижняя  $\eta_{cr}^0$

границы образования и развития продольных микротрещин отрыва при кратковременном сжатии бетона [3].

Были проведены испытания стандартных образцов, изготовленных из тяжелого бетона, сталефибробетона на основе стальной фрезерованной фибры «Нагех», бетона с использованием отходов литейно-металлургических производств Могилевской области в качестве мелкого заполнителя (ОМП-бетон), легкого бетона на основе керамзитового гравия производства ОАО «Завод керамзитового гравия» (г. Новолукомль).

**На основании экспериментальных данных** установлено, что между верхним и нижним пределами микротрещинообразования существует линейная зависимость. Коэффициент  $k_{cr} = \eta_{cr}^0 / \eta_{cr}^v$  отличается для бетонов различных видов и может быть принят:

- для тяжелого бетона с объёмным весом  $24 \text{ кН/м}^3$   $k_{cr} \approx 0,67$ ;
- для сталефибробетона  $k_{cr} \approx 0,70$ ;
- для ОМП-бетона  $k_{cr} \approx 0,73$ ;
- для легкого бетона  $k_{cr} \approx 0,70$ .

Примечательно, что для легкого керамзитобетона экспериментальное значение коэффициента  $k_{cr}$  не совпадает с отношением  $\eta_{cr}^0 / \eta_{cr}^v \approx 0,62$ , что обусловлено особенностью легкого бетона: начальный модуль упругопластичности керамзитобетона ниже, а конечный – выше, чем, например, для тяжелого бетона.

Рекомендуемые значения коэффициента  $k_{cr}$  удовлетворительно согласуются с результатами экспериментальных исследований других авторов [10–12].

Для определения нижнего и верхнего пределов микротрещинообразования предложены зависимости (формулы (2), (3)), в которых помимо средней прочности бетона  $f_{cm}$  учтён вид бетона. Критерием для учёта особенностей работы бетонов различных видов служит коэффициент  $k_{cr}$ .

$$\eta_{cr}^0 = \frac{1}{3} k_{cr} \cdot \ln f_{cm} - 0,15; \quad (2)$$

$$\eta_{crc}^v = 1/3 k_{crc} \cdot \ln f_{cm} + 0,1. \quad (3)$$

Сравнение опытных данных и расчетных значений, полученных по формулам (2) и (3), приведено в таблице 1.

Таблица 1

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

| Вид бетона   | Коэффициент $k_{crc}$ | Прочность $f_{cm}$ МПа | Опытные значения  |                   | Расчетные значения  |                     | Отклонения расчетных значений от опытных, % |                      |
|--|-----------------------|------------------------|-------------------|-------------------|---------------------|---------------------|---|----------------------|
|  |                       |                        | $\eta_{crc}^0$ оп | $\eta_{crc}^v$ оп | $\eta_{crc}^0$ теор | $\eta_{crc}^v$ теор | $\Delta\eta_{crc}^0$                        | $\Delta\eta_{crc}^v$ |
| Собственные исследования   |                       |                        |                   |                   |                     |                     |   |                      |
| тяжелый бетон  | 0,67                  | 18,7                   | 0,513             | 0,75              | 0,504               | 0,754               | 1,7   | -0,5                 |
|  |                       | 22,3                   | 0,535             | 0,806             | 0,543               | 0,793               | -1,6  | 1,6                  |
|  |                       | 29,0                   | 0,58              | 0,861             | 0,602               | 0,852               | -3,8  | 1,0                  |
|  |                       | 28,2                   | 0,57              | 0,842             | 0,596               | 0,846               | -4,5  | -0,4                 |
|  |                       | 28,1                   | 0,533             | 0,830             | 0,595               | 0,845               | -9,6  | -1,8                 |
| СФБ  | 0,70                  | 20,0                   | 0,557             | 0,802             | 0,549               | 0,799               | 1,4   | 0,4                  |
| ОМП  | 0,73                  | 18,8                   | 0,61              | 0,849             | 0,564               | 0,814               | 7,6   | 4,1                  |
|  |                       | 26,6                   | 0,655             | 0,888             | 0,648               | 0,898               | 1,0   | -1,2                 |
| Исследования И.И. Мельянцовой [13]   |                       |                        |                   |                   |                     |                     |   |                      |
| керамзитобетон   | 0,70                  | 11,2                   | 0,44              | 0,73              | 0,413               | 0,663               | 6,10  | 9,07                 |
|  |                       | 9,1                    | 0,41              | 0,71              | 0,366               | 0,616               | 10,70                                       | 13,69                |
|  |                       | 10,7                   | 0,44              | 0,73              | 0,402               | 0,652               | 8,65  | 10,77                |
|  |                       | 15,9                   | 0,50              | 0,75              | 0,494               | 0,744               | 0,11  | 1,12                 |
|  |                       | 17,7                   | 0,45              | 0,75              | 0,519               | 0,769               | -15,25                                      | -1,89                |
| Исследования М.С. Поветкина [12]   |                       |                        |                   |                   |                     |                     |   |                      |
| тяжелый бетон  | 0,67                  | 12,7                   | 0,44              | 0,70              | 0,418               | 0,668               | 5,1   | 4,6                  |
|  |                       | 28,5                   | 0,53              | 0,84              | 0,598               | 0,848               | -12,9                                       | -1,0                 |
| Исследования С.Я. Дробышинца [11]  |                       |                        |                   |                   |                     |                     |   |                      |
| СФБ  | 0,70                  | 21,3                   | 0,50              | 0,80              | 0,564               | 0,814               | -12,7                                       | -1,7                 |
| Исследования А.М. Бамбуры [10]   |                       |                        |                   |                   |                     |                     |   |                      |
| тяжелый бетон  | 0,67                  | 26,9                   | 0,54              | 0,81              | 0,585               | 0,835               | -8,4  | -3,1                 |
| Исследования А.В. Голуба [14]  |                       |                        |                   |                   |                     |                     |   |                      |
| тяжелый бетон  | 0,67                  | 18,3                   | 0,578             | 0,845             | 0,499               | 0,749               | 13,6  | 11,3                 |
| ТЭС  | 0,73                  | 18,5                   | 0,566             | 0,814             | 0,560               | 0,810               | 1,1   | 0,5                  |
| Исследования С.Д. Семенюка [5]   |                       |                        |                   |                   |                     |                     |   |                      |
| тяжелый бетон  | 0,67                  | 19,42                  | 0,581             | 0,849             | 0,512               | 0,762               | 11,8  | 10,2                 |
| Среднее отклонение $\overline{\Delta\eta_{crc}} = \sum_{i=1}^n \Delta\eta_{crc,i} / n, \%$ |                       |                        |                   |                   |                     |                     | -0,09                                       | 2,84                 |

Примечание – Для анализа взяты результаты экспериментальных исследований прочностных и деформативных характеристик керамзитобетона, полученные на базе Белорусско-Российского университета И.И. Мельянцевой. Часть этих результатов публикуется впервые.

В таблице 1 приняты следующие условные обозначения:

СФБ – сталефибробетон;

ТЭС – бетон со шлаком ТЭС в качестве мелкого заполнителя;

ОМП – бетон с использованием отходов литейно-металлургических производств в качестве мелкого заполнителя.

**Таким образом,** предложенные зависимости для определения верхнего и нижнего пределов микротрещинообразования обеспечивают удовлетворительную сходимость с экспериментальными данными. При этом класс бетона учитывается значением средней прочности бетона при сжатии, а вид бетона – эмпирическим коэффициентом  $k_{crc}$ .

