

Эффективность применения полимерных фибр для дисперсного армирования бетона

Ф. Н. РАБИНОВИЧ, канд. техн. наук (ОАО «ЦНИИПромзданий»)

С. М. БАЕВ, генеральный директор ЗАО «Служба защиты сооружений»

Палитра освоенных промышленностью полимерных волокон достаточно обширна. В их числе волокна, предназначенные для массового применения и доступные по уровню цен, например, капроновые, нейлоновые, полиэтиленовые, полиамидные, полипропиленовые, а также волокна специального назначения (арамидные, графитовые, углеродные), стоимость которых существенно выше, и поэтому их использование оправдано в тех случаях, когда их конкурентоспособность доказана и экономически обоснована.

В последние годы полимерные волокна, и прежде всего полипропиленовые, получают все большее применение для дисперсного армирования бетонных изделий с целью повышения их эксплуатационных качеств.

Искусственные волокна, используемые в качестве армирующих компонентов для бетонных матриц, могут выполнять различные функции, обуславливаемые главным образом техническими характеристиками этих волокон, в том числе не только их прочностью, но и деформационными параметрами — модулем упругости (модулем деформаций). У значительной части полимерных волокон, включая полипропиленовые, модуль упругости ниже, чем модуль упругости рядового бетона. Этим в значительной мере определяется характер работы и разрушения композита, создаваемого из этих компонентов.

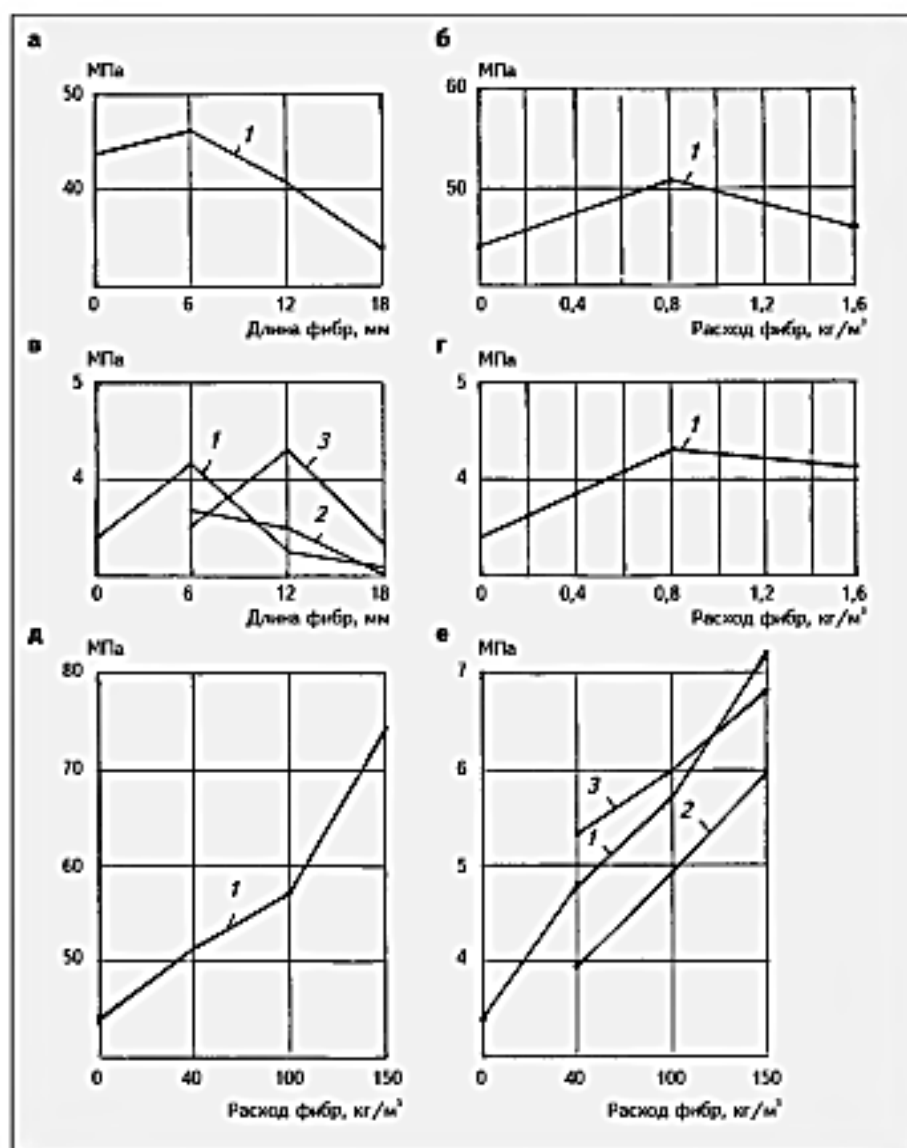
Фиброармированные бетоны, для которых используются низко модульные полимерные волокна, имеют две характерные стадии работы при их статическом нагружении. Первая стадия — до возникновения в бетонной матрице первой трещины и вторая — образование на диаграмме растяжения (изгиба) ниспадающей ветви сразу после возникновения трещины.

