

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»

Небольшой модуль упругости полипропиленовых волокон (до 8000 МПа) и высокие значения предельных деформаций (10–25 %) повышают вязкость армированного этими волокнами бетона и уровень работы, которую необходимо затратить для его разрушения. Эффект вязкого разрушения проявляется не столько при статическом нагружении, сколько, как известно [1], при динамических (ударных, взрывных) воздействиях, т. е. в ситуациях, когда волокна вследствие весьма кратковременного действия нагрузки не успевают выдернуться из бетонной матрицы.

* Окончание. Начало см. «ПГС», 2009, № 8, С. 28–31.

Механические характеристики образцов бетона, формируемого методом сухого торкретирования, с дисперсным армированием полипропиленовыми волокнами и для сравнения с армированием стальными волокнами-фибрами рассмотрены в [2]. Важное значение также имеют вопросы, оценивающие влияние структуры дисперсного армирования с использованием исследуемых волокон на изменение таких характеристик торкрет-бетона, как водопоглощение, водонепроницаемость, морозостойкость, сопротивление воздействию огня и взрыва.

Уровень водопоглощения и водонепроницаемость образцов торкрет-бетона и торкрет-фибробетона

определяли согласно стандартам соответственно [3, 4 (метод «мокрого пятна»)]. Выпиленные из плит образцы диаметром 150 мм и высотой 130 мм выдерживали под давлением воды 1,4 МПа (давление доводили до максимального уровня ступенями по 0,2 МПа и выдерживали по 16 ч на каждой ступени). После этого их испытывали на раскалывание. По сечению раскола измеряли глубину проникания воды по высоте образца. Данные по морозостойкости образцов диаметром и высотой 70 мм устанавливали по методике ускоренных испытаний согласно [5] путем замораживания образцов в 5 %-ном растворе NaCl до температуры –50 °С и оттаивания в таком же растворе при температуре +20 °С. Контрольные образцы изготавливали в соответствии с требованиями стандартов [6, 7]. Норматив [8] предусматривает изготовление достаточно большого количества образцов при испытаниях на морозостойкость, но в связи с экономическими трудностями в дан-

1. Данные испытаний образцов торкрет-фибробетона на водопоглощение, водонепроницаемость и морозостойкость

Марка образцов	Расход для сухой смеси		Добавки	Вид фибр	Размеры фибр, мм		Расход фибр, кг/м ³	Плотность, г/см ³	Водопоглощение, %	Глубина проникания воды в образцах при давлении 1,4 МПа, см	Условная марка по морозостойкости F	
	цемента, кг/м ³	заполнителей, л			диаметр	длина						
01К	350	1000	Нет	Нет	-	-	-	2,26	1,8	6	-	
1Кр1			Кальмафлекс, 40 кг		-	-	-	2,27	1,2	0,5		
1Кр2			Микрокремнезем, 40 кг		-	-	-	2,25	1	2,5		
1П1	350	1000	Нет	Полипропилен	0,02	6	0,8	2,3	1,8	3	300	
1П2					0,02	6	1,6	2,29	2,2	3		
1П3					0,02	12	1,6	2,25	2,6	6		
1П4					0,02	18	1,6	2,24	3,5	8		
1П5К					Кальмафлекс, 40 кг	0,02	18	1,6	2,27	2,3		5
1П6Кр					Микрокремнезем, 50 кг	0,02	18	1,6	2,25	0,9		3,5
1Ф1	350	1000	Нет	Стальные	0,25	15	40	2,32	1,8	8	600	
1ФКр1			Микрокремнезем, 40 кг		0,25	15	40	2,31	1	1,5		
1Ф2			Нет		0,25	15	100	2,32	2,2	3,5		
1ФКр2			Микрокремнезем, 50 кг		0,25	15	100	2,31	0,7	0,5	800	
1Ф3			Нет		0,25	15	150	2,34	2,1	0,5		
2П3	500	1000	Нет	Полипропилен	0,02	12	1,6	2,24	1,9	3	1000	
2П5к			Кальмафлекс, 40 кг		0,02	18	1,6	2,25	1,2	1,5		

2. Водопоглощение различных видов традиционного бетона в морских сооружениях и в опытных образцах

