

## **ВЯЗКОСТЬ РАЗРУШЕНИЯ НАНОФИБРОБЕТОНА С ФИБРОЙ ИЗ ЛИСТОВОЙ СТАЛИ НА РАЗРЫВНОЙ МАШИНЕ**

*САДОВСКАЯ Е. А., ЛЕОНОВИЧ С. Н., БУДРЕВИЧ Н. А.*

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь

Всем известно, что бетон относится к композитным материалам. Он представляет собой сбалансированную смесь наполнителя (крупный и мелкий) и вяжущего вещества, затворенного водой. Наличие в бетоне разных по размеру компонентов, позволяет рассматривать его строение как многоуровневую систему. Исследователи в области материаловедения для описания строения бетонов используют два подхода. Первый из них связан с характеристикой составных частей материала, а второй - с оценкой организации его строения. Данные подходы используются совместно и позволяют отразить структурные составляющие материала и особенности его построения (организации) из этих составляющих на всех его масштабных уровнях. Структурную модель бетона можно отобразить в виде нескольких масштабных уровней: отдельного кристалла, кристаллического сростка, цементирующего вещества, цементного микробетона, мелкозернистого бетона, крупнозернистого бетона. Каждый уровень представляет собой матрицу со своими структурными элементами (включения). Включения играют как структурообразующую роль, так и концентраторов напряжений при действии механических нагрузок.

В данной статье изложена попытка исследования вязкости разрушения нанофибробетона. Нанофибробетон, с точки зрения многоуровневой системы, представляет собой бетонный композит с ингибиторами распространения трещин на следующих структурных уровнях: цементирующего вещества и мелкозернистого бетона. На уровне цементирующего вещества в качестве ингибиторов использовались углеродные нанотрубки. На уровне мелкозернистого бетона – фибра из листовой стали волнового профиля (рис. 1).

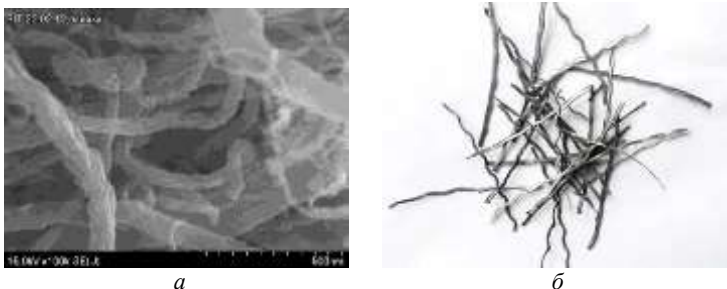


Рис. 1:

*a* – углеродные нанотрубки;

*б* – фибра из листовой стали волнового профиля (ФЛВ-0,9-50)

Углеродные нанотрубки – протяженные структуры, представляющие собой свернутые в одно- или многослойную трубку графитовые слои. Присутствие тончайших волокон в твердеющем цементном камне создает условия для эффекта «наноармирования» структуры новообразований в виде спонтанно формирующейся системы гидроокислов клинкерных минералов ( $n_1\text{CaO } m_1\text{SiO}_2 p_1\text{H}_2\text{O}$ ;  $n_2\text{CaO } m_2\text{Al}_2\text{O}_3 p_2\text{H}_2\text{O}$ ;  $n_3\text{CaO } m_3\text{Fe}_2\text{O}_3 p_3\text{H}_2\text{O}$  и др.). Малые поперечные размеры нановолокон при длине, значительно превышающей размеры собственно гидрокристаллов силикатов, алюминатов и ферритов кальция, соответствующих (8,0–15,0) нм, обеспечивают необходимые предпосылки для «защемления» волокон в межплоскостных пространствах соседствующих поверхностей множества гидрокристаллов, что и обеспечивает эффект армирования нано- и микроструктуры объема новообразований затвердевшего цементного камня. В описываемых испытаниях углеродные нанотрубки вводились в бетонную смесь в составе добавки «АРТ-КОНКРИТР» (ТУ ВУ 691460594.002-2016). Добавка относится к пластифицирующим добавкам 1 группы. Состоит из водной суспензии наноструктурированного углерода «АРТ КАРБОН-М» и пластификатора. Средняя длина трубок и волокон 0,01–20 мкм.

