

Применение дисперсного армирования при строительстве гидротехнических сооружений

Доцент ГОУ СПбГПУ И.А. Войлоков*

Как известно, гидротехническое строительство являлось одной из ведущих отраслей строительного комплекса СССР. Основным конструкционным строительным материалом при возведении водоводов, дамб, мостов и тоннелей, гидроэлектростанций всегда являлся бетон. Несомненно, главные показатели гидротехнического строительства – это долговечность возводимых конструкций, их способность противостоять агрессивному воздействию водной, чаще морской среды. При строительстве сооружений или отдельных их частей, постоянно или периодически омываемых водой, наиболее часто используют гидротехнический бетон. Он является разновидностью тяжелого бетона и характеризуется повышенной водостойкостью, водонепроницаемостью, морозостойкостью, низким тепловыделением.

Бетон – один из самых сложных композиционных материалов, обладающий рядом уникальных свойств [1]. В последнем десятилетии прошлого века были разработаны высококачественные бетоны. Они стали результатом исследований в области синтеза прочности и повышения долговечности строительных композитов на основе более полного использования энергии портландцемента, создания оптимальной микроструктуры цементного камня, упрочнения контактных зон цементного камня и заполнителя за счет направленного применения различного рода химических модификаторов и высокодисперсных силикатных материалов. Важнейшей задачей в области бетонных работ является обеспечение гарантированного качества бетона с однородными свойствами в любом сечении конструкции. Как известно, свойства бетона – это функция многих параметров, среди которых, в первую очередь, проектирование состава, параметры, связанные с твердением цемента и зависящие, в свою очередь, от качества технологического передела. В таком направлении и надо рассматривать организацию каждого из них. Выбор состава бетонной смеси, а следовательно, и состава бетона, зависит не только от изготавливаемой конструкции, но и от условий производства работ. Для подбора состава бетона необходимы сведения не только о качестве материалов, но и о том, какие из них наилучшим образом будут соответствовать техническим требованиям, предъявляемым к материалам для заданной конструкции.

Гидротехнические бетоны, в отличие от бетонов промышленного и гражданского назначения, имеют ряд особенностей [2]. В зависимости от конструкции и размеров сооружений, расположения относительно уровней воды, массивности конструкций и назначаются требования к гидротехническим бетонам по водостойкости, водонепроницаемости, морозоустойчивости, прочности, солестойкости, удобообрабатываемости и снижению тепловыделению.

В литературе [2] дается следующая классификация бетонов.

1. В зависимости от вида вяжущего бетоны разделяют на:

- цементные
- известковые
- гипсовые
- бетоны на органических заполнителях

2. По типу заполнителей бетоны делятся на:

- Особо тяжелые с плотностью больше 2500 кг/м^3 . Для их изготовления применяют портландцемент, пуццолановый портландцемент, шлакопортландцемент, глиноземистый цемент, гипсоглиноземистый расширяющийся цемент. В качестве заполнителей в особо тяжелых бетонах используют материалы с высокой плотностью: магнетит, гематит, барит, металлический скрап. В ряде случаев их изготавливают с применением металлической или пропиленовой фибры.

К заполнителям особо тяжелых бетонов предъявляют следующие дополнительные требования:

- минимальная прочность на сжатие чугунного скрапа – 200 МПа, магнетита – 200 МПа, лимонита или гематита – 35 МПа, барита – 40 МПа (испытания в цилиндрических образцах диаметром 50 мм, высотой 50 мм);
- содержание полуторных окислов в барите – не более 1% массы заполнителей;
- водопоглощение (% по массе) магнетита и барита 1-2, лимонита и гематита 9-10.



- Тяжелые бетоны с плотностью от 1800 до 2400 кг/м³. Изготавливают, как правило, на гранитном заполнителе. Применяются при строительстве гидротехнических сооружений.
- Легкие бетоны с плотностью от 500 до 1800 кг/м³. Они применяются для изготовления стеновых панелей или как утеплительный материал.
- Особо легкие с плотностью 500 кг/м³ (существует бетон с плотностью 10кг/м³).

