

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

УДК 666.97

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БЕТОНОВ С ПОЛИАКРИЛОНИТРИЛЬНЫМИ ВОЛОКНАМИ

канд. техн. наук, доц. Л.М. ПАРФЕНОВА, М.С. КАЧАН
(Полоцкий государственный университет)

Показано, что применение фибры при производстве строительных материалов и изделий является одним из способов повышения долговечности и качества получаемых материалов и изделий. Предложено в качестве фибры использовать отбракованные полиакрилонитрильные волокна нитрона завода «Полимир». Приведены механические характеристики нитрона. Отмечено, что нитрон сопоставим по своим характеристикам с полиамидными волокнами, которые широко применяются в качестве фибры. Представлены результаты экспериментальных исследований некоторых физико-механических свойств мелкозернистых бетонов, армированных волокнами нитрона. Установлено влияние длины фибры нитрона на прочностные показатели бетона. Высказано предположение о низкой адгезии фибры с цементным камнем. Проанализировано влияние фибры на структуру цементного камня и бетона. Показана перспективность дальнейших исследований, направленных на применение отбракованных волокон нитрона в качестве фибры.

Введение. Материалы на основе портландцемента широко применяются в строительстве. Несмотря на неоспоримые достоинства они характеризуются низкой ударной прочностью, низким сопротивлением на разрыв и образованием усадочных трещин. Наряду с традиционным подходом, основанным на использовании стальной арматуры и металлических сеток, в последнее время находит все большее применение дисперсное армирование цементной матрицы с помощью волокон (фибр). Фибру производят из различных материалов, в различных конфигурациях, длинах и поперечных сечениях.

Материалы, применяемые в качестве фибры, поделены на три класса по величине собственного модуля упругости в сравнении с модулем продольной упругости бетона ($E_c = (0,2...0,25) \cdot 10^5$ МПа): высокомодульную, среднемодульную и низкомодульную фибру. К высокомодульной фибре ($E_f > E_c$) относятся волокна углерода, волокна бора, стальная фибра; к среднемодульной, упругие свойства которой соизмеримы со свойствами бетона, – стекловолокно, минеральные и некоторые синтетические волокна; к низкомодульной фибре ($E_f < E_c$) относятся натуральные волокна (хлопок, дерево и др.), полимерные волокна (полипропиленовая фибра и др.) [1].

Однако для большинства волокон сырьевые запасы являются либо ограниченными, либо дефицитными. Поэтому для крупнотоннажного производства волокон для дисперсного армирования композитов на основе минеральных вяжущих необходимы волокна, выпускаемые из доступного недефицитного сырья. Этим требованиям в наибольшей мере отвечают волокна, являющиеся производственными отходами. Получение фибры из производственных отходов является перспективным и обусловлено, с одной стороны, экономическими соображениями (дешевое сырье), с другой – возможностью решить экологические вопросы (утилизация отходов).

Выполненный анализ [2] опыта применения органических и неорганических волокон показал необходимость проведения исследований по применению в качестве фибры отбракованных полиакрилонитрильных волокон «Нитрон» завода «Полимир» ОАО «Нафтан».

Основная часть. Полиакрилонитрильные волокна (нитрон) вырабатываются из акрилонитрила – продукта переработки каменного угля, нефти или газа. Акрилонитрил полимеризацией превращается в полиакрилонитрил, из раствора которого формируется волокно. Затем волокна вытягивают, промывают, замасливают, гофрируют и сушат. Волокна вырабатываются в виде длинных нитей и штапеля. По внешнему виду и на ощупь длинные волокна похожи на натуральный шелк, а штапельные – на натуральную шерсть. Завод «Полимир» выпускает волокна самых разнообразных номинальных линейных плотностей от 0,13 до 2,5 текс (от 1,1 до 22,5 денье) [3; 4].

