

## Применение высокопрочных текстильных материалов в строительстве

*К.т.н., с.н.с. ГОУ СПГУТД О.Н. Столяров\*, к.т.н., доцент ГОУ СПбГПУ А.С. Горшков*

Текстильная промышленность производит различные высокопрочные и высокомодульные полотна, используемые в строительстве как альтернатива традиционным строительным материалам. В строительных конструкциях уже более 100 лет в качестве арматуры для бетона используются стальные элементы, при этом сталь в железобетонных конструкциях воспринимает главным образом растягивающие нагрузки, а бетон — сжимающие. Железобетонные конструкции являются самыми распространенным материалом современной строительной индустрии. Наряду с целым рядом важных положительных свойств, их масса весьма велика, а применяемая металлическая арматура ограничивает размеры и форму выпускаемых изделий. Кроме того, стальная арматура подвержена коррозии. В армированных бетонных конструкциях существуют тонкие трещины, которые допускают проникновение воды и других химически активных веществ в области бетонной матрицы, находящиеся в контакте с армирующими элементами, вызывая, таким образом, коррозию арматуры, что в свою очередь может вызвать разрушение бетона.



**Рисунок 1. Структурная иерархия текстильных материалов**

Одним из путей повышения надежности и долговечности, а также существенного снижения нагрузок от собственного веса при использовании бетонных конструкций является применение текстильных материалов для армирования различных строительных конструкций. Текстильные материалы, используемые для армирования бетона, включают различные структурные уровни: волокно, нить, полотно (рис. 1). Во многих случаях металлический каркас может быть с успехом заменен текстилем. Более того, современные тенденции в производстве конструкционных материалов, армированных текстилем, заключаются в расширении области их применения, — от второстепенных, не несущих нагрузки элементов к первостепенным несущим конструкционным элементам.

В строительных работах часто возникает необходимость создания легких конструкций, таких как арки, перекрытия входов, навесы, козырьки, карнизы, и ряда декоративных элементов — бордюров, рельефов и т.п. Конструкционные композиты на текстильной основе становятся передовым строительным материалом, особенно подходящим для разнообразных легковесных строительных конструкций. Основная область их применения находится там, где применение стальной арматуры ограничено. Данные бетонные композиты могут изготавливаться с толщиной от 10 мм, что не всегда может быть достигнуто с использованием стандартной стальной арматуры. Более того, из-за исключительно выгодного соотношения веса и прочности данные структуры могут быть весьма полезными при производстве тонкостенных строительных конструкций, реставрации различных архитектурных элементов, при усилении и армировании стен старых зданий, а также при изготовлении и реставрационном восстановлении различных фасадных элементов.

Текстильно-армированные материалы могут быть также использованы для противостояния разрушающему воздействию влаги в бетонных настилах, парапетах, стенках, бордюрах. Другими примерами использования могут служить области, где необходима высокая коррозионная стойкость и низкая электропроводность. Использование текстильных материалов при армировании бетонов может улучшить прочность при растяжении и повысить его вязкость. Механические свойства армированного бетона зависят от свойств армирующих текстильных материалов, таких как прочность, удлинение при разрыве, модуль упругости, геометрия (длина, диаметр, форма), объемная доля волокон, адгезия к бетонной матрице и т.д. Основные преимущества текстильно-армированного бетона состоят в следующем:

- отсутствие коррозии;
- более тонкие и легкие конструкции;
- возможность создания сложных форм за счет превосходной драпируемости;
- легкость при обращении с полотнами;
- увеличенная долговечность конструкции.

Использование текстиля в качестве арматуры для бетона является относительно новой областью исследований. Армирование бетона текстильными структурами дает множество преимуществ. Бетонные элементы могут изготавливаться достаточно тонкими, поскольку отсутствует риск образования коррозии. В дополнение к этому текстильная арматура более гибкая и драпируемая, и поэтому форма бетонных элементов может широко варьироваться. Вследствие относительной дешевизны главным образом при армировании бетона используется щелочестойкие стеклянные волокна и нити. Также могут быть

использованы арамидные, углеродные и высокомодульные полиэтиленовые волокна и нити, а также текстильные полотна из них.

Армирующий механизм волокна или нити в бетонной матрице сильно отличается от полимерной матрицы из-за хрупкости бетона, т.е. низком удлинении бетонной матрицы, которое значительно меньше удлинения волокон. В полимерных композитах, матрица обычно более пластичная, чем волокно. Поэтому в бетонных композитах, матрица разрушается раньше, чем будут реализованы прочностные свойства волокна. Таким образом, армирование волокном становится эффективным главным образом после трещины матрицы, т.е. волокна будут способны воспринимать нагрузку после разрушения матрицы. Волокна с низким модулем упругости, такие как полиэтиленовые и полипропиленовые показывают плохое сцепление с бетонной матрицей, тогда как арамидные, углеродные обеспечивают прочное сцепление с матрицей.