3. По месту использования и эксплуатации в гидротехнических сооружениях бетон разделяют на три вида.

- Бетон подводный – постоянно находится под водой. Как правило, этот бетон изготавливается на шлакопортландцементе, пуцолановых цементах, портландцементе. Также в него обязательно добавляют пластификаторы.
- Бетон переменного уровня воды – это бетон, подвергаемый наибольшему циклическому воздействию приливов и отливов. Он в обязательном порядке должен удовлетворять требованиям по морозоустойчивости. Готовится на портландцементе и шлакопортландцементе с обязательным применением пластифицирующих добавок.
- Бетон надводный – тот, который находится выше уровня воды. Этот бетон изготавливается на всех видах цемента.

4. В зависимости от массивности конструкций бетоны разделяются на две группы:

- Бетон внешней зоны. В зависимости от назначения конструкции и класса сооружений внешняя зона $t = 1,5 - 3,0$ м.
- Бетон внутренней зоны, к которому предъявляются в основном требования по объемной массе. В особенно массивных конструкциях бетон внутренней зоны может быть заменен отсыпкой с уплотнением грунта или камня. В большинстве случаев бетоны внутренней зоны имеют марку ниже, чем бетон внешней зоны.

Гидротехнические бетоны должны обладать следующими свойствами.

1. Химической стойкостью, то есть бетоны должны противостоять химическим влияниям окружающей среды. С этой целью они изготавливаются на сульфатостойких цементах с применением соответствующих добавок.
2. Водонепроницаемостью, которая характеризуется наибольшим давлением воды на бетон, при котором не наблюдается просачивания ее через образцы соответствующей формы ($d = h = 152$ мм), выдержанных $t = 180$ сут.

По водонепроницаемости бетоны разделяются на 5 марок: W2, W4, W6, W8, W12.

3. Морозоустойчивостью, которая характеризуется наибольшим числом циклов замораживания и оттаивания соответствующих образцов, выдержанных в нормальных условиях в течение 18 суток. При этом после испытаний потеря их прочности должна быть не более 15%. Замораживание должно проходить при $t -15^{\circ}\text{C}$ и ниже на протяжении 4 часов, а оттаивание при $t 5-20^{\circ}\text{C}$ на протяжении 4 часов.

По морозоустойчивости бетоны делят на 6 марок: F50, F100, F150, F200, F250, F300.

Одной из разновидностей тяжелых бетонов является фибробетон – бетон, армированный дисперсными волокнами (фибрами). Такой бетон представляет собой обычную смесь цемента, песка, крупного заполнителя и воды, дополненную определенным количеством стальных или других волокон (фибр). Иногда добавляется пластифицирующая добавка, чтобы улучшить обрабатываемость смеси. Дискретные волокна производятся из различных материалов – от полипропилена до стали, в различных конфигурациях, длинах и поперечных сечениях (см. табл. 1).

Для достижения наибольшей эффективности фибробетона как композита необходим правильный подбор и сочетание компонентов.



Самым эффективным материалом в этом плане, ввиду его относительной стоимости, является стальная арматура. Модуль упругости металла арматуры в 56 раз больше аналогичного показателя бетона, однако из-за того, что арматура достаточно хорошо анкеруется в теле бетона, ее прочность не может быть полностью использована, и вклад арматуры в работу самого материала как до, так и после образования трещин, не является оптимальным.

Если мы используем стальную фибру, то проблема с анкерровкой не стоит вовсе, так как анкернение фибры достаточно высокое. В отличие от проволочной сетки или арматуры, которая устанавливается в одной плоскости, стальная фибра одинаково распространяется по всей бетонной матрице (диспергирует). Стальная фибра выполняет множество функций в зависимости от пропорций, которые могут варьировать в пределах 15–120 кг/м³. Одна из первоначальных функций – уменьшение микро- и макротрещин. Определяя трещины на начальной стадии их появления, стальная фибра препятствует их распространению.