Нитрон устойчив к действию сильных кислот средней концентрации даже при нагревании, а также к щелочам средней концентрации. По стойкости к истиранию нитрон уступает полиамидным и полиэфирным волокнам. Нитрон имеет следующие характеристики: плотность 1,17 г/см³; прочность на растяжение 460...560 МПа; удлинение при разрыве 11...17 %; набухание в воде 3...6 %; модуль деформации при растяжении технической нити 4,5...6,0 ГПа [5]. Отбракованные волокна по токсикологическим критериям относятся к 4-му классу опасности (малоопасные), токсичных соединений в воздухе не образуют, трудногорючи, взрывобезопасны.

Для сравнения в таблице 1 приведены механические характеристики, применяемых в строительстве волокон композиционных материалов.

Таблица 1

Свойства различных видов волокон для изготовления фибры

Волокно	Плотность, г/см ³	Прочность на растяжение, МПа	Модуль упругости, МПа	Удлинение при разрыве, %
Полипропиленовое	0,90	400...700	3500...8000	10...25
Полиэтиленовое	0,95	600...720	1400...4200	10...12
Нейлоновое	1,10	770...840	4200...4500	16...20
Акриловое	1,10	210...420	2100...2150	25...45
Полиэфирное	1,40	730...780	8400...8600	11...13
Хлопковое	1,50	420...700	4900...5100	3...10
Асбестовое	2,60	910...3100	68 000...70 000	0,6...0,7
Стеклоанное	2,60	1800...3850	7000...8000	1,5...3,5
Стальное	7,80	600...3150	190 000...210 000	3...4
Углеродное	2,00	2000...3500	200 000...250 000	1,0...1,6
Карбоновое	1,63	1200...4000	280 000...380 000	2,0...2,2
Полиамидное	0,90	720...750	1900...2000	24...25
Вискозное сверхпрочное	1,20	660...700	5600...5800	14...16
Базальтовое	2,60...2,70	1600...3200	7000...11 000	1,4...3,6

Источник: [5].

Полиакрилонитрильное волокно имеет поперечное сечение в форме фасоли или гороха и очень шероховатую поверхность благодаря технологии мокрого прядения (рис. 1) [6].

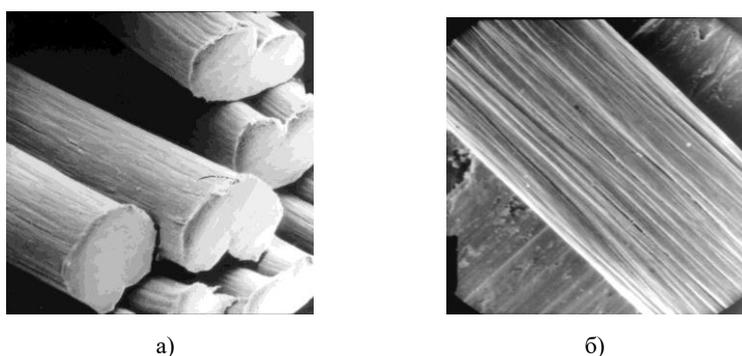


Рис. 1. Поперечное сечение волокна (а) и его поверхность (б) под электронным микроскопом

Экспериментально установлено [7; 8], что эффективность дисперсного армирования цементного камня и бетона зависит от трех параметров:

- прочности сцепления фибры с бетоном;
- длины фибры l (или отношения длины фибры к ее диаметру l/d);
- объемной концентрации фибры.

Для проведения исследований применялся портландцемент марки ПЦ500-Д20 ПРУП «Кричев-цементошифер» (активность $R_y = 44$ МПа). Мелкий заполнитель – песок карьера «Боровое» ($M_k = 2,3$).

Нормальная густота (НГ) и сроки схватывания цементного теста с фиброй определялись в соответствии с СТБ ЕН 196-3-2007 [9]. Результаты испытаний представлены в таблице 2.

Таблица 2

Нормальная густота и сроки схватывания цементного теста

Содержание фибры в кг на 1 м ³	Нормальная густота (НГ), %	Сроки схватывания		Продолжительность периода структурообразования, ч-мин
		начало схватывания, ч-мин	окончание схватывания, ч-мин	
без фибры	25,2	3-45	5-25	1-40
5 кг/м ³	29	2-45	4-30	1-45

Начало схватывания цементного теста с фиброй наступило раньше, а продолжительность периода структурообразования цементного камня сохранилась на уровне цементного теста без добавки фибры.

