

РАЗДЕЛ III. ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ИЗДЕЛИЙ И КОНСТРУКЦИЙ

УДК 691.32:69.04:693.554-486:691.327

ОЦЕНКА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ НАНОМОДИФИЦИРОВАННОГО ФИБРОБЕТОНА

Е. А. САДОВСКАЯ¹, С. Н. ЛЕОНОВИЧ², А. А. КОЛЕДА

¹м.н.с., зав. кафедрой «Инженерная графика строительного профиля»,

²д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Строительные материалы и технология строительства»
Белорусский национальный технический университет

Аннотация. Фибробетон как композиционный материал действует за счет совместной работы армирующих волокон и бетона. Наиболее эффективная совместная работа достигается только при высоком уровне сцепления всех материалов. Совместная работа дисперсных волокон на разных структурных уровнях с матрицей композита определяет характер разрушения материала и является основной возможностью повышения его деформативности. Проведены результаты исследования трещиностойкости цементного композита с углеродными нанотрубками и фиброй используя подходы механики разрушения. Установлено, что дисперсное армирование на разных структурных уровнях улучшает показатели трещиностойкости композиционного материала: удельные энергозатраты на статическое разрушение, критический коэффициент интенсивности напряжений.

Ключевые слова: фибробетон, углеродные нанотрубки, трещиностойкость, нанофибробетон, прочность, удельные энергозатраты, критический коэффициент интенсивности напряжений.

ASSESSMENT OF CRACK RESISTANCE OF NANO MODIFIED FIBER-REINFORCED CONCRETE

E. A. SADOVSKAYA, S. N. LEONOVICH, A. A. KOLEDA

Belarusian National Technical University

Abstract. Fiber-reinforced concrete as a composite material acts due to the joint work of reinforcing fibers and concrete. The most effective joint work is achieved only with a high level of adhesion of all materials. The joint work of dispersed fibers at different structural levels with the composite matrix determines the nature of the destruction of the material and is the main opportunity to increase its deformability. The results of a crack resistance study of a cement composite with carbon nanotubes and fiber using fracture mechanics approaches are carried out. It is established that dispersed reinforcement at different structural levels improves the crack resistance of the composite material: specific energy consumption for static destruction, critical stress intensity coefficient.

Keywords: fiber-reinforced concrete, carbon nanotubes, crack resistance, nanofiber-reinforced concrete, strength, specific energy consumption, critical stress intensity factor.

Одним из перспективных способов повышения трещиностойкости является введение различных дисперсных волокон. Дисперсные волокна, равномерно распределяясь по всему объему материала, создают пространственный каркас и способствуют торможению развивающихся трещин под действием разрушающих усилий [1–2].

Целесообразность применения стальной фибры заключается в следующем: использование фибрового армирования совместно со стрежневым может заменять часть арматуры за счет изменения свойств композита; дисперсное армирование дает возможность усиления углов и тонких участков конструкции; в конструкциях сложной формы, где проблематично использовать арматуру.

Эффективность фибробетона как композиционного материала обусловлена совместной работой фибры и матрицы бетона. Прочность сцепления дисперсных волокон с бетоном определяет характер разрушения материала и является основной возможностью повышения его деформативности. Адгезия, трение и механическое зацепление фибры в зоне контакта с цементным камнем зависит от состава, структуры и свойств цементного композита, а также от материала волокна, его формы и размеров. Эффективность совместной работы фибры с матри-

цей способствует улучшению физико-механических свойств композита с оптимальным количеством составляющих смеси [2]. Начало зарождения трещин происходит на наноуровне в цементной матрице. Таким образом, использование наноармирования дисперсными нановолокнами может оказать положительное влияние на трещиностойкость цементного композита [3–6]. Влияние углеродных нанотрубок (УНТ) на микроструктуру и наноструктуру модифицированного цементного камня зависит от типа углеродного материала, его физических и химических характеристик, геометрических параметров волокон и равномерности диспергирования в теле композита [3; 7].

Углеродные нанотрубки, характеризующиеся огромным, концентрированным в нанобъеме потенциалом поверхности, могут послужить катализатором процесса образования гидрокристаллов как более интенсивно (ускоренно) во времени, так и в значительно большем количестве [7; 8; 9]. Бетонный композит рассматривается как многоуровневая система. Каждый уровень представляет собой матрицу, состоящую из характерных для него включений, которые выступают как структурообразующие элементы [1; 10].