В отличие от бетонных композитов с высоко модульными (например, стальными) волокнами в композитах с полимерными низко модульными волокнами восприятие более высокого напряжения после образования

в бетонной матрице трещины в принципе невозможно, поскольку эта матрица с более высоким в сравнении с рассматриваемыми волокнами модулем упругости не может передать на подобные волокна возникающее в ней усилие, а сами эти волокна не способны сдерживать деформационное удлинение бетонной матрицы.

Очертание ниспадающей ветви обуславливается процессом выдергивания волокон из матрицы в сечении с трещиной. При этом для физического разрушения композита не-

Рис. 1. Данные статических испытаний торкрет-фибробетонных опытных образцов (цилиндры, призмы), дисперсно армированных полипропиленовыми (а-г) и стальными (д, е) волокнами



а, б — прочность на сжатие в зависимости от длины (при $\mu_f = 1,6 \text{ кг/м}^3$) и расхода (при $l_f = 6 \text{ мм}$) фибр в бетоне соответственно; в, г — то же, растяжение при раскалывании (цилиндры, выпущенных из плит, — 1, из призм — 2) и при изгибе (призм — 3); д, е — прочность на сжатие и растяжение при раскалывании в зависимости от расхода фибр в бетоне соответственно (1; 2 и 3 — то же, что для в)

Технические характеристики исследуемых волокон и дисперсно армированного бетона с их применением

Полипропиленовые волокна						Стальные волокна							
длина l_f , мм	диаметр d_f , мм	l_f/d_f	содержание волокон в бетоне, μ_f		поверхность контакта в единице объема бетона, m^2/m^3	количество волокон в единице объема бетона, млн шт/ m^3	длина l_f , мм	диаметр d_f , мм	l_f/d_f	содержание волокон в бетоне, μ_f		поверхность контакта в единице объема бетона, m^2/m^3	количество волокон в единице объема бетона, млн шт/ m^3
			объемное	по массе, kg/m^3						объемное	по массе, kg/m^3		
6	0,02	300	0,0009	0,8	180	478	15	0,25	60	0,005	40	85	6,93
			0,0018	1,6	360	956				0,013	100	211	
12	0,02	600	0,0009	0,8	180	239	15	0,25	60	0,013	100	211	17,26
			0,0018	1,6	360	478				0,019	150	306	
18	0,02	900	0,0009	0,8	180	159	15	0,25	60	0,019	150	306	25,95
			0,0018	1,6	360	318							

обходимо приложить дополнительное усилие в отличие от неармированного бетона с хрупким характером разрушения.

Возникновение ниспадающей ветви на диаграмме « σ – ε » отвечает более высокому уровню вязкости разрушения композита, а конфигурация и площадь диаграммы под ниспадающей ветвью зависят от объемного содержания волокон в матрице μ_f , относительной длины волокон l_f/d_f и сцепления между совмещаемыми компонентами.

