

ГЛАВНЫЙ «СЕКРЕТ» СТАЛЕФИБРОБЕТОНА

Данная статья является дополненным и переработанным вариантом статьи «Применение сталефибробетона в 1999–2005 гг. Причиной для переработки по словам генерального директора ООО «НПК «ВОЛВЕК ПЛЮС» Ф. И. Вострецова послужила необходимость дополнительного освещения ряда вопросов, возникших в процессе расширяющейся практики применения сталефибробетона в проезжих частях мостов и при устройстве тяжелонагруженных полов промпредприятий, в соответствии с опытом и данными, полученными в результате опроса ряда дорожных организаций, отвечающих за эксплуатацию объектов с применением СФБ-технологий, исследований ряда научных организаций в 2009–2010 гг.

В результате работы с ГИПами «Челябметротранспроекта», Иркутского и Хабаровского ГИПРОДОРНИИ, научно – исследовательских организаций «НИЦ «Мосты» ОАО ЦНИИС, ЮУрГУ, СПбГАСУ, РосДОРНИИ, НИИЖБ, НПП СК «Мост» и др., проектных, ремонтных и эксплуатирующих организаций Челябинска, Хабаровска, Иркутска, Екатеринбурга, Владивостока, Усурийска и т.д., определено, что материал гидроизолирующих слоев проезжих частей мостов должен соответствовать следующим требованиям:

Прочность на сжатие ~ марка бетона B40 –Rb 50МПа.

Прочность на растяжение при изгибе Rbtb 4,5 МПа.

Прочность на осевое растяжение Rbt" 2,5 МПа.

Морозостойкость F 300 min.

Водонепроницаемость W10 min.

Не умаляя достоинств с успехом применявшегося в течение целого десятилетия «базового состава» сталефибробетона (начало использования 2000г) с его усредненными физико-механическими характеристиками (по анализу применения в 2000-2010гг):

Прочность на сжатие Rb – 50 - 56 (28сут.),

На раст. при изгибе Rbtb – 4,5-5,6

На осевое раст. Rbt 2,5

Водонепроницаемость min W12 .

Морозостойкость F300-F450.

Модуль упругости (37x39) x10iМПа;

коэф. Пуассона 0,18-0,20; , необходимо сказать и о появлении и успешном использовании составов сталефибробетона с повышенными физико-механическими характеристиками и с более высокими реологическими свойствами, позволяющими снижать трудоемкость выполнения работ по всему комплексу технологических операций.

Можно, как пример, привести свойства СФБ-смеси с добавками ЦМИД-4 и 70кг фибры

«Челябинка», которые дают возможность подачи СФБ-смеси бетононасосами, т.к. смесь имеет высокую подвижность (ОК 17 см). Кроме этого сталефибробетон быстро набирает проектную прочность и имеет высокие физико-механические характеристики (см Таблицу 1). В таблице приведены данные, полученные при проверке состава в строительной лаборатории подрядчика. В дальнейшем состав подтвердил эти показатели при устройстве проезжей части моста, т.е. в полевых условиях.

Можно было бы продолжить приведение примеров составов СФБ имеющих весьма высокие физико-механические характеристики, но есть вопросы, требующие ответа при рассмотрении следующих фактов:

Лаборатория инженерных исследований армии США проводила работу на военном аэродроме по ВПП, одна из которых была сооружена из обычного бетона, а вторая из фибробетона. Толщина обычного бетона 25,4 см, фибробетона -15,2 см (на 40% меньше). После 700 циклов нагружения (взлетов-посадок) покрытие из обычного бетона практически было выведено из строя, в то время как фибробетонное выдержало 4500 циклов, т.е. долговечность его оказалась в 6,4 раза больше.

В 1972 году в проливе Гумбольда, где высота волн в штормовую погоду достигает 12 метров, были сооружены волнорезы в форме двутавровых балок из фибробетона длиной 4,5 м, массой 42 тонн. Проверка в 1980г показала, что они находятся в хорошем состоянии, тогда как такие же волнорезы, установленные одновременно с ними и изготовленные из традиционного железобетона, разру-

шились.

