

## Базальтофибробетон. Исторический экскурс

*Доцент ГОУ СПБГПУ И.А. Войлоков\*; С.Ф. Канаев (Ястржембский), США*

*Данный материал стал следствием моей переписки с одним из первых исследователей дисперсного армирования и, в частности, базальтовой фибры господином Ястржембским (Канаевым), ныне проживающим в США. Имя этого человека можно поставить в один ряд с корифеями, легендарными разработчиками этого направления в строительстве Ф.Н. Рабиновичем; И.В. Волковым; В.К. Кравинским; Л.Г. Курбатовым; К.В. Талантовой; Ю.В. Пухаренко; М.Н. Ваучским и другими. Заранее приношу свои извинения, если не упомянул кого-то. Надеюсь, данный материал заинтересует как специалистов, так и просто энтузиастов дисперсного армирования, так как все новое - это хорошо забытое старое...*

В нашей сегодняшней реальности в строительстве применяются материалы как природного происхождения, так и синтетические, созданные человеком для альтернативной замены первых или для значительного улучшения физико-технических характеристик. В свою очередь, их можно разделить на мономатериальные (гомогенные) и композиционные (гетерогенные). Мономатериальные в большинстве случаев являются результатом переработки, осуществленной человеком.

Противоестественность сложившегося подхода подтверждается всё более отягчающейся экологической обстановкой, не только в промышленных зонах, но и вообще по всей земле.

Переработка сырьевых материалов в гомогенные требует постоянно возрастающего расхода энергетических ресурсов, что непосредственно приводит к высвобождению в экосфере огромных энергетических потоков. Таким образом, технологическая деятельность человека неизбежно ведет к глобальному потеплению.

Использование гомогенных материалов создает так же проблемы утилизации отходов, ввиду отсутствия природных механизмов переработки чистых веществ. Конфликт между стремлением разработчиков к увеличению сроков службы изделий и последующей необходимостью затрат колоссальной энергии на их утилизацию после морального устаревания, в рамках мономатериальных изделий неизбежно приводит к тому, что затраты на утилизацию постепенно приближаются к затратам на производство. Просто выбросить такие изделия в природу невозможно, поскольку они для природы противоестественны.

Кроме того, потребности техники сегодняшнего дня уже не удовлетворяются характеристиками существующих гомогенных материалов. Так, для создания термоядерной энергетики необходимы материалы, выдерживающие температуры свыше 2000<sup>0</sup>С. Для реактивной авиации и ракетной техники требуются материалы, имеющие высокую стойкость к газодинамической и кавитационной эрозии. Возведение сооружений на океанском шельфе требует материалов с высокой водонепроницаемостью и морозостойкостью. Этот список можно продолжать. Важнейшим фактором является сочетание характеристик. Так, есть материалы, имеющие высокую прочность, но низкую деформативность, хорошие прочностные характеристики, но низкую морозостойкость. Керамика, например, является хорошим изолятором, но имеет низкую ударную прочность.

Естественным путем развития технологии является использование природных материалов без их разложения. То есть будущее по всем основаниям принадлежит максимально приближенным к природе композиционным материалам.

### Состояние вопроса

Природными композитами являются древесина, все виды каменных материалов, латексы, глиноземы и т.д. Правильно подобранные природные композиты служат столетиями. Так, деревянные конструкции мельничных шлюзов в Англии прослужили более 400 лет. Сваи из лиственницы служат в Сибири по 200 лет.

Искусственные композиционные материалы известны с древности. Тысячелетия в строительстве применяют такой композиционный материал, как саман, и здания, построенные из него, стоят многие столетия. Несомненно, при проектировании материалов необходимо учитывать условия эксплуатации. Например, саман использовался в условиях низкой влажности, что и обеспечило долговечность строений. Керамические изделия исключительно долговечны, но их обломки засоряют окружающую среду.

В технике в настоящее время успешно применяются пластики, армированные стеклянными, углеродными и синтетическими волокнами.