В большой степени на характер разрушения композитных материалов влияют поверхности раздела в их структуре [1]. Чем меньше диаметр волокон, чем больше их объемное содержание, тем больше поверхность их контакта с бетонной матрицей, соответственно, тем более высокий при прочих равных условиях уровень вязкости разрушения [2].

ОАО «ЦНИИПромзданий» и ЗАО «Служба защиты сооружений» провели совместные исследования, связанные с оценкой влияния технологических методов торкретирования на свойства бетонных матриц, формируемых под давлением, в том числе дисперсно армированных бетонов. В развитие этой темы разработано Руководство [3].

С целью изучения строительно-технических свойств композитов на основе бетона, дисперсно армированного полимерными волокнами, опытные серии бетонных образцов

изготовили методом сухого торкретирования. В качестве армирующих компонентов использовали полипропиленовые и стальные волокна для сопоставления (таблица).

Опытные образцы представляли собой плиты размером 600×600×120 мм из неармированного и армированного фибрами торкрет-бетона. Из плит высверливали цилиндры (керны) диаметром 70 мм, высотой 70 мм и выпиливали призмы размером 100×100×400 мм.

Для получения сухой смеси торкрет-бетона использовали:

- цемент ПЦ500ДО Подольского цементного завода; песок речной фракционированный Мк 1,2 и Мк 2,2 в соотношении 1:1. При пересчете на отформованный бетон после торкретирования содержание цемента в опытных образцах составляло 350 kg/m^3 ;

- полипропиленовые фибры ВСМ-11-RO.02-20/6 (12,18) (ТУ 2272-006-1349727-2007. Волокно строительное микроармирующее) производства ООО «СИ-Айрлайд», Челябинск. Диаметр фибр – 20 мкм, длина – 6, 12 и 18 мм, прочность на разрыв – 350 МПа, модуль упругости – 8000 МПа. Содержание фибр в бетоне составляло 0,8 и 1,6 kg/m^3 , плотность полипропилена – 0,9 g/cm^3 ;

- стальную фибру волнистого очертания с покрытием слоем латуни толщиной 0,2–0,3 мкм на поверхности (ТУ 1221-71968828-2005. Фибра из стальной проволоки для армиро-

вания бетона) челябинского предприятия «Уралкорд». Длина фибр – 10...20 мм, диаметр – 0,2...0,3 мм, длина волнистой гофры (шаг) – 0,8 мм, высота гофры – 2 мм. Временное сопротивление разрыву проволоки – 2200 МПа.

Сухую смесь торкрет-бетона изготавливали в бетоносмесителе принудительного действия БС-4М. Торкрет-бетон и торкрет-фибробетон получали с помощью немецкой установки Aliva-246,5 и компрессора с рабочим давлением воздуха 0,5 МПа производительностью 8 $m^3/мин$.

Отформованные плиты выдерживали в течение 3 сут под полиэтиленовой пленкой и затем хранили в помещении при температуре 18–20 °С с периодическим увлажнением. Керны и призмы испытывали на прочность, морозостойкость, водопоглощение и водонепроницаемость. Испытания проводили в НИЦ «СМ» ОАО «ЦНИИС».

Образцы испытывали на прочность в возрасте 28 сут в соответствии с требованиями норм [3]. Керны-цилиндры испытывали на сжатие (нагружение на торец цилиндра) и растяжение путем раскалывания цилиндра (нагружение по образующей цилиндра – схема испытаний на растяжение при раскалывании согласно п. 5.4 [4]).

Испытания призм на изгиб (на растяжение при изгибе) осуществляли в соответствии с требованиями п. 5.3 [4]. Для сопоставления результа-

тов испытаний из половинки призм после их разрушения высверливали керны-цилиндры, которые затем также испытывали на раскалывание. При обработке полученных данных во внимание принимали средние значения результатов испытаний трех образцов для каждого вида испытаний.