В течение последних нескольких десятилетий при армировании бетонов широко используются волокна различного происхождения. Первыми для этих целей (начиная с 60-х годов прошлого столетия) стали использоваться стальные волокна. Области применения их достаточно широки: панельные перекрытия, настилы мостов, парковочные стоянки, полы, дорожные покрытия и т.д. Также стальные волокна используются в качестве дополнения к арматурным стержням для предотвращения трещинообразования и улучшения сопротивления к ухудшению свойств, являющиеся результатом усталости, удара, усадки и термонапряжений. Обычная доля стальных волокон составляет 0,5 – 2%. Стальные волокна могут использоваться при производстве конструкций с разнообразной формой. Они могут эффективно увеличивать вязкость, усталостную прочность, динамическую прочность, сопротивление порообразованию и снижают образование усадочных трещин. Основное преимущество стальных волокон по сравнению с остальными состоит в высоком модуле упругости. Однако по-прежнему основным недостатком является подверженность коррозии. Устранение этого недостатка может заключаться в применении стеклянных волокон. Бетон, армированный стеклянными волокнами, представляет собой материал, наполненный щелочестойкими стекловолокнами (AR glass fibers). Он производится одновременным формированием панелей из строительного раствора и рубленых стеклянных волокон. Объемная доля стекловолокон может достигать до 5%. Щелочестойкие стекловолокна, содержащие до 16%  $ZrO_2$ , имеют превосходное сопротивление щелочным воздействиям по сравнению с боросиликатными стекловолокнами (стекло марки Е). Несмотря на улучшенное кислотное сопротивление, долговременные испытания бетонных материалов на их основе показали снижение прочности с течением времени [1]. После продолжительного воздействия влажного климата, прочность и пластичность бетона снижаются почти до уровня неармированной матрицы из-за воздействий щелочной среды на волокна, уплотнения поверхности раздела волокно/матрица, вызванной гидратацией, и образования хлорида кальция вокруг пучков волокон [2].

Также при армировании бетона могут использоваться разнообразные натуральные волокна, включающие сизаль, джут, пеньку, минеральную шерсть, кокосовые волокна и ряд других экзотических волокон для наших мест. Их низкая стоимость, легкая переработка делает возможным их применение в строительной промышленности. Стоимость армированного бетона на основе натуральных волокон ниже, чем с использованием какого-либо другого вида волокон, и некоторые из них могут заменять асбестовые волокна. Доля натуральных волокон в композите может составлять до 10%. Среди многих преимуществ натуральных волокон, наиболее эффективными являются увеличение прочности на изгиб и пластичности бетона [3]. Однако из-за высокого водопоглощения и подверженности биоразрушению таких волокон стабильность и надежность свойств армированных бетонов на их основе часто неудовлетворительна.

Ещё одним типом волокон, используемым при армировании бетона, являются химические волокна. Химические волокна получают из волокнообразующих полимеров. Разнообразие свойств исходных синтетических полимеров позволяет получать волокна с различными свойствами. Многие виды синтетических волокон используются при армировании бетона. В общем случае высокомодульные волокна, такие как арамидные и полиэтиленовые с высокой плотностью, увеличивают прочность и вязкость бетона, обеспечивая тем самым упрочнение. Волокна с низким модулем упругости, такие как полипропилен, полиэтилен и др., главным образом улучшают вязкость бетона, а не его прочность [4]. При изготовлении композитов с хаотично расположенными волокнами, их объем составляет не более 3%, тогда как при использовании направленных нитей он может достигать 10%.

В настоящее время только полипропиленовые волокна получили широкое распространение при армировании бетонных материалов. Они используются либо в форме филамент, либо в форме фибрированных пленок [5]. Их использование приводит к улучшению пластичности и снижению усадки при высыхании бетона. Нейлоновые и акриловые волокна имеют низкий модуль упругости, и бетон, армированный этими волокнами, показывает лучшую пластичность и прочность при изгибе [6]. Арамидные волокна имеют высокий модуль и прочность и обладают хорошей адгезией с бетонной матрицей. Немногочисленные исследования, проведенные на арамидных волокнах, показали эффективность их использования при увеличении прочности при растяжении, изгибе и пластичности бетона [6-8]. Использование высокомодульных углеродных волокон увеличивает прочность бетона, однако они имеют более высокую стоимость по сравнению с другими видами волокон.

