



Толмачев С. Н.



Беличенко Е. А.



Захаров Д. С.

Толмачев С. Н., д.т.н., профессор,

Беличенко Е. А., к.т.н., с.н.с.,

Захаров Д. С., аспирант,

Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

ул. Ярослава Мудрого (Петровского), 25, г. Харьков, 61002

+38(050) 303-68-48, e-mail: tolmach_serg@mail.ru

ПОВЫШЕНИЕ СВОЙСТВ ДОРОЖНЫХ БЕТОНОВ ВВЕДЕНИЕМ ПОЛИПРОПИЛЕНОВОЙ ФИБРЫ

В статье приведен анализ применения армирующих волокон различного вида в технологии строительных материалов. Показано, что полипропиленовая фибра в наибольшей степени подходит для применения в дорожных цементных бетонах. В статье приведены экспериментальные исследования фибробетонов. Эти результаты показали, что применение полипропиленовой фибры приводит к увеличению прочности бетонов на растяжение. Кроме того, использование фибры в бетонах приводит к повышению их морозостойкости, коррозионной стойкости, водонепроницаемости и снижению истираемости.

Ключевые слова: полипропиленовая фибра, фибробетон, истираемость, водонасыщение, морозостойкость, водонепроницаемость, коррозионная стойкость

Постановка проблемы

Известно, что разрушение дорожных цементных бетонов обусловлено возникновением растягивающих напряжений, которые приводят к внутреннему или внешнему трещинообразованию. Поэтому очень важным для технологии таких бетонов является повышение прочности дорожных бетонов на растяжение. В практике исследований контролируемым параметром, чаще всего, является прочность на растяжение при изгибе, как наиболее просто определяемый показатель. Достаточно давно известно, что самым простым (но не самым дешевым) способом повышения прочности бетона на растяжение (в том числе при изгибе) является его армирование металлическими стержнями, проволокой, канатами. Способ хорошо себя зарекомендовал в технологии сборного железобетона, но часто неприменим в технологии монолитного дорожного бетона. Из литературы видно, что еще в начале 20-го столетия в цементные бетоны начали вводить дискретные стальные волокна [1]. Было выдано несколько патентов на сталефибробетон, армированный стальным волокном [2, 3]. Однако, эффективность работы этих волокон была недостаточной по сравнению с железобетоном. Кроме того, волокна быстро корродировали, а это приводило к коррозии цементного камня и бетона. Проблему может создать также ситуация, при которой, в случае, если будет изношен верхний слой дорожного бетона и обнажатся стальные волокна фибры, как защитить колеса транспортных средств.

В середине прошлого века возник новый интерес к применению армированных волокнами цементобетонов. Это было вызвано появлением на рынке природных и синтетических органических и неорганических волокон. К концу прошлого столетия среди них наибольшее применение стали находить волокна на основе асбеста, базальта, полиэтилена, полипропилена, углеродные волокна. Однако, знаний о принципах применения волокон, особенно полипропиленовых, было недостаточно. Не было понятно, как правильно вводить полимерные волокна, в каком количестве, были разнообразные мнения о влиянии волокон на свойства бетонной смеси и бетона.

Анализ проведенных исследований

По данным различных исследователей применение фибры в дисперсно-армированных цементных композициях позволяет выпускать облегченные строительные конструкции с повышенной прочностью, ударной стойкостью. При этом существует различие в полученных результатах влияния фибры на прочностные характеристики бетонов. Некоторые ученые отмечают снижение прочности фибробетонов при сжатии, при ее увеличении на растяжение при изгибе. По другим данным введение полипропиленовой фибры приводит к росту всех прочностных показателей бетона. Отмечается, что повышение ударной прочности фибробетонов снижает риск трещинообразования.

В зависимости от области применения в изделиях используют разную фибру:

- сборные панели, облицовка стен, канализационные трубы, тонкие бетонные покрытия крыш, сухая штукатурка – стекловолокно;
- ячеистые бетоны, огнеупорные материалы, бетонные трубы, взрывоогнестойкие сооружения, фундаменты станков, портовые сооружения, облицовка туннелей – стальные волокна;
- фундаментные сваи, преднапряженные сваи, облицовочные панели, плавучие элементы для проходов и причалов в портах, дорожный бетон, обводнители для подводных труб – полипропиленовые волокна;
- шифер, трубы, плиты, огнеупорные и изоляционные материалы, канализационные трубы, гофрированные и гладкие кровельные листы, облицовки стен – асбестовое волокно;
- гофрированные элементы перекрытий, одинарные и двойные мембранные элементы, корпуса лодок, настилы строительных лесов – углеродные или полиамидные волокна.