Данные испытаний показывают, что применение полипропиленовых волокон в качестве дисперсно распределяемых компонентов в бетонной матрице может привести в определенных условиях как к повышению, так и к понижению прочности этой матрицы в сравнении с прочностью контрольных неармированных образцов. Подобная ситуация наблюдается при всех рассматриваемых видах статических испытаний: на сжатие и растяжение при раскалывании цилиндров, изгиб призм (рис. 1а-г).

Ранее отмечалось, что низкомолекулярные полимерные волокна, используемые в качестве армирующих компонентов, не могут привести к повышению прочности бетонной матрицы. Вместе с тем, как следует из результатов испытаний, уровень прочности образцов торкрет-фибробетонных цилиндров, армированных полипропиленовыми волокнами длиной 6 мм при их расходе 1,6 кг/м³ в объеме бетонной матрицы, оказался выше при сжатии на 9 % и на растяжение при раскалывании на 23 %, чем прочность аналогичных неармированных образцов. Наиболее высокий уровень прочности при тех же параметрах армирования (волокна длиной 6 мм) фиксировали и в образцах-цилиндрах, выпиленных из призм (рис. 1б).

Наряду с тем испытания показали, что прочность подобных образцов, армированных полипропиленовыми волокнами длиной 12 и 18 мм с тем же их расходом 1,6 кг/м³ в бетоне, была ниже, чем у неармированных образцов (рис. 1а, в).

Данные испытаний торкрет-фибробетонных призм на изгиб (на растяжение при изгибе) по своему ха-

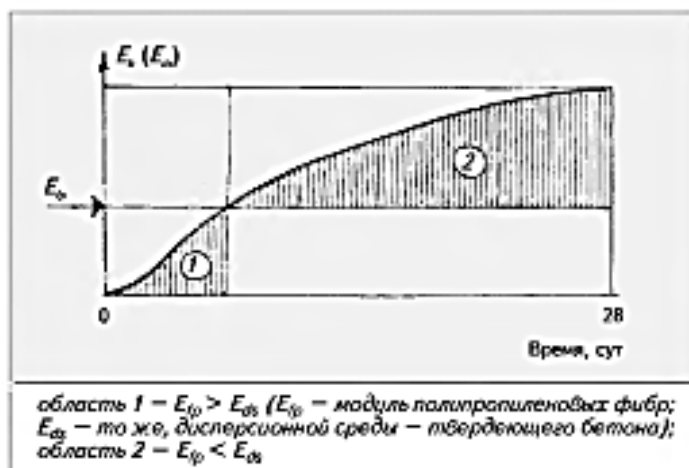


Рис. 2. Условная диаграмма изменения во времени модуля упругости бетона E_b после затворения цемента водой

ктеру соответствовали данным испытаний цилиндров на растяжение при раскалывании, но предельное значение прочности в этом случае отмечали при длине полипропиленовых волокон 12 мм в образцах с тем же расходом волокон 1,6 кг/м³ (рис. 1б).

Представляется важным сопоставить результаты испытаний разных серий образцов (цилиндров) с постоянной длиной содержащихся в них полипропиленовых волокон (в нашем случае $l_f = 6$ мм), но с различным их объемным содержанием в бетонной матрице. В этом случае прочность торкрет-фибробетонных цилиндров на сжатие и растяжение при раскалывании была выше в рассматриваемом диапазоне расхода фибр, чем прочность контрольных неармированных образцов.

При этом пик прочности наблюдался как при сжатии, так и при растяжении при раскалывании (расход полипропиленовых волокон 0,8 кг/м³). Сопротивление образцов при расходе волокон 0,8 кг/м³ выше не только, чем у неармированных образцов на 16 % при сжатии и на 27 % на растяжение при раскалывании, но и в сравнении с теми же образцами при расходе волокон 1,6 кг/м³ (рис. 1б, г).

Таким образом, данные испытаний показывают, что применение полипропиленовых волокон в определенных условиях может обеспечить повышение прочности бетона при его статическом нагружении. Чтобы объяснить причину этого повыше-

ния, по мнению авторов статьи, следует рассмотреть две стадии работы бетона (рис. 2). Первая — период формирования структуры дисперсионной среды до приобретения ею регламентируемых параметров прочности и жесткости. Вторая — бетон способен выполнять функции, предусмотренные проектной документацией.