По данным И.И. Бернея [10], между зернами цемента, адгезированными на волокне, вода образует застойные зоны, называемые в гидромеханике областями Прандтля, и остается неподвижной даже в случае интенсивного перемешивания. Концентрация новообразований в зонах контакта цемента с волокнами остается выше средней концентрации в смеси. В связи с этим в индукционный период в жидкой фазе контактных зон раньше, чем в остальном объеме, образуется пересыщенный раствор, необходимый для начала кристаллизации гидратных новообразований. По мере накопления в жидкости зародышей новой фазы происходит образование пространственной коагуляционной структуры, которая по мере затвердевания цементного теста постепенно превращается в прочную структуру цементного камня, окружающего волокно.

Исследования, выполненные в работе [11], показывают, что на ранней стадии твердения влияние армирующих волокон также связано со структурообразующей ролью волокнистого каркаса, провоцирующего ускорение коагуляционных, а затем и кристаллизационных процессов в минеральной части композита, обусловленное поверхностными явлениями на границе раздела фаз. Благодаря углублению физико-химического взаимодействия компонентов вблизи поверхности волокон по сравнению с остальным объемом в сравнительно короткие сроки в системе образуется фиброцементный каркас, обладающий повышенной устойчивостью и пластической прочностью.

Влияние фибры нитрона на реологические свойства оценивалось по изменению подвижности цементного теста. Измерялся диаметр расплыва цементного теста под действием силы тяжести по методике, разработанной в НИИЖБ, которая основана на использовании мини-конуса. В цементное тесто с В/Ц = 0,6 вводилась фибра, длиной 2 см, в следующем количестве: 1; 5; 10 кг/м³. Измерения показали, что фибра приводит к снижению подвижности с 16 см до 14,5; 13,8; 8,25 см соответственно.

Можно предположить, что в результате введения в смесь отрезков синтетических нитей происходит сближение частиц цемента, что приводит к ограничению их свободного перемещения, то есть к повышению связности смеси. При этом армирующие волокна, если они обладают достаточной длиной, переплетаются друг с другом, образуя пространственный каркас. Прочность каркаса будет определяться числом контактов между волокнами, которое в свою очередь зависит от объемного процента армирования и длины фибр.

Из цементного теста с В/Ц = 0,6 были изготовлены образцы размером 2 × 2 × 2 см без фибры и с фиброй в количестве 30 % по объему (длина волокна 1...2 мм). Прочность цементного камня без фибры составила 33,4 МПа; прочность цементного камня с фиброй – 23,2 МПа. Следует отметить, что введение фибры привело к существенному повышению вязкости разрушения. Образцы под действием разрушающей нагрузки были смяты (рис. 2).



Рис. 2. Характер разрушения цементного камня с фиброй

Такие механизмы роста трещиностойкости объясняются [12] следующими друг за другом процессами «торможения» распространения трещин:

- 1) разрушение границ раздела между волокном и матрицей;
- 2) вытягивание волокон из матрицы.

Показано [12], что энергетические затраты на вытягивание волокон существенно больше энергии, связанной с разрушением границ раздела. Для увеличения энергии по вытягиванию необходимо стремиться к увеличению длины волокон, соответственно, и к увеличению отношения (l/d). Исходя из этого установлено, что отношение длины волокна к его диаметру (l/d) в большей степени влияет на трещиностойкость, чем на прочность.

Для изучения влияния длины фибры нитрона на прочностные характеристики изготавливались балочки 4 × 4 × 16 см из мелкозернистого бетона [13]; были подобраны составы с соотношением цемента и песка 1 : 3 и водоцементным отношением 0,6. Фибра засыпалась в сухую смесь перед добавлением воды.