При использовании традиционного стержневого пространственного армирования или проволочной сетки мы сможем предохранить бетон только от образования самых первых усадочных трещин, но не предотвратить их распространение.

Сегодня многие производители имеют и продают компьютерные программы, которые позволяют пересчитывать и применять определённые пропорции фибры для замены арматуры или арматурной сетки.

Одним из основных показателей фибры считается временное сопротивление разрыву, или, как его ещё называют, прочность на растяжение.

Основные свойства и показатели различных видов волокон приведены ниже в табл. 1. В зависимости от вида материала и способа изготовления мы имеем различные значения параметров и, как следствие, различные дозировки и способы применения.

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

В строительстве наибольшее распространение получила стальная фибра. С собой Она представляет собой отрезки стальных волокон специальной формы и длины, в определённых дозировках (от 20 кг/м³) добавляемых в бетонную матрицу для осуществления объёмного армирования.

В результате фибрового армирования создаётся композитный материал – сталефибробетон, обладающий рядом преимуществ перед неармированным бетоном и бетоном с традиционными видами армирования. Повышается:

- прочность на растяжение при изгибе – в 2-3 раза;
- прочность на сжатие – до 10-50 %;
- прочность на осевое растяжение – до 10-40 %;

- ударная прочность – в 8-12 раз;
- сопротивление истираемости – до 2 раз;
- трещиностойкость – в 2-3 раза;
- морозостойкость и водонепроницаемость – не менее чем на класс (что особенно актуально в гидротехнике).

Использование технологии фибрового армирования позволяет существенно снизить время выполнения и трудоёмкость работ за счёт отказа от вязки арматуры и укладки сеток, а в ряде случаев – сэкономить строительные материалы за счёт достижения проектных характеристик при меньшей толщине и/или металлоёмкости конструкций.

В гидротехническом строительстве фибровое волокно может применяться при возведении мостов: как в покрытиях, так и при бетонировании устоев, волноломов и ледоломов. Использование фибры повышает эксплуатационную надёжность, снижает трудоёмкость за счёт частичного или полного отказа от традиционного армирования, улучшает гидроизоляционные свойства. Позволяет армировать труднодоступные участки. Благодаря фибре существенно повышается долговечность и увеличиваются межремонтные интервалы. При литье больших бетонных массивов, таких как причальные стены, за счёт применения фибры резко повышается устойчивость к трещинообразованию, образованию сколов и рытвин, удается получить более ровную поверхность, уменьшить количество швов и стыков, соответственно, существенно сэкономить на ремонте.



При армировании фиброй растёт устойчивость к воздействиям внешней среды и сложным условиям эксплуатации, что особенно актуально при бетонировании зон переменного уровня воды. Понятно, что при определенных условиях изготовление стен не требует тотального армирования с помощью фибры, так как это было бы экономически невыгодно. Поэтому в качестве альтернативы можно рассматривать замену металлического шпунта на фибробетон. Это касается тех элементов гидротехнических сооружений, которые наиболее подвержены серьезным механическим нагрузкам. Это как ранее перечисленные сооружения, так и воронки гидроэлектростанций, сваи и шпунты, трубы водоводов.

Опыт развитых стран, таких как США, Великобритания, Германия, Франция и Австралия [3], убедительно показал технико-экономическую эффективность применения сталефибробетона в различного рода строительных конструкциях. В Северной Америке сталефибробетон широко применяют в дорожном и тоннельном строительстве, при строительстве морских нефтедобывающих платформ и плотин, а также в устройстве полов промышленных зданий, терминалов и т.п. Считается целесообразным применение сталефибробетона в каркасных конструкциях зданий, особенно при возможных сейсмических воздействиях [4].

Проведя анализ литературных данных, можно получить много свидетельств широкого применения монолитного сталефибробетона для временных крепей и сталефиброторкретбетона для обустройства тоннелей и других подземных сооружений, а также для ремонтных работ.