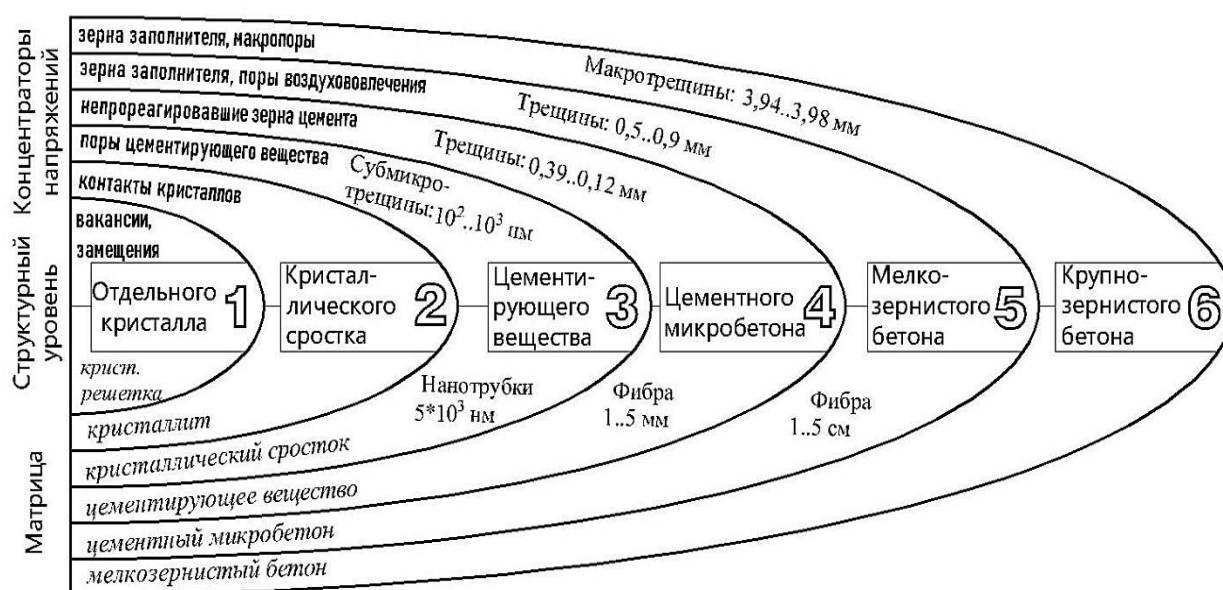


Рисунок 1 – Схема многоуровневого дисперсного армирования

Автором проведены исследования трещиностойкости цементного композита с углеродными нанотрубками и фиброй (табл. 1) на образцах-призмах 100x100x400 мм [11].

Таблица 1 – Исследуемые составы

Наименование	Цемент, кг	Щебень, кг	Песок, кг	Добавка, кг (m _{цем} , %)	УНТ, г (m _{цем} , %)	Фибра полипропиленовая ФП-0,1–20, кг	Фибра стальная ФЛВ-0,9–50, кг
Б	350	1110	750	5,6 (1,6 %)	–	–	–
Б + НЧ				5,6 (1,6 %)	10,08 (0,0028 %)	–	–
Б + Фп				5,6 (1,6 %)	–	5	–
Б + НЧ + Фп				5,6 (1,6 %)	10,08 (0,0028 %)	5	–
Б + НЧ + Фп + Фс				5,6 (1,6 %)	10,08 (0,0028 %)	5	80
Б + НЧ + Фс				5,6 (1,6 %)	10,08 (0,0028 %)	–	80

На полученных диаграммах деформирования отчетливо видны упругая и пластическая зоны деформирования (рис. 2). Наибольшая величина пластической зоны наблюдается в составах со стальной макрофиброй (Фс), причем в составе с полипропиленовой фиброй она несколько меньше. По значениям прочности на растяжение сложно оценить вклад наночастиц углерода в сопротивление трещинообразованию композита.