Гидроизолирующие (из сталефибробетона) слои проезжих частей мостов через Десну и через Днепр, сданных в эксплуатацию соответственно в 1977 г. и 1981 г., по отзывам эксплуатирующих организаций в настоящее время не требуют ремонта, тогда как срок до капитального ремонта рассчитывается обычно до 25 лет.

Прочностные характеристики СФБ выше, чем у матричного, неармированного бетона минимально более чем в 2 раза (растяжение при изгибе, осевое растяжение), это так! Но почему долговечность конструкций из СФБ выросла в первом случае в 6,4 раза, во втором еще больше, по мостам более чем в два раза против традиционно армированного бетона?

Тем более, что в морской воде фибра должна разрушаться не в пример по времени быстрее, чем арматура традиционная (связи между элементарными частицами бетона, скрепленными между собой стальными волоконцами, должны теряться быстрее от коррозии, хотя бы потому, что они в сотни раз меньше по площади поперечного сечения); в сочетании с высокими механическими нагрузками, которым подвергается волнорез, материал конструкции должен разрушаться, по крайней мере, не настолько медленнее по сравнению с традиционно армированным, чем это происходило в указанном случае! В чем же дело?

На наш взгляд, самое большое преимущество сталефибробетона заключается в его гораздо более высокой трещиностойкости по сравнению с традиционно армированным бетоном. Трещиностойкость СФБ, если не ориентироваться на ГОСТ 29167-91, который дает оценку этому качеству только через косвенные характеристики вязкости разрушения, можно оценивать упрощенно, через сравнение значений прочности на растяжение при изгибе, либо при осевом растяжении. Зависимость тут прямая – чем больше прочность на растяжение, тем выше трещиностойкость. Следуя этому постулату, повышения трещиностойкости можно добиться увеличивая прочность цементного камня, связывающего между собой компоненты бетона. Предел повышения прочности бетона наступит при достижении равнопрочности связывающего материала (цементного камня) и материала входящих в бетон компонентов. Композитами такого рода в природе являются гранит, известняк, мрамор и т.д. . Если бы можно было из цельного куска, допустим, гранита, создать мостовую конструкцию, то в ее долговечности можно

Таблица 1

Показатели бетонной смеси	ОК-17,5см Плотность 2345 кг/м ³
Прочность на сж. 3 сут.	49,5 МПа 2395 кг/м ³
Прочность на сж. 7сут.	57,0 МПа 2380 кг/м ³
Прочность на сж. 28 сут	66,6МПа
Прочность на растяжение при изгибе 7 сут	6,4 МПа
Прочность на растяжение при изгибе 28 сут	7,6МПа

было бы не сомневаться в силу высокой прочности материала в целом.

Разумеется, можно добиться такого результата. Сейчас такие добавки, дающие возможность (если не принимать во внимание экономическую и технологическую стороны вопроса) получать бетон с высочайшим классом прочности, есть. Но общеизвестно и то, что композиты бетона не обладают способностью упруго воспринимать деформацию от действующих нагрузок. Необходимо иметь в виду, что трещина, под воздействием нагрузки, если мы принимаем, как исходное условие, полное отсутствие у компонентов бетона упругих свойств (что практически имеет место быть), появляется всегда. Все дело в величине ее раскрытия - составляет ли она микроны или миллиметры, но, при появлении нагрузки, сопровождающейся даже минимальной деформацией, трещина является обязательным следствием ее действия. Поэтому приложение околоразрушающих по величине нагрузок на определенном этапе вызывает появление сначала весьма малой по величине трещины. Это локальное ослабление является необратимым для снижения прочности конструкции в целом, т.к. стороны трещины ничего не связывает. Возникновение повторной нагрузки вызывает развитие трещины, т.к. величины напряжений на концах трещин (в силу концентрации напряжений по линии раздела материала) на порядок выше, чем в этот же момент в сплошном материале (теория трещин Гриффитса). Следовательно, трещина будет развиваться по длине и по ширине до тех пор, пока в данной области не будет компенсирована деформация от данной нагрузки. При таком строении материала это и является причиной дальнейшего роста трещины и разрушения всей конструкции в конечном итоге.