Пример использования бетона	Цемент, кг/м ³	Заполнитель (фракция, мм)	Добавки	Уплотнение	Водопоглощение, %
<i>В сооружениях</i>					
Нижнетулумская ГЭС, нижний бьеф (Кольский залив)	Пуццолановый, 400	Песчано-гравийная смесь, 5–50	Нет	Вручную	3,5–7,1
Борисоглебская ГЭС (Баренцево море)	Пуццолановый, 350	Гранитный щебень, 35–70	Воздукововлекающая	Электро-вibrаторы 10–12 тыс. кол/мин	2,4–4,9
Кислогубская ПЭС (Баренцево море)	Сульфатостойкий портландцемент, 480	Гранитный щебень 5–10 и 10–20	ССБ, СНВ		0,65–2,1
<i>В опытных образцах</i>					
Торкрет-бетон	Портландцемент, 350	Песчано-гравийная смесь, 5–10	Нет	Под давлением 0,5 МПа	1,8
			Микрокремнезем		1,1–1,2
То же, с полипропиленовыми волокнами			Нет		1,8–3,5
			Кальмафлекс		0,9–2,3
То же, со стальными волокнами			Нет		1,8–2,2
	Микрокремнезем	0,7–1			

ных исследованиях условную марку бетона по морозостойкости определяли по количеству циклов замораживания—оттаивания при визуальном контроле состояния образцов и контроле потери массы в насыщенном состоянии в процессе испытаний. При появлении признаков разрушения бетона и потере массы более 3 % начальной в насыщенном состоянии образцы испытывали на сжатие. За условную марку бетона по морозостойкости принимали марку, соответствующую количеству циклов, при котором не наблюдалось признаков разрушения и потери массы. Марку определяли по табл. 3 [8], по методу ускоренных испытаний.

Данные по водопоглощению, водонепроницаемости и морозостойкости исследуемых образцов приведены в табл. 1.

Введение волокон в торкрет-бетон, как правило, повышает уровень водопоглощения образцов, или при использовании добавки оно сохраняется примерно таким же, как в контрольных неармированных образцах. Понятно, что водопоглоще-

ние бетона есть функция свойств его цементной основы. Увеличение содержания волокон и их длины может изменить в определенных условиях качество этой цементной основы и внести в структуру композита дополнительные поверхности, в том числе и полости, которые станут источником повышения уровня водопоглощения материала.

Вместе с тем данные табл. 1 показывают, что образцы торкрет-бетона и торкрет-фибробетона отличаются в целом весьма низкими (в абсолютном выражении) показателями водопоглощения. Подобные бетоны весьма эффективны для использования в морских сооружениях (берегозащитные конструкции, причалы, волноотбойные стены, конструкции гидростанций). В табл. 2 приведены данные по показателям водопоглощения различных видов бетона в морских сооружениях, эксплуатирующихся в суровых условиях арктического побережья России [9], и в опытных образцах торкрет-бетона и торкрет-фибробетона.

Изменения показателей по водо-

непроницаемости торкрет-бетона и торкрет-фибробетона подчиняются примерно тем же закономерностям, которые фиксировали при измерении уровней водопоглощения. Глубина проникания воды в образцах при заданном давлении 1,4 МПа возрастает по мере увеличения длины полипропиленовых волокон при их одинаковом расходе 1,6 кг/м³ в торкрет-фибробетоне. Вместе с тем уменьшение расхода полипропиленовых волокон до 0,8 кг/м³ при их одинаковой длине 6 мм не изменило показателя, характеризующего глубину проникания воды в образцах. Тем не менее, повышение расхода стальных фибр в торкрет-фибробетоне существенно снизило величину проникания воды в дисперсно-армированный материал. Применение добавок кальмафлекса и микрокремнезема в бетоне дополнительно сокращает глубину проникания воды в его объем, повышая тем самым водонепроницаемость материала. Марка по водонепроницаемости рассматриваемых образцов торкрет-фибробетона достаточно высока W12–W14.

Данные, представленные в табл. 1, показывают также, что образцы торкрет-фибробетона с применением как стальных, так и полипропиленовых волокон, вполне удовлетворительно воспринимают попеременные воздействия низких температур. Кроме того, в условиях оптимизации состава торкрет-фибробетона могут иметь весьма высокую марку по морозостойкости, достигающую F800–F1000.