Есть целая гамма привычных для нас материалов, которые являются на самом деле композиционными. Например, древесноволокнистые и древесно-стружечные плиты, асбоцемент и т.д. В качестве инновационного примера можно привести и достаточно новый, но уже хорошо зарекомендовавший себя в США композит на

основе древесной муки и специально подготовленного вяжущего. По своим экологическим параметрам он не уступает древесине, а по долговечности превосходит последнюю в несколько раз.

Реальным путем создания материалов, максимально приближенных к природным, имеющих прогнозируемые свойства и одновременно технологичных является разработка волокнистых композитов.

Таковыми композитами являются дисперсно армированные материалы: фибробетоны, фиброкерамы, фибролаты и т.д.

Фибробетоны являются типичными композиционными материалами с характерными для них особенностями и свойствами. В таких материалах сочетаются, обладающая сравнительно небольшой прочностью при растяжении матрица и, характеризующиеся значительным сопротивлением разрыву и более высоким по сравнению с матрицей модулем упругости волокна, рассредоточенные с направленной или произвольной ориентацией в объеме матрицы.

Впервые идея дисперсного армирования бетона была высказана в 1909 году Некрасовым В.Д., которым были проведены опыты по армированию бетона рубленным канатом. Этот опыт не имел практического применения в строительстве, так как для достижения необходимой прочности требовался больший расход металла, чем при направленном стержневом армировании.

В 1941 году архитектор Буров А. К. высказал идею армирования цемента стеклянными волокнами, однако эта идея также не была осуществлена из-за технологических трудностей.

Планомерные научные разработки в области создания нового строительного материала — фибробетона — были начаты в СССР и за рубежом в 60-е гг. XX века.

### *Разработка композитов. Исходные положения*

Основной задачей при разработке волокнистых композитов является выбор волокна для армирования.

Требования к волокну определяются следующими условиями.

- стойкость к материалу матрицы;
- прочность на растяжение;
- образование химических связей с материалом матрицы;
- технологичность при приготовлении смеси;
- удобство формования;
- эффективность твердения;
- распространенность материала волокна;
- доступность технологии получения волокна.

Вторым вопросом является выбор матрицы.

Требования к матрице определяются следующими условиями:

- распространенность материала матрицы;
- технологичность при приготовлении смеси;
- нормируемая активность материала матрицы к волокну;
- стабильные характеристики материала матрицы.

На основе приведенных требований в СССР с 1979 года проводились работы по созданию целой гаммы базальтоволокнистых композитов.

Работы проводились непосредственно С. Ястржембским в научно-исследовательских, проектных, проектно-технологических институтах. Все разработки выполнены на базе ноу-хау, держателем которых является разработчик.

### *Базальтофибробетон. Вводная информация и термины*

**Фибробетон** — композиционный материал на основе гидравлического вяжущего, в которое интегрированы различного рода волокна (фибры).

Гидравлическое вяжущее — портландцемент, глиноземистый цемент, напрягающий цемент, гипс и иные материалы, твердеющие при затворении водой с образованием камня.

**Фиброарматура** — моноволокна, нити, пряжи, холст и иные волокнистые изделия, предназначенные для введения в бетон в качестве арматуры.

**Дисперсная фиброарматура** — фиброарматура конечной длины, равномерно распределенная при приготовлении композита.

Войлоков И.А., Канаев С.Ф. Базальтофибробетон. Исторический экскурс

**Грубое базальтовое волокно** – изделие, получаемое из базальтового расплава фильерным методом, диаметром 150-500 мкм.

**Базальтофибробетон (БФБ)** – композиционный материал на основе гидравлического вяжущего с мелкозернистым наполнителем (матрицы), дисперсно-армированной грубым базальтовым волокном.

### Этапы работы

В период с 1980 по 1981 год была проведена работа по определению оптимальных технологических режимов перемешивания, укладки и твердения базальтофибробетона (БФБ), получены зависимости конечной прочности материала на растяжение от фиброцементного отношения в возрасте 7, 28 и 180 суток; определены деформационные характеристики; проведены микроструктурные исследования.