Наиболее интересными примерами применения сталефибробетона в этой области являются: конструкции перегонных тоннелей метрополитена в Осло (Норвегия), крепь гидротехнического тоннеля диаметром 2,34 м в Карсигтоне (Великобритания), тоннель Хеггура и газопроводные тоннели под дном Северного моря (Норвегия), железнодорожные тоннели в Канаде, коллекторные тоннели метрополитена в Гамбурге (ФРГ) и Лионе (Франция), автодорожный тоннель протяженностью 6,63 км на глубине до 1 км Энасан-2 (Япония).

В Австралии одной из основных областей применения сталефибробетона стало устройство покрытий с интенсивным движением людей и транспорта (полы цехов заводов и фабрик, прачечных, дорожные покрытия). При устройстве сталефибробетонных дорожных покрытий с интенсивным движением транспорта не требуется специальных дополнительных покрытий.

Сталефибробетон эффективен при устройстве набрызгбетонной и монолитной отделки тоннелей, берегозащитных и причальных сооружений [3]. Достаточно широко сталефибробетон применяется для выполнения ремонта отделки тоннелей, мостов, плотин, тонкостенных несущих конструкций.

Применение сталефибробетонных лотков для водоснабжения и водоотведения взамен типовых железобетонных позволяет полностью отказаться от использования арматуры, что дает экономию:

приведенных затрат – до 50%, трудоемкости изготовления – в 2 раза, бетона – в 2 раза, стали – до 15% [3]. Применение сталефибробетона в изделиях круглых колодцев (кольцах, плитах покрытий) позволяет снизить расход бетона по сравнению с аналогичными железобетонными конструкциями на 25-30% при примерно равном расходе стали. Стоимость сталефибробетонных конструкций снижается с 11 до 27%, а затраты труда – в среднем на 20%.

По данным НИИЖБ, применение сталефибробетона в безнапорных трубах диаметром 1000 и 1200 мм взамен типовых может дать экономию стали – до 50%, бетона – до 15%, трудоемкости – до 3 чел/час/м³ [3]. Как показали испытания, несущая способность сталефибробетонных труб выше несущей способности типовых железобетонных труб 1,5-2 раза.

Установлено, что использование фибрового армирования в стыковом соединении монолитного железобетонного перекрытия с колонной уменьшает интенсивность образования наклонных трещин и отдаляет появление косых трещин, возникающих от действия перерезывающих сил, при этом достигается и уменьшение трудозатрат арматурных работ.

Установлена эффективность применения сталефибробетона для ремонта поверхности водосливов плотин и напорных тоннелей, индустриальных полов, наружных стен причалов.



Сталебетон в мировой практике занимает значительную долю в общем объеме используемого бетона, для чего налажено серийное производство стальных фибр порядка 350-400 тысяч тонн в год. При этом сталефибробетон не следует считать модификацией обычного бетона, так как это новый материал, обладающий соответствующими качественными и количественными свойствами.

За последние годы сталефибробетон получает все более и более широкое распространение в нашей стране. Несомненно, следующим этапом его развития и дальнейшего применения должно стать его широкое применение в гидротехническом строительстве, поскольку именно за счет применения данного композита мы можем повысить долговечность сооружений и улучшить их эксплуатационные характеристики.

Литература:

1. Себелев И.М., Русин С.П., Гуляев П.А. Получение и применение высокопрочных бетонов для ремонта гидротехнических сооружений // http://www.sibsems.ru/html/beton_details.html
2. Гидротехнические бетоны // <http://www.hidrotechnik.ru/lek2.html>
3. Рахимов Р.З., Фибробетон – строительный материал XXI-го века // Экспозиция. Бетоны и сухие смеси, №26(54). г. Н.Челны, 2008.
4. Волков И.В., Парышев Д.Н., Копырин В.И., Гордеев С. А., Болтанов М. А. Нормативное обеспечение индустриального применения сталефибробетона в строительстве // Строительный эксперт, №5/2007. М., 2007.
5. Войлоков И.А. Дисперсное армирование бетонов // Популярное бетоноведение, №6(20). СПб., 2007.

**Илья Анатольевич Войлоков, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет*

Тел. Моб. +7(921)944-52-99

Эл. почта ilya@voilokov.ru