Фибра из листовой стали волнового профиля (ФЛВ-0,9-50) представляет собой стальную полосу, напоминающую объемную зигзагообразную кривую с рифлением. Длина фибры – 50 мм, условный диаметр 0,9 мм. Временное сопротивление разрыву используемой для фибры стали находится в диапазоне 315–410 МПа. Геометрические и прочностные свойства фибры регламентированы

ТУ ВУ 190545892.009-2013. Количество вводимой фибры в бетон-матрицу принято 1 % по объему.

Для исследования были подобраны составы бетонных-смесей, отличающихся между собой по прочности и подвижности. Данные виды смесей позволяют охватить широкий диапазон наиболее часто используемых бетонов в современном строительстве. Рецептuru бетонных смесей-матриц представлена в табл. 1.

Таблица 1

Составы бетонных смесей

Материалы	Номер состава бетонной смеси матрицы			
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
	Расход компонентов, кг на 1м <sup>3</sup>			
Портландцемент 500-Д20 (PCAM+MKY-85)	400	445	460	485 (40+45)
Песок м.к. 2,0	820	820	950	800
Щебень Фр.5-20 мм	1020	1035	–	–
Щебень Фр.5-10 мм	–	–	880	825
Химическая добавка	«АРТ-КОНКРИТ» Наноструктурированная			
Технологические показатели бетонных смесей				
В/Ц	0,39	0,3	0,3	0,28
Подвижность бетонной смеси, ОК/ПК, см	22	22	53	64
Марка по удобоукладываемости	П5	П5	Р4	Р6

В основу исследования было заложено испытание образцов призм размером 100×100×400 мм на разрывной машине Controls 70-S0820/С. Испытание проводилось на растяжение при изгибе по четырехточечной схеме нагружения (ГОСТ 10180). Помимо разрушающей нагрузки в процессе испытания фиксировались диаграммы разрушения (рис. 2, 3).

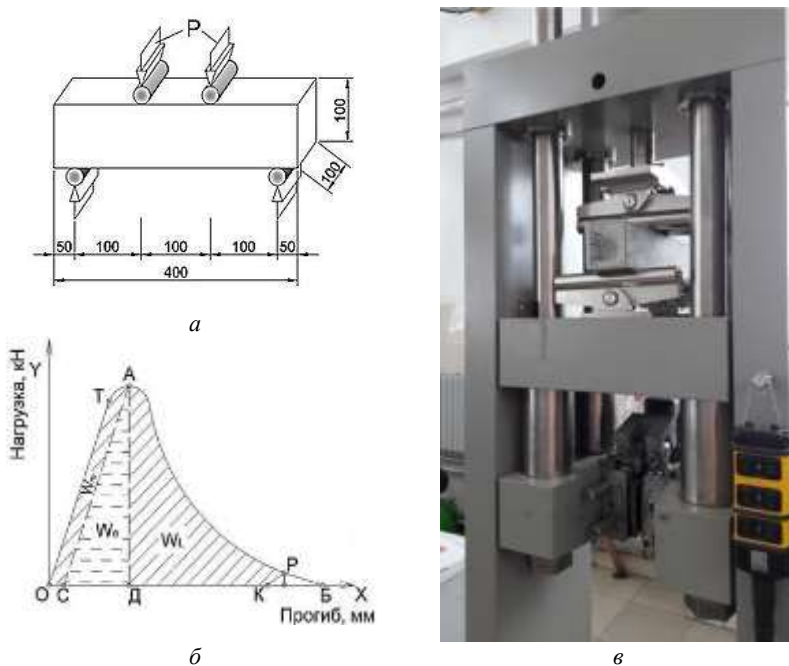


Рис. 2:  
*a* – схема испытаний; *б* – модель расчетной диаграммы разрушения;  
*в* – внешний вид испытания

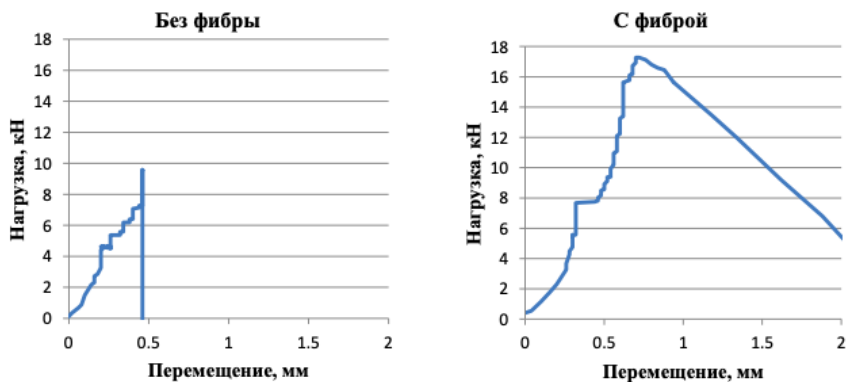


Рис. 3. Пример полученных графиков деформирования при испытаниях образцов без фибрового армирования и с фибровым армированием