На основании экспериментального материала разработана методика подбора состава БФБ. Данная методика опирается на корреляционные связи между фиброцементным отношением и прочностью БФБ на осевое растяжение.

Исследования более чем 2500 образцов позволили выявить указанную зависимость и представить ее в виде номограммы. Работоспособность методики подтверждена неоднократными испытаниями. Основные технические характеристики БФБ, установленные в работе, приведены в таблице 1.

**Таблица 1. Основные технические характеристики БФБ, установленные в работе**

Наименование показателей	Единица измерения	Минимум	Максимум
Плотность	кг/м <sup>3</sup>	2720	2775
Объемная масса	кг/м <sup>3</sup>	1750	2120
Пористость	%	21,0	35,9
Открытая пористость		0,019	0,11
Морозостойкость	Цикл	200	500
Теплопроводность	Вт/м <sup>0</sup> С	0,8	1,0
Предел прочности при сжатии (призменная прочность)	МПа	22,0	52,0
Предел прочности при изгибе (растяжение)	МПа	4,5	20,0
Предел прочности при растяжении (осевое)	МПа	3,0%	15,0
Модуль упругости при растяжении	ГПа	18,0	28,5
Коэффициент Пуассона	ГПа	0,13	0,23
Ударная прочность	Кдж/м <sup>2</sup>	8,0	19,0

В 1981 году был выпущен отчет, он прошел рецензирование в ЦНИИ Промзданий и получил положительное заключение.

В период с 1982 по 1984 год были проведены следующие работы: продолжены испытания прочностных характеристик БФБ; проведена проверка соответствия методики подбора составов при изменении вяжущего и введении добавок. В качестве вяжущего применялся портландцемент, в качестве добавки бутадиен-стирольный латекс СКС-65 ГП марки Б. Установлены зависимости между прочностью материала на осевое растяжение и прочностью при изгибе; установлено оптимальное содержание латекса в смеси; выявлены технологические параметры смеси при введении бутадиен-стирольного латекса.

Непосредственно в 1983 году были детально изучены возможности применения технологии торкретирования с помощью БФБ, приготовления сухих смесей; измерены длины и диаметры волокон на различных стадиях обработки смеси; определены зависимости  $l/d$  волокна от характеристик смеси. Также подтверждена необходимость предварительного увлажнения песка при приготовлении смеси; подтвердилась возможность подачи смеси по гибкому шлангу или бетоноводу бетононасоса; установлена необходимость снижения диаметра волокон при подаче по шлангам и бетоноводам.

На основании результатов экспериментальных исследований была выведена эмпирическая формула зависимости  $l/d$  от диаметра волокна и реологических свойств смеси.

Также были изготовлены масштабные модели обделки гидротехнических водоводов  $d=2,5$  м (1:3) и проведены их стандартные испытания на стенде. Результаты испытаний показали, что прочностные характеристики торкретфибробетонной конструкции тоннельной обделки соответствуют установленным расчетным показателям, то есть выдерживают нагрузку, на которую испытываются железобетонные конструкции, причем низкое водопоглощение (в среднем 2,49% по объему) и низкая открытая пористость (в среднем 0,031%) позволяют применять БФБ в конструкциях, работающих под давлением до  $5 \text{ кг/см}^2$  без дополнительной гидроизоляции. По результатам испытаний также был выпущен отчет (1983 г.)

### Промышленное внедрение и испытания

При внедрении в промышленность наиболее эффективно БФБ показал себя именно в горняцком деле. В феврале 1982 года Торезский завод железобетонной шахтной крепи начал производить опытно-промышленный выпуск затяжек шахтной крепи и шпал широкой колеи.

Расчет состава БФБ производился по методике, разработанной на основании экспериментальных исследований, изготовление - по технологии, разработанной в лабораторных условиях.

Затяжки шахтной крепи были установлены в реальные условия эксплуатации на шахте. Замечаний по качеству не поступило. Испытания шпал производились в Донецком филиале ПромтрансНИИПроекта. Шпалы испытывались на статические и динамические нагрузки от подвижного состава. Проведенные опытно-технологические работы подтвердили правильность выбранной технологии и соответствие расчета фактическим показателям изделий.