Традиционно армированный бетон противодействует появлению трещин наличием арматурных стержней, связывающих макрообъемы бетона друг с другом. Но в промежутках между стержнями и в зоне, где ослаблено или отсутствует влияние арматуры, трещина, под воздействием нагрузок, раскрывается по вышеописанному принципу. Развитие каждой трещины в макрообъеме бетона продолжается так до момента компенсации деформации в области, подверженной воздействию нагрузки. Сдерживание ее развития происходит через традиционное макроармирование объема бетона, подверженного его влиянию. Появление еще одной трещины в этом же макрообъеме весьма проблематично (разве только появятся дополнительные нагрузки по другим направлениям воздействия), т.к. в остальном сплошном материале напряжения не достигают необходимых для этого значений из-за наличия компенса-

тора в виде первоначально возникшей трещины. Рост первоначально возникшей трещины по всем параметрам обусловлен, как указано выше, наличием концентрации напряжений по концам трещины. Пока нагрузка и вызванная ее действием деформация не превышает определенных, позволяющих арматуре восстанавливать геометрические параметры конструкции после снятия нагрузки, величин, не допуская при этом проникновение в трещину посторонних частиц, конструкция работает в «штатном режиме». Такую трещину можно назвать магистральной.

Повторное приложение нагрузки, даже меньшей по величине, продолжает вызывать рост этой магистральной трещины (наличие трещины в бетоне - это локально ослабленная зона из-за потери связи между частицами бетона по плоскости разделения - следовательно для продолжения развития трещины нужны меньшие нагрузки). Остановить этот процесс нельзя, т.к. материал не может восстанавливать разрушенные между своими макрочастицами связи (нет механизма восстановления). В результате процесс идет только в одну сторону: сначала магистральная трещина раскрывается до величины, когда в нее могут проникать посторонние частицы и вода, затем до появления в критическом сечении сквозной трещины, т.е. до фактически начавшегося разрушения конструкции.

В сталефибробетоне, в силу объемного армирования, на начальном этапе воздействия нагрузки, развитию трещины препятствуют стальные волокна. При фиброармировании, когда в кубический метр бетона вводится, например, 80кг стальных фибр, количество их составляет (для СФБ на базе «Челябинки») около 900 000 шт. При длине активной (межанкерной) части стального волокна 22мм (ФЛА 4-2-35), оно пронизывает в среднем 2-2,5 элементарных (1см³) кубика бетона, связывая их между собой и сдерживая разделение этих кубиков между собой под воздействием нагрузки на данную область конструкции, т.е. препятствуя развитию трещины. Разумеется, это упрощенное описание происходящего процесса, но оно отражает реальное положение дел и дает возможность понять суть процесса.

В начальный момент воздействия нагрузки сопротивление возникновения деформации складывается из сопротивления матричного бетона (за счет внутренних взаимосвязей его компонентов) и начального сопротивления фибровых волокон, обусловленных условиями твердения. Вопрос начальных напряжений фибр, находящихся в бетоне, не изучен, по крайней мере в публикациях нам это не встречалось. Но нам предоставляется, что таковые имеют место

быть, т.к. только этим (наличием явления преднапряжения фибровой арматуры) можно объяснить значительное повышение показателей водонепроницаемости и морозостойкости сталефибробетона против тех же показателей матричного бетона при всех прочих равных условиях технологии изготовления конструкций. Величина преднапряжения, видимо, незначительна, обусловлена повышением температуры твердеющей смеси, вызывающей микроудлинение стальных волокон с последующей фиксацией этого удлинения в затвердевшем бетоне, но эффект от этого (см. выше) имеется. Исключительно важное значение при этом имеет степень анкеровки стальных волокон в бетоне, что влияет, в конечном итоге, на возможность волокон за счет микродеформаций при твердении принять нагрузку микропреднапряжения на себя. А это становится возможным, если анкера разнесены по концам волокон и межанкерная часть имеет прямолинейный характер и, кроме того, эффект анкеровки усиливается, если волокно дополнительно анкеруется по всей своей длине боковыми шероховатостями.