Как и другие модификации высокопрочных бетонов торкрет-бетон более чувствительный к высоким температурам и тепловому удару, чем бетон с более низким уровнем (менее 50 МПа) прочности. Это связано прежде всего с уменьшенным в объеме высокопрочного бетона количеством мелких по размерам взаимосвязанных пор. В результате этого в порах образуется повышенное давление пара, которое обуславливает возникновение в бетоне силы натяжения. Если эта сила превышает прочность бетона на растяжение, то происходит взрывное отслаивание поверхностных слоев бетона с обнажением арматуры с после-

дующим быстротекающим процессом разрушения. Метод торкретирования, позволяющий получить достаточно плотную структуру бетона, создает предпосылки, при которых такой бетон может иметь более высокий уровень уязвимости к воздействиям огня.

Подобная ситуация проявилась в известных и многократно описанных пожарах, возникших в тоннелях Европы под Ла-Маншем, Монблана и Св. Готарда. В связи с этим уместно отметить данные исследований [10], которые были проведены после пожаров и касались, в частности, изучения влияния дисперсного армирования, в том числе с применением стальных и полимерных волокон, на сопротивление торкрет-фибробетона огневому воздействию. Рассматривались варианты обычного сеточного армирования из стальной проволоки, аналогичного армирования сетками совместно со стальными фибрами, стальными фибрами совместно с тонкими полипропиленовыми волокнами и с использованием грубых полимерных волокон, подобных стальным.

Все варианты, кроме варианта с комбинацией стальных фибр и тонких полипропиленовых волокон, показали в процессе огневых испытаний обширное взрывное откалывание. При этом образец панели с крупными полипропиленовыми волокнами распался на пять частей.

Использование тонких полипропиленовых волокон в торкрет-бетоне при огневых испытаниях привело к раскрытию микротрещин на поверхности раздела между волокнами и матрицей вследствие различающихся характеристик их линейного расширения при нагревании. Возникшие при этом просветы (нельзя забывать о большой поверхности контакта тонких волокон с матрицей [2, табл. 1] и о предпосылках для возникновения соответственно большого числа таких просветов) предоставляют возможность выхода давлению пара в конструкции. В данном случае большое значение имеет кинетика развивающегося пожара. При низкой скорости повышения температуры влага в порах, превращаясь в водяной пар, успеет испариться от горячей поверхности

и энергия этого процесса по отношению к конструкции не достигает критического уровня. Одновременно уменьшается взрывное откалывание при пожаре. При быстром повышении температуры влага не хватает времени уйти от горячей поверхности и возрастающее давление может достигнуть уровня, при котором будет преодолена прочность торкрет-бетона на растяжение.

При одинаковых условиях огневых испытаний* образец панели из торкрет-бетона со стальными и тонкими полипропиленовыми волокнами в течение 2 ч не получил каких-либо серьезных повреждений, вызванных взрывным откалыванием, тогда как в варианте с сеточным армированием куски торкрет-бетона стали отскакивать через несколько минут после начала воздействия огня. Спустя 15 мин испытания прекратили. В других панелях со стальными либо с крупными полипропиленовыми волокнами в процессе испытаний фиксировали обширное взрывное откалывание. По-видимому, эти процессы обуславливаются также различием в количестве волокон разных диаметров в матрице, приходящихся на единицу ее объема. Как видно, использование тонких полипропиленовых волокон совместно со стальными фибрами в качестве армирующих компонентов в торкрет-бетоне может существенно повысить его сопротивление воздействию огня.

Области эффективного применения торкрет-фибробетона с полипропиленовыми волокнами, в том числе в комбинации со стальными фибрами достаточно обширны. Это — полы зданий различного назначения, прежде всего промышленных предприятий; дорожные развязки и аэродромные покрытия; морские сооружения, подвергаемые динамическим воздействиям волн; берегоукрепляющие конструкции и объекты, воспринимающие значительные динамические нагрузки при их транспорте и монтаже; конструкции, к которым предъявляются повышенные требования по обеспечению их сопротивления пожару, и др.

* Скорость повышения температуры в печи составляла 200 °С/мин и увеличилась до 1100 °С за 5 мин, конечная температура 1350 °С поддерживалась в течение 2 ч.

В большинстве случаев рассматриваемые модификации торкрет-фибробетона могут оказаться более эффективными в сравнении с традиционным бетоном со стержневым армированием.