Изготовленные из БФБ шпалы были уложены на рабочем участке промышленных путей на НПО Тулачермет (г. Тула), в зоне прохождения металлургических ковшей. Одновременно проведены натурные испытания участка пути 50 м с примыканием к стрелочному переводу и участку с деревянными шпалами. Были сделаны тензометрические замеры, определены динамические характеристики путевой конструкции с базальтофибробетонными шпалами. Благодаря проведенным длительным наблюдениям (2 года) за работой рельсошпальной решетки была установлена возможность применения базальтофибробетонных шпал вместо преднапряженных железобетонных в путевых конструкциях с погонными нагрузками 380 кН на 1 метр пути и динамическими нагрузками от оси подвижного состава до 560 кН. Вышеозначенные шпалы находились в эксплуатации более 5 лет. Выполненная работа оформлена актом изготовления и испытания конструкций от марта 1982 г.

В 1983 г. на Ивантеевском ЗЖБИ было осуществлено опытно-промышленное изготовление элеваторных элементов типа СП. Расчет составов производился по разработанной методике. Элементы изготавливались на действующем производстве с использованием штатной бортоснастки и промышленного оборудования. Испытания элементов производились в институте ЦНИИЭПсельстрой по стандартной методике, они показали, что расчетная несущая способность элементов соответствует фактической. В данном расчете был принят изгибающий момент по серии 3.702-1.79 вып. 1 (ЦНИИПромзернопроект), равный 2,25 тс. м с коэффициентом безопасности 1,2, что соответствует фактическому предельному изгибающему моменту, полученному при испытаниях и равному 2,62 тс. м.

Дальнейшие опытно-промышленные работы по отработке конструкций из БФБ производились с 1983 по 1986 год. За время проведения работ были проведены опытно-промышленные формовки и испытания конструкций.

В 1983 На Калининском ЭДСК были изготовлены плиты перекрытия ТП.

На Броварской ОЭЗ СК в 1984 г. были изготовлены перемычки рядовые брусковые 1ПР38-15.12.22у. Перемычки были испытаны в заводской лаборатории и показали соответствие расчетной несущей способности фактической. Разрушающая нагрузка в возрасте 24 часов (сразу после пропарки) составила от 2500 до 2125 кг, что соответствует от 100% до 85% несущей способности, установленной по сер. 1.138-10, вып. 1. В возрасте 28 суток указанная несущая способность составила 130% и 100% соответственно.

В том же году на Коростышевском ЗЖБИ были изготовлены:

- плиты ленточных фундаментов ФЛ 14-24-2;
- перемычные блоки СБ-12.26.2;
- плиты перекрытия ПК-54.15.

По результатам испытаний плит перекрытий было установлено, что формообразование многопустотных плит возможно традиционными

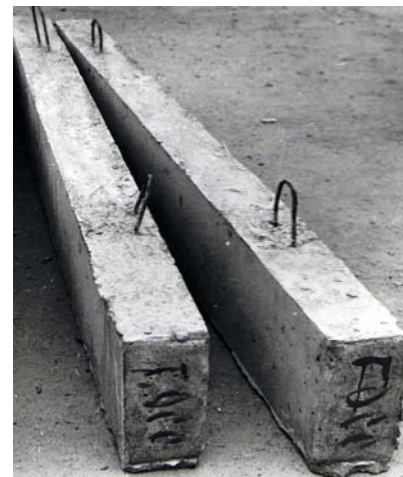


Рисунок 1. Базальтобетонная перемычка



методами, и что для организации производства таких изделий необходимо продолжить отработку технологии их изготовления, а составы назначать по расчету. Несущая способность плит в возрасте 5 суток составила 56% от проектной, что подтвердило возможность и при существующей технологии сэкономить до 40% рабочей арматуры в таких изделиях.