Исследователи считают, что волокна вводят в хрупкую структуру цементной матрицы для повышения ударной прочности и вязкости разрушения композитов [4]. Поэтому фибробетон имеет повышенную трещиностойкость, прочность на растяжение, ударную вязкость, пониженный модуль упругости.

Актуальность

Однако, если сведения о сталефибробетонах подтверждаются разными исследователями, то данные о бетонах, армированных полипропиленовой фиброй недостаточны и существенно различны. Например, отсутствует ясность о том, какие должны быть размеры таких волокон, каково их количество, как ввести полипропиленовую фибру в бетонную смесь? Это связано, в первую очередь, с трудностями введения фибр при изготовлении бетонной смеси, так как полимерные фибры склонны к комкованию, что резко снижает качество не только бетонной смеси, но и бетона. Количество вводимой фибры для достижения максимальных результатов также различно: от 1,7 до 5 кг/м³ бетона. Речь идет о фибре зарубежного производства (итальянской, французской, английской). Кроме того, стоимость полимерной фибры зарубежного производства достигает 13 евро/кг, что существенно удорожает себестоимость бетонной смеси. Все это является причиной недостаточного использования полимерных фибр в дорожном фибробетоне.

Поэтому весьма актуальными являются исследования влияния полипропиленовой фибры на свойства бетонной смеси и бетона для дорожного строительства.

Цель работы – исследование свойств бетонных смесей и бетонов с полипропиленовой фиброй.

Основные исследования

В исследованиях применяли гранитный щебень фракций 5-10 и 5-20 мм, а также кварцевые пески с Мкр = 1,21 (очень мелкий) и Мкр = 2,2 (средний). В качестве вяжущего использовали портландцемент ПЦ I-500 производства Балаклейского цемзавода Харьковской области. Добавки: суперпластификатор Muraplast FK-88 и воздухововлекающую добавку Centrament Air 202 фирмы MC-Bauchemie, Германия, а также полипропиленовую фибру с различной длиной волокон производства ООО ПМТС «Спецснаб» г. Днепропетровск.

На первом этапе исследований оптимизировали количество и длину волокон применяемой фибры. Учитывая, что длина этой фибры может колебаться в пределах 50...3 мм (по условиям производства), а также то, что максимальная крупность зерна заполнителя была ограничена 20 мм, была выбрана фибра длиной не более 18 мм, что меньше или равно максимальной крупности частиц. Проведенные предварительные исследования показали, что при большей длине фибры возникают значительные технологические трудности, связанные с

ее равномерным распределением в массиве бетонной смеси. Если вводить удлиненную фибру (24 и более миллиметров) обычным способом, то в смесителе она комкуется и распределяется неравномерно, что было определено визуально. Показатели бетона в этом случае (прочность, истираемость, водопоглощение) значительно отличаются для разных образцов бетона, изготовленных из одной и той же бетонной смеси. При введении фибры с водой затворения возникает сложность с дозированием водных растворов добавок и дозированием воды с фиброй. Поэтому фибру вводили в смесь непосредственно в смеситель вместе с сухими заполнителями для бетонной смеси.

Проведенные исследования показали, что наибольшее повышение прочности раствора и бетона на растяжение при изгибе обеспечивает фибра с длиной волокон 12...18 мм. Количественную оптимизацию расхода фибры проводили на цементно-песчаных растворах состава Ц : П = 1 : 4, поскольку фиброармирование в первую очередь направлено на изменение мезоструктуры бетона, т.е. структуры цементно-песчаного раствора. Критериями оптимизации являлись прочность бетонов на растяжение при изгибе и прочность при сжатии. Результаты экспериментов представлены в таблицах 1-3.

Для цементных растворов, не содержащих крупного заполнителя, введение полипропиленовой фибры в количестве 0,6...1,3 кг/м³ приводит к увеличению их прочности на 13...67 % при сжатии и на 12...35 % на растяжение при изгибе (табл. 1). Наилучшие результаты получены при расходе фибры 1,15 кг/м³. При дальнейшем увеличении расхода фибры прочность растворов снижается.