Выводы

1. Выполнен экспериментально-теоретический анализ, связанный с оценкой эффективности применения низко модульных полимерных волокон для дисперсного армирования бетонов.

2. Отмечено, что модуль упругости полимерных волокон ниже, чем модуль упругости рядового бетона. С точки зрения теории эти волокна не способны выполнять роль традиционных армирующих компонентов, поскольку бетон не в состоянии передать на них возникающее усилие, а сами волокна не могут сдерживать деформации бетона при его нагружении. Вместе с тем установлено, что применение рассматриваемых низко модульных, в частности, полипропиленовых волокон в качестве армирующих компонентов, дисперсно распределяемых в объеме бетона при указанном выше методе его формирования, повышает вязкость разрушения бетона и в определенных условиях обеспечивает повышение его прочности на растяжение при раскалывании, сжатии и изгибе.

Представлено объяснение причин данного положения, основывающееся на рассмотрении двух стадий работы бетона. Первая стадия — период формирования структуры дисперсной среды до приобретения ею регламентируемых параметров прочности и жесткости. Вторая стадия — бетон способен выполнять функции, предусмотренные проектной документацией. Показано, что в первой стадии модуль упругости волокон полипропилена выше до определенного момента в сравнении с модулем деформации твердеющей дисперсионной среды. В этой ситуации подобные волокна способны выполнять функции армирующих компонентов, сдерживая температурно-усадочные деформации бетона и ограничивая возникновение трещин в его объеме. При этом в контакте с низко модульными волокнами снижается возможность возникновения

избыточной концентрации напряжений в объеме твердеющей среды в сравнении с более жесткими включениями.

3. Волокна с большой удельной поверхностью могут оказать позитивное влияние на формирование структуры бетонной матрицы непосредственно в области контакта с волокнами. Появляются условия для направленной кристаллизации гидратных новообразований, которые способствуют возникновению «эффекта самоармирования» бетона. Показано, что во второй стадии работы бетона эффект дисперсного армирования, создаваемый обладающими более высоким модулем упругости стальными волокнами, многократно превышает «эффект самоармирования» бетона при его статическом нагружении.

4. Вязкий характер разрушения рассматриваемых бетонов с полипропиленовыми волокнами обуславливает повышение сопротивления получаемых композитов не только к статическим, но прежде всего к ударным, динамическим нагрузкам, к воздействиям взрыва, пожара. Ра-

циональны варианты комбинированного армирования, в частности, полипропиленовыми и стальными фибрами.

5. Использование полипропиленовых волокон для дисперсно-армированных бетонов, формируемых методом торкретирования, создает предпосылки для получения строительных изделий с высокими механическими показателями, характеристиками водонепроницаемости и морозостойкости. Такая продукция может быть успешно внедрена при возведении, реконструкции и ремонте строительных объектов различного функционального назначения, в том числе эксплуатируемых в суровых климатических условиях. Рекомендованы некоторые направления эффективного применения торкрет-полимерфибробетона в комбинации со стальными фибрами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рабинович Ф. Н. Композиты на основе дисперсно-армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции. М.: Изд-во АСВ, 2004. 560 с.
2. Рабинович Ф. Н., Блев С. М. Эффективность применения полимерных фибр для дисперсного армирования бетона // Пром. и гражд. стр-во. 2008. № 8. С. 28–31.
3. ГОСТ 12730.3–78. Бетоны. Метод определения водопоглощения.
4. ГОСТ 12730.5–84*. Бетоны. Методы определения водонепроницаемости.
5. ГОСТ 10060.2–95. Бетоны. Ускоренные методы определения морозостойкости при многократном переменном замораживании, оттаивании.
6. ГОСТ 28570–90. Бетоны. Методы определения прочности по образцам, отобраным из конструкций.
7. ГОСТ 10180–90. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам.
8. ГОСТ 10060.0–95. Бетоны. Методы определения морозостойкости. Общие положения.
9. Усачев И. Н., Розенталь Н. К. Бетон, стойкий в зоне прилива арктического побережья России // Бетон и железобетон. 2008. № 5. С.18–22.
10. Татнал П. С. Огнеупорность торкретбетона: влияние добавления волокон на взрывное откалывание // Торкретбетон. (USA). 2002. С. 15–19. ■