**Сваи.** Изготовление пирамидальных свай длиной 2,5 м. было осуществлено в 1985 году на Емельяновском ЗЖБИ. 28.11.1985 Днепропетровским территориальным отделом были произведены динамические испытания свай. Они показали, что до момента образования трещины угла головы сваи несущая способность свай составила 36 тонн. Сваи забивались в грунт, промерзший на глубину до 10-15 см. По результатам этих испытаний была проведена корректировка технических условий на сваи и утверждены ТУ на опытную партию ТУ 69 331-86.

Там же на основании уже разработанных ТУ в 1986 году было осуществлено изготовление опытной партии конструкций.

В мае 1986 г. На Емельяновском ЗЖБИ не был завершен монтаж полигона по выпуску БФБ конструкций, проект которого был разработан институтом Укргипросельстройиндустрия (шифр проекта 1096/1). Поэтому изготовление опытной партии осуществлялось на бетоносмесителе, установленном временно непосредственно на полигоне. Дозировка составляющих в связи с этим производилась вручную. Был выполнен расчет и подбор составов БФБ отдельно для каждой конструкции.

Всего было изготовлено: пирамидальных свай СПР-2 – 12 шт.; забивных фундаментных блоков ЗБ-9 – 10 шт.; плит ленточных фундаментов – 5 шт.; свай призматических – 4 шт.

Назначенные составы при испытаниях образцов, отобранных из рабочей смеси при изготовлении конструкций в лаборатории завода, показали соответствие фактических характеристик расчетным. Подробное описание процесса изготовления и результатов испытаний сопутствующих образцов было изложено в утвержденном паспорте изделий. Приемочные испытания проводились комиссией Госстроя СССР в поселке Марьино под Москвой по методике треста Мосстрой-5. К приемочным испытаниям были предъявлены сваи СПР-2 и блоки ЗБ-9. Конструкции транспортировались с Емельяновского ЗЖБИ автотранспортом на расстояние 1100 км. Благодаря дисперсному армированию доставленные изделия повреждений не имели. Результаты испытаний приведены в акте и протоколе приемочных испытаний от 11.11.1987.

### **Выводы и предложения**

*Во всех вышеперечисленных случаях БФБ обеспечивал полное исключение металлического армирования в строительных изделиях.*

В связи с перестройкой на момент приостановления работ в 1987 году, а также ввиду отсутствия финансирования программа была свернута. Но было сделано многое:

- отработаны составы и технология изготовления изделий;
- отработана и апробирована в производственных условиях технология получения кондиционного базальтового волокна;
- отработана и апробирована в производственных условиях методика расчета и назначения составов БФБ;
- разработаны и утверждены ТУ на опытную партию пирамидальных свай и забивных фундаментных блоков;
- изготовлены в производственных условиях и представлены на приемочные испытания реальные конструкции из БФБ;
- оформлены и утверждены Госстроем СССР акты и протоколы приемочных испытаний конструкций;
- разработаны и подготовлены к утверждению Госстроя СССР постоянные технические условия на «Базальтофибробетон», «Смеси базальтофибробетонные», 12 типов конструкций из базальтофибробетона;
- разработаны Временные строительные нормы «Проектирование, изготовление и применение конструкций и изделий из базальтофибробетона»;
- приняты для массового производства конструкции пирамидальных свай и забивных фундаментных блоков из БФБ и подготовлены к приемке еще 10 конструкций.

По технологии и оборудованию были сделаны также серьезные шаги. Изготовление всех конструкций в период с 1982 по 1986 г. осуществлялось на действующем производстве. Приготовление смеси осуществлялось на принудительных смесителях марок СБ-93, СБ-138, СБ-80, СБ-135 и т.п. Разработано и реализовано на Емельяновском ЗЖБИ решение полигонного производства БФБ изделий на базе узла МА-500/1. Также был разработан интегратор для подачи волокна в смеситель.