Введение в растворные смеси фибры длиной 18 мм также приводит к увеличению прочности растворов на 36...73 % при сжатии и на 18...24 % при изгибе (табл. 2). Такое повышение прочности растворов при сжатии противоречит данным ряда исследователей, которые показали, что прочность фибробетонов при сжатии снижается. Для дальнейших исследований был выбран расход фибры на уровне 1 кг/м³ (табл. 3).

Результаты испытаний показывают, что наибольший прирост прочности как при сжатии, так и при изгибе получены при расходе фибры 1 кг на 1 м³ цементобетонной смеси. При этом изменение количественного соотношения между 12 и 18 миллиметровой фиброй приводит к увеличению прочности раствора, но не на растяжение при изгибе, а при сжатии. Наибольшее увеличение прочности происходит при соотношении между фибрами длиной 12 и 18 мм равном 1 : 1.

Таблица 1.

Определение оптимального количества 12 мм фибры в растворах

№ п/п	Расход фибры, кг/м ³	Длина волокна фибры, мм	Количество фибры, кг/м ³	Прочность, кг/см ² 28 суток	
				сжатие	растяжение при изгибе
1	400	12	0	90.4	34
2	400	12	0,6	102.0	38
3	400	12	0,75	124.2	39
4	400	12	0,9	144.0	42
5	400	12	1,15	151.2	46
6	400	12	1,3	142.4	40

Таблица 2.

Определение оптимального количества 18 мм фибры в растворах

№ п/п	Расход фибры, кг/м ³	Длина волокна фибры, мм	Количество фибры, кг/м ³	Прочность, кг/см ² 28 суток	
				сжатие	растяжение при изгибе
1	400	18	0	90.4	34
2	400	18	0,6	123.2	40
3	400	18	0,75	154.8	40
4	400	18	0,9	156.6	42
5	400	18	1,15	141.6	42
6	400	18	1,3	139.7	38

Полученные результаты свидетельствуют о том, что при таком расходе фибры и выбранном соотношении между их длиной прочность раствора возрастает: на растяжение при изгибе – на 23...35 %, на сжатие – на 72...87 %. Такое значительное повышение прочности бетона на сжатие может свидетельствовать о том, что действие этого вида полипропиленовой фибры направлено, в первую очередь, на структурирование раствора. При этом фибра создает армирующий каркас, который воспринимает в первую очередь сжимающие нагрузки.

Аналогичные испытания, проведенные на образцах, изготовленных из бетонной смеси подтвердили, что оптимальным с точки зрения прочности является расход полипропиленовой фибры 1 кг/м³ бетонной смеси (табл. 4). Номинальный состав бетонной смеси по массе 1 : 1,5 : 3.

Из приведенных данных видно, что прочность бетонов с максимальной крупностью заполнителя 20 мм также возрастает. Но если прочность на растяжение при изгибе возрастает на 30 %, что согласуется с результатами испытаний растворов, то прочность на сжатие увеличивается только на 16 %. Такое небольшое (по сравнению с растворами) повышение прочности на сжатие можно объяснить тем, что основную сжимающую нагрузку воспринимает содержащийся в бетоне щебень, который и формирует каркас. Именно этот каркас воспринимает сжимающие нагрузки и тем самым уменьшает положительное влияние микроармирования полимерной фибры.

Также изучали влияние полипропиленовой фибры на истираемость и водопоглощение бетонов, поскольку водопоглощение является косвенной характеристикой долговечности, в частности их морозо- и коррозионной стойкости (табл. 5).

Параллельно были проведены испытания истираемости дорожных бетонов на гранитном щебне аналогичного класса прочности на песках с $M_{кр} = 1,6$. Значения истираемости для таких бетонов:

- в сухом состоянии без фибры – 0,338 г/см²;
- в сухом состоянии с фиброй – 0,271 г/см²;
- в водонасыщенном состоянии без фибры – 0,561 г/см²;
- в водонасыщенном состоянии с фиброй – 0,432 г/см².

Как видно из приведенных данных, введение очень мелкого песка с $M_{кр} = 1,21$ приводит к существенному (на 25 %) росту истираемости бетонов как в сухом, так и в водонасыщенном состоянии по сравнению с бетонами на песках с $M_{кр} = 2,2$. Введение фибры снижает истираемость бетона на всех видах песков. Однако, разница в показателях истираемости для бетонов на очень мелком и на среднем песке сохраняется. Поэтому можно сказать, что применение полипропиленовой фибры уменьшает истираемость бетонов на любых песках на 25...30 %. Водопоглощение бетонов на разных видах песка меньше, чем бетонов без фибры на 15 %.

Контрольные эксперименты проводили на дорожных бетонах, составы которых представлены ниже (табл. 6). Расход цемента во всех составах был одинаков. Составы отличались различным содержанием крупного и мелкого щебня и расходом воды.

Контрольный состав: щебень фр.5-10 мм – 340 кг/м³, щебень фр.5 -20 мм – 965 кг/м³, добавки FK-88 – 2,7 кг/м³, Centrament Air 202 – 0,57 кг/м³.

Состав №1 (кг/м³): щебень фр.5-10 мм – 340 кг/м³, щебень фр.5 -20 мм – 965 кг/м³, добавки FK-88 – 2,7 кг/м³, Centrament Air 202 – 0,57 кг/м³, фибра – 0,9 кг/м³.

Состав №2 (кг/м³): щебень фр.5-10 мм – 510 кг/м³, щебень фр.5 -20 мм – 795 кг/м³, добавки FK-88 – 2,7 кг/м³, Centrament Air 202 – 0,57 кг/м³, фибра – 0,9 кг/м³.

Состав №3 (кг/м³): щебень фр.5-10 мм – 795 кг/м³, щебень фр.5 -20 мм – 510 кг/м³, добавки FK-88 – 2,7 кг/м³, Centrament Air 202 – 0,57 кг/м³, фибра – 0,9 кг/м³.

Исследования показали, что при введении в состав дорожных бетонов комплекса добавок, состоящего из суперпластификатора, воздухововлекающей добавки и полипропиленовой фибры, в бетонах, содержащих увеличенное количество щебня мелкой фракции, происходит снижение прочности при сжатии. Прочность при сжатии не меняется только в случае, если содержание крупного щебня больше, чем мелкого. Это можно объяснить тем, что при правильно выбранном соотношении между фракциями щебня формируется плотный каркас, в котором влияние фибры выражено слабо.

Таблица 3.

Определение оптимального количества смешанной фибры в растворах

№ п/п	Расход цемента, кг/м ³	Количество фибры, кг/м ³ 12мм + 18 мм	Прочность, кг/см ² 28 суток	
			сжатие	растяжение при изгибе
1	400	0	90.4	34
2	400	0,20+0,80	151.6	40
3	400	0,40+0,60	158.4	42
4	400	0,50+0,50	164.3	42
5	400	0,60+0,40	169.0	40
6	400	0,80+0,20	153.3	40

Таблица 4.

Определение оптимального количества смешанной фибры в бетонах

№ п/п	Расход цемента, кг/м ³	Длина волокна фибры, мм	Количество фибры, кг/м ³	Прочность, кг/см ² 28 суток	
				сжатие	растяжение при изгибе
1	400	-	0	485.6	52.2
2	400	12 + 18	0,6	529.9	61.6
3	400	12 + 18	0,75	547.7	63.4
4	400	12 + 18	0,9	562.2	67.8
5	400	12 + 18	1,15	554.1	67.0
6	400	12 + 18	1,3	529.4	63.5

Таблица 5.

Истираемость бетонов на различных песках

№ п/п	Модуль крупности песка	Наличие фибры	Истираемость бетона, г/см ²	
			Водонасыщенный образец	Сухой образец
1	2,2	-	0.331	0.210
2	2,2	+	0.265	0.163
3	1,21	-	0.413	0.261
4	1,21	+	0.332	0.205

Прочность фибробетонов с фиброй 12 мм различной подвижности

Вид бетонной смеси	Состав бетона	Прочность в возрасте 28 суток, МПа	
		при изгибе	при сжатии
Жесткие смеси, Ж=15...20 с фиброй 12 мм	контрольный	6,74	58,4
	состав № 1	7,36	52,8
	состав № 2	7,65	58,0
	состав № 3	6,55	48,2
Подвижные смеси, ОК=3 – 5 см с фиброй 12 мм	контрольный	6,7	44,3
	состав № 1	7,1	41,2
	состав № 2	7,56	44,4
	состав № 3	8,0	43,4

Таблица 7.