Продолжая тему о деформациях при внешнем воздействии: при дальнейшем росте нагрузки стальные волокна сдерживают раскрытие трещины, передавая нагрузку на соседние элементарные объемы бетона, включая в работу соседние волокна (см. схему 3). Чем больше раскрывается трещина, тем большее сопротивление оказывают этому волокна, попавшие в зону раскрытия - это провоцирует возникновение все новых и новых трещин, за счет чего величина раскрытия каждой из настолько мала, что не позволяет проникать воде и посторонним частицам и позволяет волокнам работать в пределах упругости. После снятия нагрузки, в этом случае, волокна «закрывают» трещину полностью - конструктив принимает свои первоначальные геометрические характеристики.

Количество трещин растет до момента полной компенсации деформаций сталефибробетонной конструкции за счет суммарной величины раскрытия трещин от воздействия приложенных нагрузок. Остановка роста величины раскрытия трещин происходит в момент, когда внешние нагрузки становятся равными по величине силам сопротивления, возникшим при включении в эту работу суммарного сопротивления фибровой арматуры и сил сцепления композитов матричного бетона. Суммарная же величина раскрытия трещин, без потери конструкцией своих исходных геометрических параметров, может расти до момента, когда напряжение растяжения волокон, попавших в зону раскрытых трещин, не достигает

предела текучести.

После достижения волокнами предела текучести, деформации становятся необратимыми, т.е. после снятия нагрузки, конструкция не принимает своей первоначальной формы.

Если рост нагрузок, воздействующих на конструкцию, продолжается и величина напряжений отдельных волокон доходит до предела прочности, конструкция разрушается. Характерно для сталефибробетона то, что временной промежуток между появлением необратимых деформаций и полным разрушением конструкции значительно меньше, чем при традиционном железобетонном армировании, при котором появление сквозных трещин в бетоне под воздействием нагрузки не вызывает мгновенного обрушения из-за наличия прутковой арматуры, которая растягивает процесс во времени. Именно это заставляет рекомендовать не применять в чистом виде сталефибробетон в конструкциях, которые, при своей способности к мгновенному обрушению, могут привести к гораздо большим негативным последствиям, чем это имеет место быть в конструкциях с традиционным армированием, которые обладают способностью разрушаться с некоторым замедлением [5, 6].

Вышеизложенное, на наш взгляд, дает достаточно убедительное объяснение по вопросу появления значительно более высоких показателей надежности и долговечности сталефибробетонных конструкций при динамических нагрузках против традиционно армированных, либо изготовленных из модифицированных бетонов, которые в ряде случаев имеют изначально значительно более высокие показатели прочности.

Решающую роль, повторимся, в данных ситуациях, играет:

- способность СФБ практически мгновенно включать в работу сопротивление возникающим нагрузкам, посредством мелкодисперсной арматуры (фибры), весь объем бетона, максимально снижая уровень напряжений в опасной зоне распределением возникающих сил сопротивления возникающим деформациям по всему объему бетона;
- способность СФБ-конструкций в значительно более широком диапазоне нагрузок восстанавливать геометрические размеры после их исчезновения, без ущерба для дальнейшей работоспособности конструкции ;

Исходя из этого, применение СФБ должно быть, на наш взгляд, сориентировано преимущественно на конструктивы, воспринимающие большей частью динамические нагрузки и требующие повышенной трещиностойкости, морозостойкости, водонепроницаемости.

К таким конструктивам, в частности,

можно отнести защитные пояса опор мостов (сплошная СФБ-рубашка, обкладка контурными СФБ-блоками); проезжие части мостов и путепроводов; волноломы, волнорезы, причальные стенки, береговые укрепления; защитные дамбы от селевых потоков, защитные противолавинные дамбы; водоводные тоннели; укрепления и устройства оснований тяжело нагруженных, с высокой интенсивностью движения, автодорог; взлетно-посадочные полосы аэродромов.