Полученные диаграммы разрушения представляют собой графики зависимости величины прилагаемого усилия на образец (Нагрузка, кН) от величины перемещения траверсы (Перемещение, мм) испытательной машины Controls 70-C0820/С. Обработка полученных графиков проводилась расчетным путем с определением силовых и энергетических характеристик трещиностойкости (ГОСТ 29167).

Удельные энергозатраты на инициирование квазистатического разрушения, Дж/м<sup>2</sup>:

$$G_i = W_i/A_c \quad (1)$$

где  $W_i$  – энергозатраты необходимые для инициирования квазистатического разрушения, Дж:

$$W_i = W_m + W_e \quad (2)$$

$W_m$  – энергозатраты на диссипативные (необратимые) процессы, развитие и слияние исходных технологических микротрещин, Дж;

$W_e$  – упругое деформирование на стадии инициирования квазистатического разрушения (страгивание магистральной трещины), Дж;

$A_c$  – рабочая площадь поперечного сечения образца, мм. Квазистатический коэффициент интенсивности напряжений, Па $\sqrt{м}$ :

$E$  – модуль упругости, ГПа.

$$K_i = (G_i \cdot E)^{0,5} \quad (3)$$

Результаты испытаний. После испытания образцов из бетонной смеси и фибробетонной было получено: величина максимального усилия на растяжение при изгибе и диаграммы деформирования (нагрузка – перемещение). Для последующего анализа расчетным путем определены удельные энергозатраты на инициирование квазистатического разрушения, модуль упругости и квазистатический коэффициент интенсивности напряжений (рис. 4, 5).

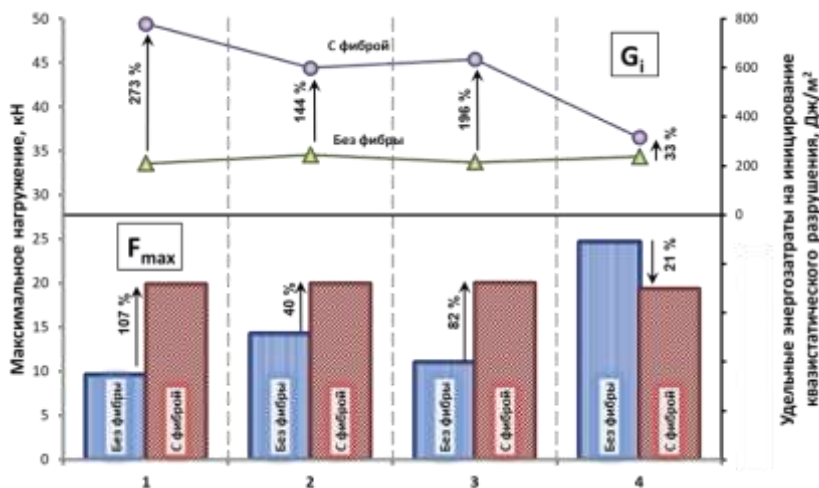


Рис. 4

Максимальное усилие при изгибе в составах 1–3 существенно возросло при добавлении в них фибрового армирования: 107 %, 40 %, 82 %. В составе под номером 4 фибровое армирование данного типа наоборот повлияло на уменьшение прилагаемого усилия разрушения: 21 %. Следовательно, данный тип фибрового армирования наиболее эффективен в бетонах с более низким показателем прочности и неэффективен в высокопрочных самоуплотняющихся бетонах.

Удельные энергозатраты на инициирование квазистатического разрушения во всех составах с фибровым армированием показали прирост по сравнению с образцами без фибрового армирования. Данный показатель характеризует влияние фибрового армирования на изменение вязкости разрушения бетона при введении фибровых волокон (1 % по объему) из стального листа волнового профиля. Наибольший прирост (273 %) продемонстрировал образец с бетоном-матрицей наименьшей прочности. Образцы составов 2 и 3 показали прирост на 144 % и 196 % соответственно. У призм состава 4 наименьший прирост – 33 %, хотя прочность на растяжение при изгибе фибровое армирование уменьшило значение относительно образцов без фибры.