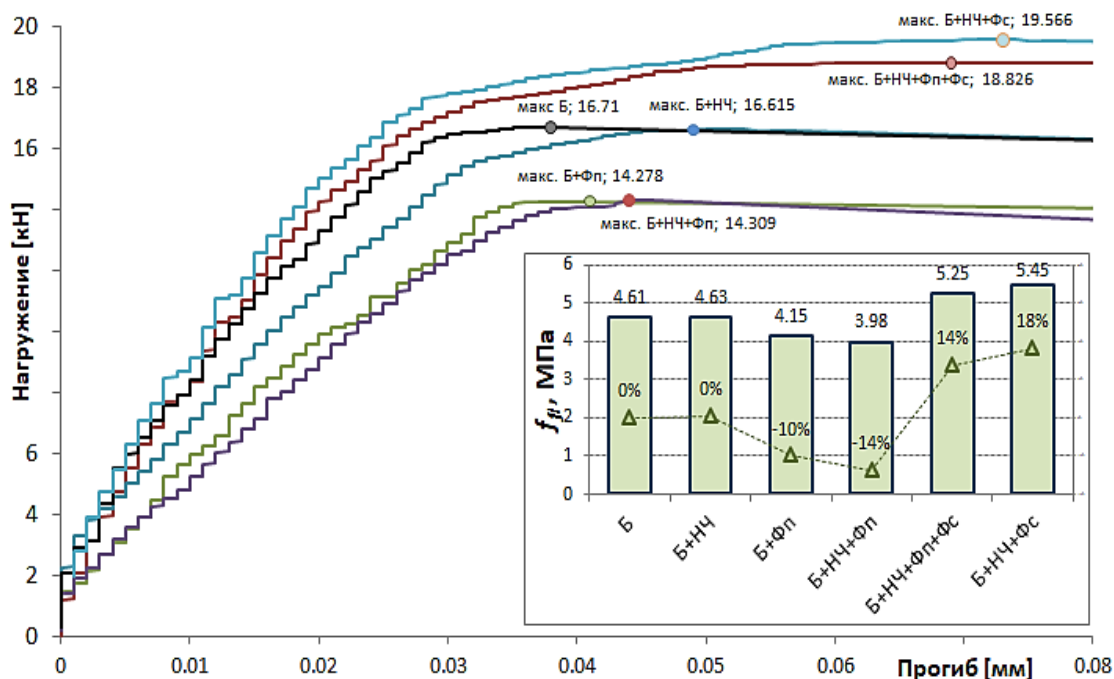


Рисунок 2 – Диаграммы деформирования и прочность на растяжение при изгибе

Полученные после обработки диаграмм деформирования значения удельных энергозатрат (рис. 3, а) позволяют сделать следующие выводы: введение УНТ привело к увеличению энергозатрат на статическое разрушение на 46 % относительно контрольного состава; полипропиленовая фибра ухудшила величину энергозатрат на 15 %, однако в сочетании с УНТ значения улучшились; при комбинации УНТ и стальной макрофибры в данном исследовании достигается наибольшая величина показателя, что на 168 % превышает эталонный образец. Такая же тенденция наблюдается при оценке величин критического коэффициента интенсивности напряжений при максимальной нагрузке (рис. 3, б).