Благодаря упрощенной схеме подачи волокна удалось без значительных переделок наладить производство БФБ изделий на полигоне Емельяновского ЗЖБИ. Существующий полигон Емельяновского ЗЖБИ был рассчитан на производство 6000 м<sup>3</sup> БФБ конструкций в год, был полностью обеспечен оборудованием и мог быть запущен после установки транспортера подачи волокна в рабочий режим. Все работы по дооборудованию полигона Емельяновского ЗЖБИ под промышленный выпуск конструкций были проведены за 4,5 месяца.

### Перспективы

Все вышеперечисленные материалы исследований и испытаний в полном объеме находятся в распоряжении разработчика, господина Ястржембского, он также владеет технологическими ноу-хау. В РФ также велась и ведется работа по БФБ. Вопрос организации производства изделий из БФБ по методике Ястржембского может быть решен в течение года на базе любого производства строительных конструкций, при наличии интереса, финансирования и испытательного оборудования для контроля качества изделий.

Состояние разработки позволяет сделать вывод, что применение базальтофибробетона в дорожном строительстве позволит создать практически вечное податливое дорожное покрытие без температурных швов. Такое покрытие может укладываться на любых грунтах на песчаное основание непрерывным способом с использованием широкозахватных укладочных машин. Базальтофибробетонное покрытие не требует укладки асфальтобетона, асфальта или иных дополнительных покрытий. Высокое сцепление с колесом обеспечивается за счет фактурной поверхности, образуемой волокнами. Уникальная морозостойкость, низкий коэффициент температурной деформации и водонепроницаемости обеспечивают высокую атмосферостойчивость, а высокая деформативность и ударная прочность позволяет получить высокую конструкционную долговечность.

Также базальтофибробетон эффективен и в аэродромном строительстве. При этом отсутствие необходимости в температурных швах резко снижает динамические нагрузки на шасси самолетов. В нашей стране данные работы были проведены ГОУ «Военный инженерно-технический университет» (ГОУ ВИТУ), их результаты были с успехом использованы на ряде закрытых военных объектов.

Дисперсное армирование, и в частности базальтофибробетон, эффективно для любых типов гидротехнических сооружений, в том числе и с интенсивным потоком, поскольку имеет высокую кавитационную стойкость и водонепроницаемость. Защитные дамбы из базальтофибробетона гарантируют от затопления зоны, опасные с точки зрения цунами и наводнений. Он не разрушается от воздействия морской воды и волн. С применением хаотичного армирования резко повышается качество поверхности, а как следствие, долговечность всей конструкции в целом.

Пирамидальные сваи могут применяться в малоэтажном строительстве для зон сезонного затопления. Базальтофибробетон, как и простой бетон, может производиться на мобильных смесительных узлах. Не существует никаких проблем и препятствий для проектирования мобильных установок по производству базальтового волокна. То есть можно привозить на строительную площадку весь комплекс машин и производить материал на месте. Подвозится только цемент, инертный и базальтовый гравий, который можно добывать в любой точке мира. После завершения строительства комплекс просто перевозится на новое место. Появляется возможность строить в малонаселенных в настоящее время районах. Базальтофибробетон может позволить при широком внедрении сэкономить до 2 млн. тонн высококачественной арматурной стали в год. В перспективе реальна разработка установок по производству базальтового волокна из магмы действующих вулканов. В целом базальтофибробетон пригоден для применения во всех областях строительства в качестве эффективной замены железобетону.

### Литература

1. Рабинович Ф.Н. Композиты на основе дисперсно-армированных бетонов. М., 2004.
2. Скобинская А.А., Бамбура А.Н., Ватагин С.С., Костиков В.С., Катцур Ю.А. Инструкция по технологии изготовления строительных конструкций из дисперсно армированного базальтофибробетона / НИИСК. Киев, 1992.
3. Пащенко А. А. Армирование неорганических вяжущих веществ минеральными волокнами. Наука строительному производству. М., 1988.
4. Петраков Б. И., Самодуров В. Н., Виксин И. Э. Композиционный материал базальтофибробетон // Военно-строительный бюллетень, № 2. М., 1990.

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

*Тел. моб.: +7(921)944-52-99; эл. почта: ilya@voilokov.ru*