Следует отметить, что значение коэффициента  $k_{crc} \approx 0,70$  свидетельствует о более высокой малоцикловой приспособляемости керамзитобетона по сравнению с традиционным тяжелым бетоном. Это предположение требует эмпирической проверки, так как подобные исследования к настоящему времени не проводились, однако в пользу данного предположения свидетельствует тот факт, что значения  $\eta_{crc}^0$  и  $\eta_{crc}^v$  для легкого бетона превышают соответствующие характеристики для тяжелых бетонов [15].

1. Бабич, С.М. Бетонні та залізобетонні елементи в умовах малоциклових навантажень : монографія / С.М. Бабич, Ю.О. Крусь. – Рівне : Вид-во РДТУ, 1999. – 119 с.
2. Москалькова, Ю.Г. Прочность и деформативность изгибаемых железобетонных элементов, усиленных наращиванием сжатой зоны, при статическом и малоцикловом нагружении : дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / Ю.Г. Москалькова. – Могилев, 2013. – 199 с.
3. Берг, О.Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона / О.Я. Берг. – М.: Госстройиздат, 1962. – 96 с.
4. Голишев, О.Б. Курс лекцій з основ розрахунку конструкцій і з опору залізобетону / О.Б. Голишев, А.Н. Бамбура. – К.: Логос, 2004. – 340 с.
5. Семенюк, С.Д. Прогнозирование работы и расчет железобетонных пространственных конструкций на неравномерно деформируемом основании: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.01; 05.23.02 / С.Д. Семенюк. – Могилев, 2004. – 381 с.
6. Блохин, А.В. Теория эксперимента: курс лекций в двух частях. Ч. 1. Научно-методический центр «Электронная книга БГУ» [Электронный ресурс]. Электрон. текст. дан. (1,1 Мб). – Минск, 2003. – Режим доступа: <http://anubis.bsu.by/publications/elresources/Chemistry/blohin1.pdf>. – Электрон. версия печ. публикации, 2002.
7. Болошенко, Ю.Г. Определение модуля упругости и упруго-пластических характеристик бетона методом линейного корреляционного анализа / Ю.Г. Болошенко // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы междунар. науч.-техн. конф. мол. ученых, Могилев, 20–21 нояб. 2008 г. / Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2008. – С. 106.
8. Семенюк, С.Д. К определению модуля упругости и упруго-пластических характеристик бетона при кратковременном центральном сжатии // Вестник Брестского государст-

венного технического университета. – Брест, 2001. – №1. – С. 40–44. **9.** Семенюк, С.Д. Бетон с использованием отходов литейно-металлургических производств при однократном и малоцикловом нагружении / С. Д. Семенюк, Ю. Г. Болошенко, Т. С. Бурко // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – Вып. 39. – Одесса, 2010. – С. 240–247. **10.** Бамбура, А.М. Експериментальні основи прикладної деформаційної теорії залізобетону: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.01 / А.М. Бамбура. – Київ, 2005. – 379 с. **11.** Дробышинець, С.Я. Вплив повторних малоциклових навантажень на механічні характеристики сталевібробетону та роботу згинальних елементів на його основі: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / С.Я. Дробышинець. – Луцк, 2005. – 174 с. **12.** Поветкин, М.С. Напряженно-деформированное состояние усиленных под нагрузкой железобетонных изгибаемых преднапряженных элементов: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / М.С. Поветкин. – Орел, 2009. – 213 с. **13.** Мельянцова, И.И. Прочностные и деформативные характеристики керамзитобетона класса 10/12,5 по результатам испытаний / И.И. Мельянцова, Г.А. Дивакова, М.Г. Мамочкина // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 24–25 апр. 2014 г. / Беларус.-Рос. ун-т; редкол.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2014. – С. 289–290. **14.** Голуб, А.В. Особенности прочностных и деформативных свойств бетона со шлаком ТЭС и их учет при расчете железобетонных конструкций: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / А.В. Голуб. – Ровно, 1989. – 187 с. **15.** Бабич, Е.М. Конструкции из легких бетонов на пористых заполнителях: Учебн. пособие. – К.: Выща шк. Головное изд-во, 1988. – 208 с.