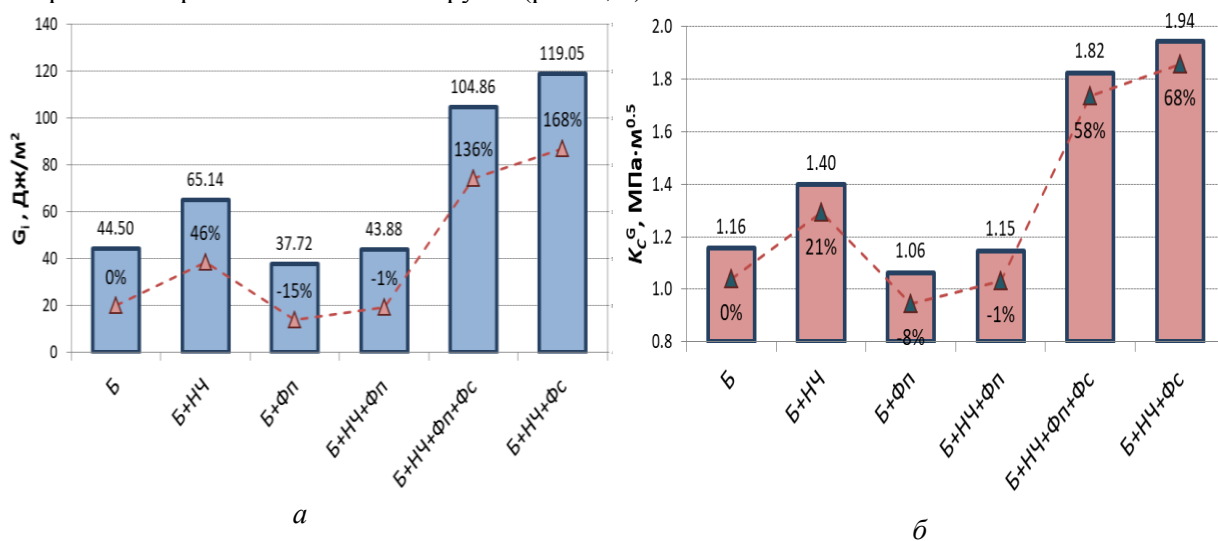


Рисунок 3 – Показатели трещиностойкости (при максимальной нагрузке): а – удельные энергозатраты на статическое разрушение; б – критический коэффициент интенсивности напряжений

Приняв за основу концепцию многоуровневого дисперсного армирования, проведены исследования фибробетона с наномодифицированной матрицей (нанофибробетон) методами механики разрушения. Установлено, что дисперсное армирование на разных структурных уровнях улучшает показатели трещиностойкости композиционного материала: удельные энергозатраты на статическое разрушение, критический коэффициент интенсивности напряжений.

Литература:

1. Leonovich, S. N. Nanofiber Concrete: Multi-Level Reinforcement / S. N. Leonovich, E. A. Sadovskaya // *Science and Technique*. – 2022. – Vol. 21, No. 5. – P. 392–396. – DOI 10.21122/2227-1031-2022-21-5-392-396.

2. Пухаренко, Ю. В. Влияние вида фибры и состава матрицы на их сцепление в фибробетоне / Ю. В. Пухаренко, Д. А. Пантелеев, М. И. Жаворонков // *Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета*. – 2022. – Т. 19, № 3 (85). – С. 436–445. – DOI 10.26518/2071-7296-2022-19-3-436-445.

3. Fracture Toughness of Nanofiber-Reinforced Concrete on Normal Separation and In-Plane Shear / E. A. Sadovskaya, E. N. Polonina, S. N. Leonovich [et al.] // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. – 2022. – Vol. 95, No. 4. – P. 945–952. – DOI 10.1007/s10891-022-02551-6.

4. Tensile Strength of Nanofibrous Concrete / E. A. Sadovskaya, E. N. Polonina, S. N. Leonovich, S. A. Zhdanok. – 2020. – Vol. 93, No. 4. – P. 1015–1019. – DOI 10.1007/s10891-020-02202-8.

5. Коледа, Е. А. Результаты испытаний нанофибробетона на растяжение с комплексным фибровым армированием / Е. А. Коледа, С. Н. Леонович, С. А. Жданок // *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии*. – 2018. – № 2. – С. 16–23

6. Критический коэффициент интенсивности напряжений при поперечном сдвиге для нанофибробетона / Е. А. Садовская, Е. Н. Полонина, С. Н. Леонович [и др.] // *Строительные материалы*. – 2021. – № 9. – С. 41–47. – DOI 10.31659/0585-430X-2021-795-9-41-46.

7. Влияние пластифицирующей добавки, содержащей углеродный наноматериал, на свойства самоуплотняющегося бетона / С. А. Жданок, Е. Н. Полонина, С. Н. Леонович [и др.] // *Вестник гражданских инженеров*. – 2018. – № 6 (71). – С. 76–85. – DOI 10.23968/1999-5571-2018-15-6-76-85.

8. Нанотехнологии в строительном материаловедении: реальность и перспективы / С. А. Жданок, Б. М. Хрусталева, Э. И. Батяновский, С. Н. Леонович // *Вестник Белорусского национального технического университета*. – 2009. – № 3. – С. 5–22.

9. Cement-Based Materials Modified with Nanoscale Additives / E. N. Polonina, S. N. Leonovich, B. M. Khroustalev [et al.] // *Science and Technique*. – 2021. – Vol. 20, No. 3. – P. 189–194. – DOI 10.21122/2227-1031-2021-20-3-189-194.

10. Садовская, Е. А. Оптимизация состава нанофибробетона по вязкости разрушения модификацией матрицы / Е. А. Садовская, С. Н. Леонович // *Наука и техника*. – 2022. – Т. 21, № 6. – С. 499–503. – DOI 10.21122/2227-1031-2022-21-6-499-503.

11. ГОСТ 29167-21 Бетоны. Методы определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении.