

Б. Г. КЛОЧКО, С. А. БЫЧКОВ, В. В. МОМОТ (ДИИТ),
Д. В. ГОРИДЬКО, В. В. ПУНАГИН (ПГАСиА)

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ГИДРОТЕХНИЧЕСКОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Наведені основні визначення і технологічні принципи одержання композиційних матеріалів, що використовуються в гідротехнічному будівництві. Подані експериментальні дані для сталевібробетону, призначеного для монолітного покриття із заданими властивостями.

Приведены основные определения и технологические принципы получения композиционных материалов, используемых в гидротехническом строительстве. Поданы экспериментальные данные для сталефибробетона, предназначенного для монолитного покрытия с заданными свойствами.

The paper provides main definitions and technological principles of obtaining the composite materials, used in hydro-technical construction. Experimental data have been presented for steel-fiber-concretes, destined for preparation of monolithic coatings with the set properties.

Наука о композиционных материалах (раздел материаловедения) зародилась недавно, на рубеже 70-х годов XX века, и разрабатывалась главным образом для решения проблемы улучшения механических характеристик и стойкости композитов. В этой связи уместно сказать, что современное определение композиционных материалов (КМ) предполагает выполнение следующих условий:

1. Композиция должна представлять собой сочетание хотя бы двух разнородных материалов с четкой границей раздела между фазами.

2. Компоненты композиции образуют ее своим объемным сочетанием.

3. Композиция должна обладать свойствами, которых нет ни у одного из ее компонентов в отдельности.

Существующие композиционные материалы можно разделить на три основных класса, отличающиеся микроструктурой: дисперсно-упрочненные, упрочненные частицами и армированные волокном. Все эти материалы представляют собой матрицу из какого-либо вещества, в которой распределена вторая фаза, предназначенная для улучшения того или иного свойства. В основе разделения трех упомянутых классов композиционных материалов лежат особенности их структуры. Для дисперсно-упрочненных композиций характерной является микроструктура, когда в матрице равномерно распределены частицы размером до 1 мкм в количестве от 1 до 15 об. %. В композициях, упрочненных частицами, размер последних превышает 1 мкм, а содержание – 20...25 об. %. Для структуры армированно-упрочненных композитов характерны значи-

тельная анизодиаметричность армирующих волокон – их диаметр колеблется от долей микрона до десятков микрон, а длина – от микрон до непрерывных волокон практически неограниченной длины при содержании от нескольких процентов до 70...80 об. %. Природа упрочняющего эффекта в КМ связана с использованием двух материалов с различными прочностью и модулем упругости. Если говорить об упрочняющей роли компонентов КМ, то в общем виде этот эффект следует связать с появлением в материале поверхности раздела фаз и пограничных слоев, примыкающих к ней. Более высокие характеристики материала пограничных слоев обеспечивают рост прочностных показателей материала, и именно по этой причине в дисперсно-упрочненных композитах стремятся к использованию тонкодисперсных жестких компонентов, распределенных в матрице. В бетонных композициях, упрочненных частицами, их содержание достигает 25 % и более. В такой системе наиболее высокие показатели реализуются при условии хорошего контакта (сцепления) на поверхности раздела. Вместе с тем возможность химического взаимодействия на поверхности и в пограничном слое, особенно в условиях эксплуатации, нежелательна, так как это может привести к утрате упрочняющего эффекта.

Для достижения максимального упрочняющего эффекта более прочный компонент должен играть роль усиливающей, упрочняющей структуры. Для этого необходимо, чтобы упрочняющие элементы имели достаточную длину, в этом случае прочность сцепления с матрицей достаточно велика, чтобы они могли вы-

полнить свою основную роль арматуры. Совершенно естественно, что в этом случае наиболее выгодной формой использования армирующей фазы является тонкое волокно: известно, что с уменьшением толщины волокон их прочность заметно возрастает. Как и в случае дисперсно-упрочненных систем, в волокно-армированных композитах наиболее высокие прочностные характеристики реализуются при высоком содержании армирующих волокон – до 70 % и более. Теоретически на примере полимерных композиционных материалов было показано, что максимальное содержание армирующей фазы составляет около 88...90 об. %. Однако применение непрерывных волокон неограниченной длины далеко не всегда возможно с точки зрения технологической – много ответственных изделий из-за особенностей геометрии не может быть изготовлено из непрерывных волокон, да и не из всех видов материалов удастся изготовить непрерывные волокна достаточно большой длины. Было показано, что существует определенная критическая длина волокна, ниже которой упрочняющий эффект падает. Эта длина зависит от модуля и прочности матрицы и волокна, величины адгезии на поверхности и приблизительно в 20 раз больше диаметра волокна. Экспериментальная проверка расчетов осложнена невозможностью получения материала с одинаковой длиной волокон и их строгой ориентацией из-за разрушения волокон в процессе изготовления образцов.

Важнейшая проблема создания композиционных материалов – технология получения материала эффективного в гидротехническом строительстве. В зависимости от особенностей свойств матричных материалов разработано значительное число различных технологических приемов, позволяющих изготовить достаточно широкий круг изделий, пригодных для применения при воздействии водной среды. Подробности таких процессов мало освещены в научной и технической литературе, так как являются плодом длительных исследований и стоят очень дорого. Некоторые технологические приемы получения КМ описаны в [1]. Ограниченный круг материалов, разработка которых пока еще не вышла за лабораторные рамки, не позволяет привести сведения о практических путях их получения.

Упрочненные частицами КМ, как правило, изотропные; появление анизотропии может быть связано с вытянутой формой частиц некоторых дисперсных материалов. В связи с рос-

том поверхности раздела в формировании прочностных свойств существенно возрастает роль межфазного взаимодействия. Основной эффект повышения прочности в этих КМ достигается в результате уменьшения способности к пластической деформации относительно более подвижной матрицы, при этом прочность возрастает с уменьшением объемной доли матрицы. Наиболее обширную и разнообразную по своему составу группу составляют КМ, армированные волокнами (например дисперсно-армированные бетоны). Это объясняется тем, что в композитах этого типа удастся реализовать наиболее высокие прочностные и деформативные характеристики, так как именно использование волокон дает наибольший упрочняющий эффект. Для этой группы КМ практическая реализация, несмотря на очень значительные технологические трудности, продвинута наиболее существенно.

К числу наиболее универсальных видов КМ следует отнести армированные волокнами бетоны – они позволяют существенно повысить и прочность, и деформативные свойства. Для эффективного упрочнения волокно должно быть прочнее и жестче цементной матрицы, которая в этом случае передает нагрузку на более прочное волокно. Используемые для этих целей волокна в значительной степени определяют возможные методы получения КМ. Определение их прочностных свойств возможно из уравнения смесей (R_{km} , R_{vol} , R_{km}) соответственно данного композиционного материала, его волокон и матрицы

$$R_{km} = R_{vol}V_{vol} + R_{km}V_{km},$$

где V_{vol} , V_{km} – объемные доли волокон и матрицы.

Однако такая зависимость правомерна для случая непрерывных волокон. В случае коротких волокон имеют место отклонения, даже если средняя длина волокон выше критической (обычно $1/d = 20$). Это связано с недостаточным сцеплением с матрицей, разбросом в длинах волокон, неоднородностью в ориентации волокон. Поэтому даже при $1/d = 400$ не удастся достигнуть прочностных показателей КМ с непрерывными волокнами. Бетоны характеризуются невысокой прочностью при растяжении в сочетании с высоким модулем Юнга и низкой ударной вязкостью. Одной из причин выхода из строя изделий из бетона является растрескивание. Это создает большие трудности при армировании ее волокнами, поскольку

недостаточное удлинение матрицы препятствует передаче нагрузки на волокно. Поэтому волокна должны иметь еще более высокий модуль, чем матрица. Ассортимент таких волокон ограничен, поэтому в этих целях часто используют металлические волокна. Как и предполагалось, сопротивление растяжению растет при этом незначительно, но существенно повышается сопротивление ударным нагрузкам. При этом в зависимости от соотношения коэффициента термического расширения матрицы и волокна возможно управление прочностью [5]. Завод «Стройдеталь» был уполномочен фирмой «NORSA GmbH» провести испытания с целью установить, как влияет дисперсное армирование бетона на его свойства. Проведение комплекса исследований и выбор критериев для испытаний были согласованы с заказчиком. В частности, были предусмотрены испытания по определению:

- абразивной стойкости;
- водонепроницаемости;
- морозостойкости в солевом растворе;
- коэффициента трения при скольжении.

Была изготовлена бетонная плита размером $1 \times 1 \times 0,20$ м. Доставленная готовая бетонная смесь содержала 18 об. % стального скрапа и была уложена в форму с помощью глубинного вибратора. После заглаживания поверхности одна половина плиты была обработана растворимым пленкообразующим составом в соответствии с указаниями инвестора. Отбор образцов из обработанной половины бетонной плиты производили по достижению бетоном возраста 90 дней. Для определения качества использованного бетона были изготовлены дополнительные образцы. Используемый бетон имел следующий состав (табл. 1).

Таблица 1

Состав бетонной смеси

Цемент	328 кг/м ³ , $R_a = 43,4$ МПа
Заполнитель	1920 кг/м ³ , песок + щебень, наибольшая крупность заполнителя 40 мм
Вода	164 кг/м ³
Водоцементное отношение	0,50
Добавка	Пластификатор С-3: 0,5 % от веса цемента

Специально изготовленные для контроля качества бетона образцы были испытаны на прочность при сжатии и растяжении при изгибе, а также на водонепроницаемость в соответствии с DIN 1048 Часть 5 «Методика проведения испытаний бетона, специально изготовленные образцы». Результаты испытаний с результатами по каждому образцу представлены в табл. 2.

Таблица 2

Качество бетона испытываемой плиты

Свойство	Возраст бетона, сут.	Результат
Прочность на сжатие	7	34 МПа
	28	48 МПа
Прочность на растяжение при изгибе	28	14,9 м ²
Глубина проникновения воды	28	4 мм

Абразивная стойкость являлась одной из определяющих характеристик бетона для применения в открытых атмосферных условиях. Для определения абразивной стойкости из бетонной плиты было отобрано 4 керна. Испытание и подготовку образцов проводили в соответствии с DIN 52 108 «Испытание износостойкости шлифовальным диском по Беме». Испытание с помощью шлифовального круга служило мерой стойкости при воздействии трения скольжения, качения и сдвига. При этом для сравнительной оценки были также использованы данные по абразивной стойкости бесшовных полов из цементного раствора. В DIN 18560 «Растворы для полов в строительстве», ч. 1, табл. 8 и ч. 7, табл. 6 приведены предельные значения и классификация. В следующей табл. 3 представлены результаты абразивной стойкости после 4, 8 и 12 периодов испытаний. Нормальный бетон класса по прочности В25 имеет значение коэффициента абразивной стойкости около 18/50 см³. При классе по прочности В35 этот коэффициент равен приблизительно 12/50 см³.

Таблица 3

Потери толщины и объема для бетона, обработанного АФ

Периоды испытаний	Потеря толщины, мм	Потеря объема в см ³ /50 см ³
4	0,3	1,65
8	0,6	3,55
12	1,0	4,86
16	1,4	6,32

Полученный фибробетон с достигнутыми им значениями потери объема относится к классу абразивной стойкости 9 в соответствии с DIN 18 560 ч. 1, табл. 8, в которой указаны требуемые значения для испытаний на качество и при приемке. Сравнение с этими величинами показывает, что полученные результаты испытаний заслуживают самой высокой оценки.

Морозостойкость в солевом растворе

Для определения морозостойкости из бетонной плиты, обработанной АФ, было отобрано 5 кернов диаметром 150 мм. Испытания проводили по CDF-методике в климатической камере с воздушным охлаждением. Протокол испытаний с определенными по каждому образцу потерями материала представлен в приложении.