Результаты испытаний приведены в таблице 3. Характер разрушения балочек на изгиб показан на рисунке 3. Проведенные испытания показали, что при длине фибры 1 мм увеличение ее количества приводит к снижению прочности как на сжатие, так и на изгиб. Установлена закономерность: чем больше по

длине используемые волокна, тем выше прочностные характеристики бетона. Можно предположить, что при длине 60 мм фибра включается в работу, дополнительная энергия затрачивается на выдергивание, чем и объясняется повышение прочности по сравнению с контрольными показателями.

Таблица 3

Влияние длины волокна на прочностные характеристики бетона

Серия	Расход фибры на 1 м ³ , кг	Прочность при сжатии, МПа	Прочность при изгибе, МПа
Ф-1	0	16,2	5,65
Ф-2	1 (длина фибры 1...2 мм)	13,8	5,92
Ф-3	5 (длина фибры 1...2 мм)	11,6	4,53
Ф-4	5 (длина фибры 20 мм)	14,28	4,69
Ф-5	5 (длина фибры 60 мм)	18,19	5,55



а)

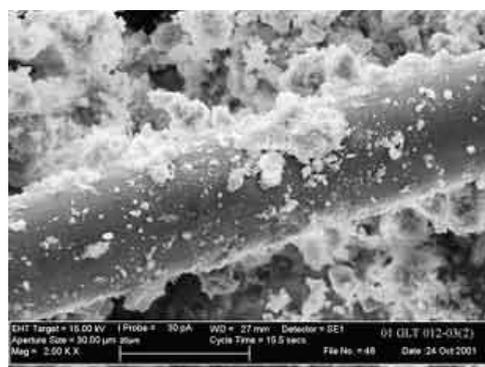


б)

Рис. 3. Характер разрушения балочек на изгиб с фиброй, длиной 60 мм (а), с фиброй длиной 20 мм (б)

Отмечается [7; 8; 11], что длина волокон не должна быть чрезмерно высокой, так как это приводит к появлению технологических трудностей при попытке провести равномерное распределение волокон в объеме подготавливаемой смеси. По своим характеристикам волокна нитрона сопоставимы с другими синтетическими волокнами: полиамидным, нейлоновым и другими. Можно предположить, что и поведение системы «волокно – вяжущее вещество» будет аналогичным.

Исследование характеристик микроструктуры бетона с полиамидной фиброй после 90 дней гидратации (хранение в лаборатории при температуре 20 °С, относительной влажности 75 %), выполненное в работе [14] растровым электронным микроскопом (Leica Stereoscan 440), показало, что цементное вяжущее вблизи от волокна более пористое, чем по объему цементного теста. Отдельные волокна демонстрировали определенную степень сцепления с вяжущим; в некоторых частях отмечались волокна с чистой и гладкой поверхностью (рис. 4). Исследованиями подтверждена низкая адгезия полиамидного волокна с цементным камнем.

Рис. 4. Микроснимки бетона, армированного полиамидным волокном (0,9 кг/м³)

Заключение. В ходе исследований в лабораторных условиях установлено, что цементный камень, армированный волокнами нитрона, характеризуется повышенной вязкостью разрушения. Сделано предположение о низкой адгезии волокон в цементной матрице по аналогичному поведению системы «волокно – вяжущее вещество» при использовании полиамидных волокон, близких по своим свойствам.

В ходе предварительных экспериментов установлено, что увеличение прочностных показателей мелкозернистого бетона происходит при длине фибры 60 мм и расходе 5 кг/м³. Одним из важных показателей, влияющих на прочность бетона, является коэффициент линейного удлинения фибры, который у волокон нитрона находится на уровне значений для полиамидной фибры, широко применяющейся для улучшения свойств бетонов и растворов. По показателю щелочестойкости нитрон превосходит стекловолокно. В связи с этим дальнейшие исследования, направленные на изучение свойств бетонов, армированных волокнами нитрона, являются перспективными.