В первой стадии модуль упругости волокон полипропилена выше до определенного момента, чем модуль деформации твердеющей дисперсионной среды. В этой ситуации подобные волокна способны выполнять функции армирующих компонентов, сдерживая температурно-усадочные деформации бетона и ограничивая появление трещин в его объеме.

Кроме того, волокна с невысоким модулем упругости в первые сроки твердения бетона уменьшают возможность возникновения избыточной концентрации напряжений в объеме твердеющей среды в сравнении с более жесткими включениями. В результате уровень исходной прочности бетона с подобными волокнами может оказаться выше, чем у неармированного бетона. Помимо этого волокна с большой удельной поверхностью (см. таблицу) могут положительно влиять на формирование структуры бетонной матрицы непосредственно в области ее контакта с волокнами.

Известно [2, 5], что качество подобной матрицы (плотность, микротвердость) в контактной области выше, чем качество вне ее. При этом возникновение кристаллического сростка цементного камня в стесненных условиях на границе раздела между матрицей и волокнами может привести также [2] к трансформации конфигурации этого сростка, в том числе к направленной геометрии распределения кристаллов (направленной кристаллизации) в структуре сростка и, как следствие, к возникновению «эффекта самоармирования» бетонной матрицы.

Вместе с тем процессы, протекаю-

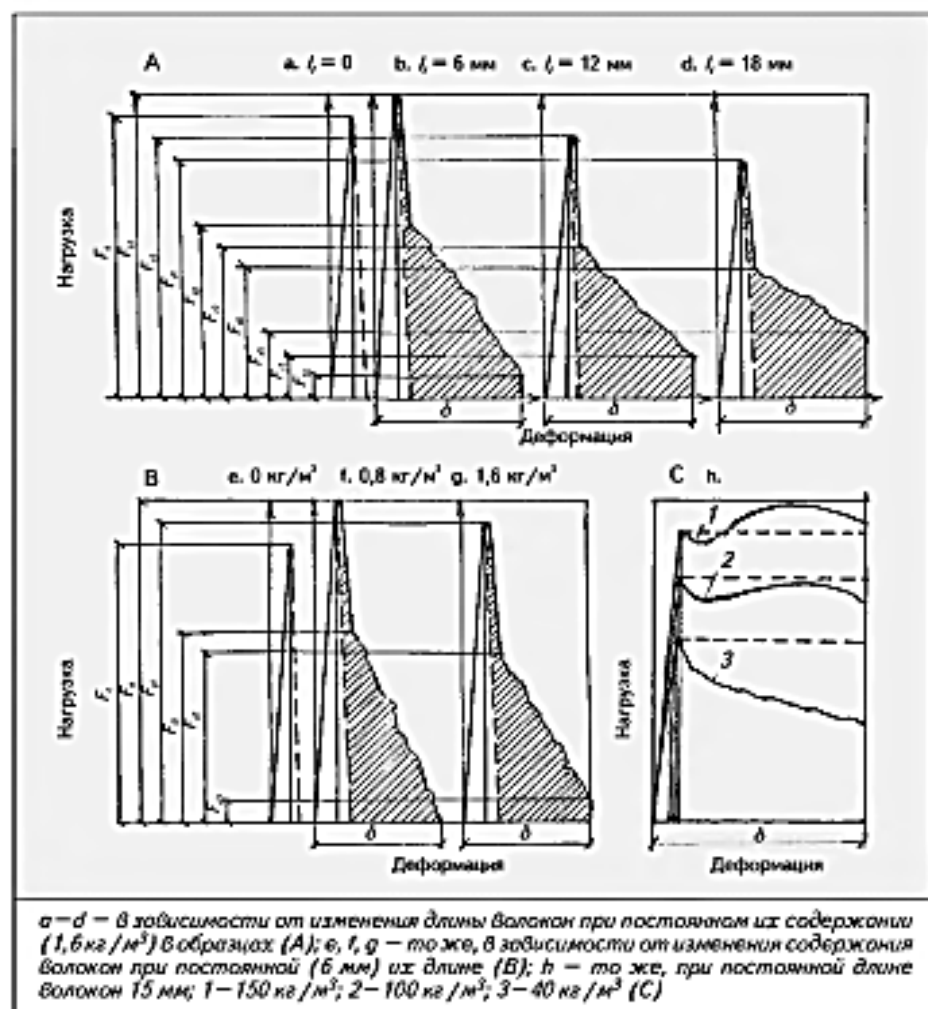


Рис. 3. Обобщенные диаграммы «нагрузка—деформация» растяжения при раскалывании опытных образцов торкрет-фибробетона с дисперсной арматурой из полипропиленовых (А, В) и стальных (С) волокон

щие в бетонной матрице при дисперсном армировании, способны привести также и к снижению ее прочности. Это возможно в случаях, когда при относительно большой длине l_f/d_f и содержании μ_f волокон в объеме бетона возникает неравномерное их распределение и в конечном счете образование клубков волокон. В этой ситуации испытания опытных образцов фибробетона на растяжение и изгиб не покажут увеличения прочности материала.

Указанные закономерности проявляются и при дисперсном армировании бетона стальными фибрами. Однако здесь в отличие от полипропиленовых волокон армирующий эффект¹, создаваемый стальными

волокнами, многократно превышает «эффект самоармирования»² бетона при его статическом нагружении (рис. 1д, е).