В DIN 1045 «Бетон и железобетон, состав и приготовление» для достижения высокой стойкости при таянии снега и льда определены требования по составу бетона. Морозостойкость в солевом растворе должна достигаться применением порообразующих воздухововлекающих добавок.

В табл. 4 представлены результаты испытаний фибробетона в зависимости от количества циклов замораживания и оттаивания.

Таблица 4

Потеря массы бетона, обработанного АФ, при замораживании и оттаивании

Число циклов замораживания и оттаивания	Потеря материала в г/м ²
4	54,8
8	85,7
16	138,4
32	197,1

Исходя из основных положений проф. Зетцера (г. Эссен), использовали следующий оценочный критерий: средняя потеря массы в солевом растворе составляет около 1500 г/м². Для бетона, обработанного АФ, после 32 циклов замораживания и оттаивания средняя потеря материала составила всего 197,1 г/м². Поэтому применение порообразующих добавок для достижения морозостойкости в солевых растворах полученного бетона не целесообразно. На фотографиях бетонных поверхностей после завершения испытаний на морозостойкость видно, что поверхность бетона визуально выделяется отсутствием морозного износа.

Предупреждение скольжения. Коэффициент трения скольжения

В зависимости от условий на предприятии предотвращение скольжения для примышленных полов может иметь решающее значение. На основании оценки различной степени опасности скольжения полы делят на определенные группы. Группа R9 соответствует наименьшим и группа R13 наибольшим требованиям по предупреждению скольжения.

Предотвращение скольжения определяли по коэффициенту трения при скольжении. В результате определения сопротивления трению при скольжении для фибробетона и обычного бетона происходит понижение опасности скольжения.

Испытание бетонной плиты в сухом и влажном состоянии проводили в соответствии с DIN51131. Результаты всех испытаний представлены в табл. 5. Чем выше значение коэффициента трения, тем ниже опасность скольжения. Поверхности с коэффициентом > 0,45 можно считать безопасными. Как и ожидалось, на поверхности обычного бетона получены немного более низкие значения коэффициента трения, чем на поверхности фибробетона. При этом влажные поверхности показали более высокие результаты. Как необработанную, так и обработанную АФ поверхности можно считать с точки зрения скольжения безопасными.

Таблица 5

Коэффициент трения скольжения

Коэффициент трения			
Обычный бетон		Фибробетон	
сухой	влажный	сухой	влажный
0,53	0,66	0,75	0,88

Выводы

Приведенные данные полученного фибробетона и других композиционных материалов на различных матрицах свидетельствуют о возможности реализации в них чрезвычайно важных сочетаний важнейших эксплуатационных характеристик – высокой прочности, включая диапазон высоких температур, жаростойкости, усталостной и ударной прочности и др. Поэтому основные усилия исследователей и производителей направлены на разработку эффективных, технологичных и экономичных методов получения армирующих волокон, а также на совершенствование технологических процессов изготовления материалов

и изделий. Успешное решение этих проблем может быть реализовано при разработке дисперсных наполнителей отечественного производства взамен импортных дорогостоящих материалов. Особенно перспективно производство металлической фибры для дисперсно-армированных бетонов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Волоконные композиционные материалы: Пер. с англ. / Под ред. Дж. Уиктна, Э. Скала. – М.: Металлургия, 1978. – 240 с.
2. Современные композиционные материалы: Пер. с англ. / Под ред. Л. Браутмана, Р. Крока. – М.: Мир, 1970. – 672 с.
3. Берлин А. А. Современные полимерные композиционные материалы (ПМК) // Соросовский Образовательный Журнал. – 1995. – № 1. – С. 57–65.
4. Углеродные волокна и углекомпози́ты: Пер. с англ. / Под ред. Э. Фитцера. – М.: Мир, 1988. – 336 с.
5. Справочник по композиционным материалам: В 2 кн.: Пер. с англ. / Под ред. Дж. Любина. – М.: Машиностроение, 1988. – Кн. 1. – 448 с.; Кн. 2. – 584 с.

Поступила в редколлегию 03.12.03.