ЛИТЕРАТУРА

1. Леонович, И.А. Применение фибробетона в строительстве и его упругие свойства / И.А. Леонович, Т.С. Самольго // Проблемы современного бетона и железобетона: сб. тр.: в 2 ч. Ч. 1. Бетонные и железобетонные конструкции / редкол.: М.Ф. Марковский [и др.]. – Минск: Стринко, 2007. – С. 239 – 249.
2. Парфенова, Л.М. Применение фибры в технологии бетонов / Л.М. Парфенова, М.С. Качан // Инженерные проблемы строительства и эксплуатации сооружений: сб. науч. тр. – Новополоцк: ПГУ, 2011. – Вып. 3. – С. 112 – 116.
3. Волокно и жгут полиакрилонитрильные «Нитрон-С»: ТУ РБ 300041455.027-2007.
4. Волокно и жгут полиакрилонитрильные «Нитрон-Д»: ТУ РБ 300041455.015-2008.
5. Волокна химические // Большая Сов. Энцикл. / Академик [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://dic.academic.ru/dic.nsf/bse/75659/Волокна>. – Дата доступа: 18.11.2011.
6. Ван-дер-Жос, Др.В.Ж. Синтетическое 100 % полиакрилонитрильное волокно RISEM для строительных материалов на основе цемента и гипса / Др.В.Ж. Ван-дер-Жос // Современные технологии сухих смесей в строительстве: сб. докладов 5-й междунар. науч.-техн. конф. / под общ. ред. Э.Л. Большакова. – Петерб. гос. ун-т путей сообщения, 2003. – С. 114 – 124.
7. Матус, Е.П. Влияние размеров изделий на распределение волокон в дисперсно-армированных материалах / Е.П. Матус // Изв. высш. учеб. заведений. Строительство. – 2004. – № 4. – С. 37 – 42.
8. Парфенов, А.В. Ударная выносливость бетонов на основе стальной и синтетической фибры: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / А.В. Парфенов. – Уфа, 2004. – 19 с.
9. Методы испытания цемента. Ч. 3. Определение сроков схватывания и равномерности изменения объема: СТБ ЕН 193-3-2007. – Утв. и введен в действие постановлением Госстандарта Респ. Беларусь от 23 февр. 2007 г. № 9. – Минск: Госстандарт. – 14 с.
10. Берней, И.И. Технология асбестоцементных изделий / И.И. Берней, В.Н. Колбасов. – М.: Стройиздат, 1985. – 398 с.
11. Пухаренко, Ю.В. Принципы формирования структуры и прогнозирование прочности фибробетонов / Ю.В. Пухаренко // Строительные материалы. – 2004. – № 10. – С. 47 – 50.
12. Голубев, В.Ю. Высокопрочный бетон повышенной вязкости разрушения: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / В.Ю. Голубев. – СПб., 2009. – 18 с.
13. Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии: ГОСТ 310.4-81. – Дата введения 01.07.83 / Госстандарт Союза ССР. – 16 с.
14. Сари, М. Армированные волокнами вяжущие композиционные материалы: вклад полиамидных волокон / М. Сари, Дж. Лекселент // Современные технологии сухих смесей в строительстве: сб. докл. 3-й междунар. науч.-техн. конф.; под общ. ред. Э.Л. Большакова. – СПб.: Петерб. гос. ун-т путей сообщения, 2001. – С. 48 – 61.

Поступила 21.11.2011

PHYSICOMECHANICAL PROPERTIES OF BETONS WITH ACRYLIC FIBER

L. PARFENOVA, M. KACHAN

It is shown, that fibre application by manufacture of building materials and products is one of ways of rising of durability and quality of gained materials and products. It is offered to use in the capacity of fibres the sort out nitron polyacrylic fiber from industrial plant "Polymir". Mechanical data of nitron is resulted. It is noted, that nitron it is comparable under the characteristics to polyamide fibres which are widely applied in the capacity of fibres. Results of experimental researches of some physicomechanical properties of the fine-grained concretes reinforced by nitron fibres are presented. Effect of nitron fibre length on strength parameters of beton is determined. The hypothesis of low adhesion of a fibre with a cement stone is made. Effect of the fibre on structure of a cement stone and beton is analysed. Perspectivity of the further researches directed on application of sort out nitron in the capacity of a fibre is shown.