Усилие, которое необходимо приложить к образцам бетона, дисперсно армированным полипропиленовыми волокнами, после образования трещины в этих образцах до их полного разрушения связано со стадией деформационного разупрочнения, которую отражает ниспадающая ветвь (рис. 3а—г). Это усилие снижается по мере увеличения деформации образца при его испытании в области закритической нагрузки при постоянной скорости изменения деформации.

Характер этого снижения и соот-

ветственно диаграммы «нагрузка—деформация» в целом и ниспадающей ветви в частности разные и зависят при прочих равных условиях от объемного содержания волокон в матрице и от параметров относительной их длины. Изменяется также площадь под линией диаграммы и соответственно вязкость разрушения дисперсно армированных образцов.

Диапазон конфигураций диаграммы «нагрузка—деформация» для образцов, армированных стальными волокнами более широкий. Стадия работы этих образцов после образования в них трещины может быть связана как с неуклонным снижением воспринимаемой нагрузки (при малом содержании волокон в бетоне), так и ее ростом (в отличие от образцов с полипропиленовыми волокнами) по мере увеличения деформации (рис. 3и).

При этом важное конструктивное значение имеет положение ниспадающей ветви в начале ее возникновения и в конце нормируемого диапазона деформации, фиксируемой в стадии разупрочнения. Это положение, в конечном счете, связано с кинетикой разрыва волокон в сечении с трещиной и их выдергиванием из матрицы, что вызвано взаимодействием, проявляющимся в контактной области.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рабинович Ф. Н. О некоторых особенностях формирования структуры композитов на основе дисперсно армированных бетонов // Пром. и гражд. стр-во. 2007. № 3. С. 53–55; № 4. С. 52–53.
2. Рабинович Ф. Н. Композиты на основе дисперсно армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции. М.: Изд-во АСВ, 2004. 560 с.
3. Руководство по применению торкрет-бетона при возведении, ремонте и восстановлении строительных конструкций зданий и сооружений / ОАО «ЦНИИПромзданий». М., 2007. 31 с.
4. ГОСТ 10180–90. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам.
5. Пухаренко Ю. В. Принципы формирования структуры и прогнозирование прочности фибробетонов // Строит. материалы. 2004. № 10. С. 30–33.

Продолжение следует

¹ Эффект повышения прочности в результате использования волокон, воспринимающих действующее усилие.

² То же, при оптимизации (направленной кристаллизации) структуры бетона в контакте с волокнами.