Подтверждением правильности вышеизложенных объяснений служат исследования еще 1965года, проведенные под руководством к.т.н. Васильева Е.Б. по анализу состояния мостов, которые выполнены по ВСН 85-68 с конструкцией проезжей части на основе особо прочных и плотных бетонов без оклеечной гидроизоляции с устройством покрытия, которое служит одновременно выравнивающим слоем, слоем износа и гидроизоляцией[3]. «Начиная с 1955 г. в нашей стране построено много таких мостов. Однако, как показал опыт их эксплуатации, такие покрытия, как правило, недолговечны. Так, из обследованных в 1965 г. 50 мостов, построенных в 1958—1963 гг. без оклеечной гидроизоляции, только 12 мостов находились в хорошем состоянии. Это объясняется тем, что далеко не всегда удается предотвратить образование сквозных трещин в покрытии, которые, в свою очередь, ведут к потере им гидроизолирующих свойств» [3 стр 7]. К сожалению в РФ, в последнее время, руководством большинства проектных и проектных организаций незнакомы с данной монографией и выводы ее не осознаны в полной мере. С одной стороны целый ряд руководителей убеждены совершенно искренне, что получение бетонов с высокими прочностными характеристиками дает возможность применять их без гидроизоляции (в соответствии с ВСН 85-68). Это применение бетонов с добавками семейства ЦМИД и целым рядом других, отечественных и зарубежных, действительно дающих возможность получать очень высокие физико-механические характеристики. Но остается вопрос пластичности бетона, способность после снятия нагрузок восстанавливать изначальные характеристики по водонепроницаемости, морозостойкости, или, говоря по сути, иметь ту же способность по трещиностойкости, что была заложена проектами, возможность самозакрывать трещин после снятия нагрузок с сохранением изначальных прочностных характеристик. Этого свойства ни одна добавка не дает. Но может дать мелкодисперсное армирование бетона, в частности стальным волокном, причем при определенных концентрациях и определенных характеристиках фиброволокон.

Желание «удешевить» устройство проезжей части мостов за счет снижения дозировки фиброволокна нередко приведет руководителей некоторых подрядных организаций к тому, что обеспечить 12-летний гарантийный срок работы проезжих частей мостов им не удастся. Есть надежда только на то, что за период, до возникновения «момента истины», «либо ишак содохнет, либо шах умрет». Подтверждение смотри выше и в работе [3] (речь идет об анализе состояния 50-ти мостов).

Такую же «тенденцию» можно отметить при устройстве «сталефибробетонных» тяжело нагруженных полов на промпредприятиях. Пользуясь недостаточной компетентностью заказчиков, подрядные организации занижают стоимость таких полов уменьшением дозы фибры до 20-25кг/м³, а в отдельных случаях до 15кг/м³. Можно совершенно спокойно в этих случаях «подсказать», что фибру вообще не надо в таких количествах добавлять, так как она ничего не дает, так как не будет в массе бетона мелкодисперсной армирующей сетки, потому что для того, чтобы она была и бетон имел свойства сталефибробетона по трещиностойкости, как главному своему качеству перед обычным бетоном, нужно, чтобы выдерживались дозы соответствующие минимально возможному пределу микроармирования [1,7]. Проблема оценки видов фибр с точки зрения придания определенных физико-механических характеристик сталефибробетонам на их основе требует рассмотрения отдельно, с анализом применяемых в РФ видов фибр.

В настоящее время использование созданных в 2006г «Рекомендации по применению сталефибробетона при строительстве и ремонте искусственных сооружений на автодорогах» (НИЦ Мосты, ОАО ЦНИИ-ИС), охватывающих весь технологический цикл по сталефибробетону от требований к материалам до укладки и ухода за свежееуложенным слоем, своего рода практического пособия по внедрению и использованию сталефибробетона в практике, сыграло свою роль и требует серьезной доработки и дополнений.

Постоянно ведущийся мониторинг, связь с проектными, подрядными организациями, научно-исследовательскими институтами и отдельными учеными позволили подготовить в соответствии с заданием по контракту с ФДА РосАВТОДОРА проект ОДМ «Методические рекомендации по применению сталефибробетона при ремонте мостов», который после введения в действие поможет продвижению прогрессивных сталефибробетонных технологий в строительную практику российских предприятий.