Морозостойкость цементных бетонов

№ п/п	Класс (марка) бетона	Количество фибры	Коэффициент морозостойкости бетона после количества циклов замораживания-оттаивания при -50 °С				
			5	10	20	30	37
1	B30 (M400)	–	1,03	0,99	0,91	–	–
2	B30 (M400)	0,9 кг/м ³	1,01	1,03	1,00	0,97	0,96

Таблица 8.

Коррозионная стойкость бетонов

№ п/п	Класс (марка) бетона	Количество фибры	Коррозионная стойкость бетона в 5 %-ном растворе Na ₂ SO ₄ после количества циклов насыщения-высушивания					
			5	10	20	30	40	50
1	B30 (M400)	–	1,01	1,10	1,03	0,93	0,76	–
2	B30 (M400)	0,9 кг/м ³	1,03	1,06	1,03	1,00	0,96	0,90

При нарушении правильного соотношения между щебнями плотность каркаса уменьшается, и введение фибры приводит к снижению прочности бетона при сжатии. Это характерно для бетонов из жестких и из подвижных смесей. Интересно, что для жестких смесей при нарушении правильного соотношения между щебнями снижается также и прочность при изгибе. В подвижных смесях, в которых растворная часть играет более важную роль, чем в жестких, введение фибры приводит к росту прочности бетонов на растяжение при изгибе до 20 %.

Для дорожных и аэродромных бетонов основными являются показатели долговечности. Главные из них – морозостойкость и коррозионная стойкость бетонов.

Введение фибры в бетонную смесь приводит к существенному изменению коэффициента морозостойкости бетонов, который свидетельствует о том, что фибра влияет на поровую структуру бетонов (табл. 7).

Очевидно, что фиброармированные бетоны имеют морозостойкость на одну марку выше, чем бетоны без фибры. Наши дальнейшие исследования показали, что повышение морозостойкости происходит из-за дополнительного воздухововлечения в бетонную смесь, которому способствует полипропиленовая фибра. Данные показывают, что при введении в бетонную смесь полипропиленовой фибры воздуходержание в смеси возрастает с 1,8...2,2 % до 3,8...4,4 %. Это приводит к необходимости уменьшения количества вводимой воздухововлекающей добавки.

Аналогично этому, при введении полипропиленовой фибры в состав бетона значительно увеличивается показатель коррозионной стойкости бетона (табл. 8).

Результаты испытаний показали, что коррозионная стойкость бетонов с полипропиленовой фиброй также значительно выше, чем бетонов без фибры.

Выводы

1. Показано, что среди многообразия фибр, наиболее применяемыми и перспективными, являются полимерные волокна, в частности полипропиленовая фибра. Однако, различие в полученных данных и отсутствие единого мнения в вопросах о ее эффективности, требует дальнейшего исследования ее влияния на свойства бетонов.

2. Установлено, что применение полипропиленовой фибры длиной 12 и 18 мм позволяет повысить прочностные характеристики фиброармированных цементных растворов в 1,2...1,7 раза.

3. Показано, что введение полипропиленовой фибры в бетоны при правильном выборе соотношения между фракциями крупного заполнителя не снижает прочность бетонов при сжатии, и повышает их прочность на растяжение при изгибе на 20 %.

4. Экспериментально установлено, что применение полипропиленовой фибры позволяет снизить водопоглощение бетонов на 15 %, и уменьшить истираемость на 25 %. Морозостойкость и коррозионная стойкость фибробетонов возрастают на одну марку.

Литература:

1. G. M. Graham «Suspension steel concrete», US Patent No. 983, 274, 7 Feb. 1911.
2. A. Kleinlagel «Method for the preparation of a synthetic, machinable iron mass», German Patent No. 388, 959, 18 Jan. 1920.
3. J. C. Scailles «High density mortar», French Patent No. 514, 186, 21 April 1920.
4. D. J. Hannant, «Fibre-Cements and Concretes», Wiley.-Chichester, UK, 1978, 228.