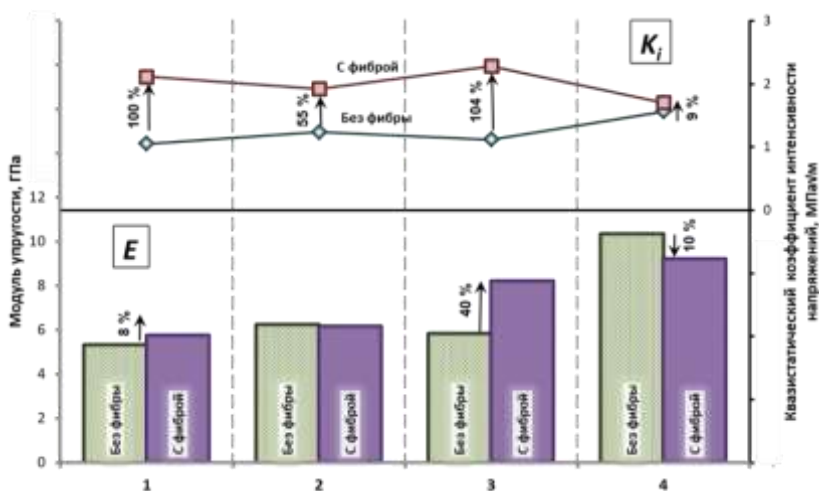


Рис. 5

Заметное увеличение модуля упругости (40 %) наблюдается в нановолокнистых образцах состава номер 3. В составах 1 и 2 модуль упругости остается почти неизменным. В составе 4 в образцах с волокнистым армированием модуль упругости снижается на 10 %.

Изменение квазистатического коэффициента интенсивности напряжений нановолокнистых образцов схоже с тенденцией изменения модуля упругости этих образцов. Наибольшее увеличение значения коэффициента интенсивности напряжений наблюдается в 1 и 3 составах: 100 % и 104 %. В составе 2 – 55 %. В составе 4 прирост наименьший – всего 9 %.

Вывод. Данный тип волокнистого армирования наиболее эффективен в бетонах со средней прочностью на сжатие и на растяжение. Вероятно, в бетонах с малой прочностью (ниже C20/25) данный тип армирования тоже будет эффективен. В высокопрочных бетонах волокнистая стальная из листа волнового профиля в количестве 1 % по объему эффективности не имеет.

Квазистатический коэффициент интенсивности напряжений достаточно наглядно демонстрирует влияние волокнистого армирования на изменение вязкости разрушения волокнистого бетона в сравнении с обычным бетоном.

Так как испытания проводились на разрывной машине, что не является в полной мере корректным способом измерения прогиба образца (через перемещение траверсы), анализ полученных результатов проведен сравнительно с эталонными образцами. В дальнейшем результаты полученные данным способом будут сопоставлены и откорректированы с результатами, полученными на специализированном оборудовании.

УДК 666.972.69; 691.32

## **ТЕОРЕТИКО-ПРАКТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НОРМАЛИЗАЦИИ ГРАНУЛОМЕТРИИ ПРИРОДНОГО ПЕСКА**

*ФЕДОРОВИЧ П. Л., ЯКИМОВИЧ В. Д.*

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь

**Введение.** Строительная отрасль Республики Беларусь использует для приготовления бетона природный мелкий заполнитель – кварцевый песок, качество которого (с учетом выработки карьеров) постоянно ухудшается. Отрасль вынуждено использует мелкозернистый (модуль крупности  $M_k < 1,5$  ед., а зачастую  $M_k < 1,0$  ед.), что сопровождается ухудшением качества бетона, несмотря на существенный (10–20 %) перерасход вяжущего. Решить эту проблему возможно путем обогащения природного песка более крупными фракциями гранитного отсева – побочного продукта производства гранитного щебня на РУПП «Гранит». Однако его применение в исходном виде, т.е. в совокупности всех образующихся при дроблении горной породы фракций, оказалось не выгодным. Причина в том, что фракции с размером зерна менее 0,5 мм характеризуются чрезвычайно развитой удельной поверхностью, массовым наличием микротрещин в структуре твердой фазы и игольчато-лещадной формой зерен. В результате содержание (до 30–35 % по массе) этих фракций в отсеве делают его малопригодным для бетонов и растворов при «прямом» применении. Вместе с тем, если вывести из гранитного отсева фракции менее 0,5 мм, то оставшийся материал