Наряду с волокнами при армировании бетона широко используются различные типы текстильных нитей. При этом необходимо учитывать сцепление текстильной арматуры с бетоном, потому что это влияние чрезвычайно важно для несущей способности конструктивных элементов. Сцепление текстиля с бетоном может быть улучшено за счет разнообразных структур нитей. Обычно текстильная арматура состоит из филаментных непрерывных нитей. При помощи изменения поверхности нити может быть улучшено ее сцепление с бетоном. Структуры нитей, применяемых для армирования бетона, включают оплетенные и обкрученные нити, которые улучшают сцепление с бетонной матрицей. Это воспроизводит структуру, схожую со стальной арматурой периодического профиля (рис. 2). При использовании технологии фрикционного прядения армирующая нить покрывается оболочкой, при этом создается структура нити с сердечником. В качестве сердечника обычно используются стеклянные, арамидные и другие высокопрочные нити. Оплетка состоит, например, из полипропиленовых штапельированных волокон, которые оплетают сердечник во время процесса прядения. При данной технологии создается рыхлая поверхность, которая улучшает сцепление с бетоном.

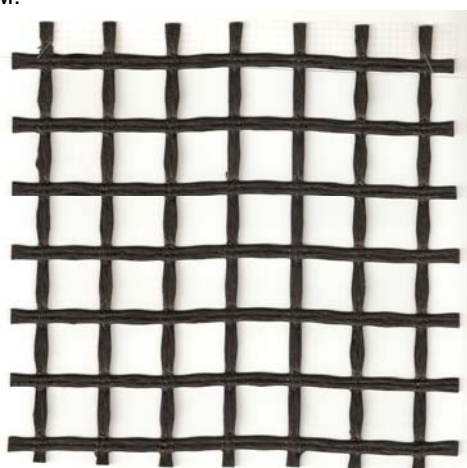


**Рисунок 2. Создание периодического профиля**

Для улучшения как внутреннего сцепления сердечника с оплеткой, так и наружного сцепления нити с бетоном данные структуры могут быть подвергнуты дополнительной обработке полимерами. Пропитанные нити обладают достаточно большей прочностью по сравнению с исходными за счет большего количества работающих филамент.

Для правильной реализации свойств нитей в бетоне необходимо их ориентировать в направлении действия нагрузки. Поэтому возникает необходимость производства следующего структурного уровня – текстильного полотна. Использование текстильных полотен в качестве армирующего компонента внутри тонких бетонных панелей началось в 1980-х годах. Имеется большое количество работ, связанных с применением текстильных сеток при армировании бетона, включая применение как натуральных [10], так и синтетических волокон [11, 12]. Структуры применяемых полотен также варьируются, могут использоваться как тканые [12], так и вязаные [13].

Современные текстильные технологии дают возможность производства разнообразных полотен технического назначения, обладающих большой гибкостью при проектировании геометрии изделий [14, 15]. Ориентация нитей в полотнах может быть в двух и трех направлениях действия нагрузки, также они могут состоять из нитей различного типа в структуре одного и того же полотна (рис. 3а, 3б). Все виды текстильных технологий пригодны для производства полотен технического назначения. Однако основное назначение таких полотен, как правило, связано с механическими, химическими и др. свойствами, а не с внешним видом и дизайном.



**а - двунаправленное**



**б - многонаправленное**

**Рисунок 3. Текстильные полотна из высокопрочных нитей**

Полотна, состоящие из комплексных нитей, снижают потенциальную возможность проникновения частиц бетона в пространства между волокнами, поскольку точки соединения полотна вызывают затягивающий



эффект, который удерживает нити на месте и предотвращает их от расширения. Поэтому проницаемость матрицы в полотно, особенно между филаментами, зависит от природы соединений в полотне и результирующего затягивающего эффекта, структуры полотна, количества филаментов в нити и технологического процесса. Изготовление бетонных композитов, армированных текстильными полотнами, должно гарантировать хорошую проницаемость частиц бетона в полотне. При использовании текстильной арматуры, возможно интегрировать элементы, которые гарантируют правильное расположение текстиля внутри бетонного элемента.



**Рисунок 4. Стеновая панель, в которой ограждающими наружными и внутренними слоями являются тонкостенные текстильно-армированные бетонные плиты (сэндвич-панель)**

Текстильные полотна в общем можно разделить на плоские и объемные. Плоские полотна представляют собой полотна, в которых усилительные элементы (нити) расположены в одной плоскости и способны воспринимать нагрузку в двух направлениях. Они могут быть ткаными или вязаными. Данные полотна могут быть изготовлены с различными параметрами, такими как количество нитей на метр, размер ячейки и т.д. Свойства данных полотен можно существенно варьировать от анизотропных до изотропных за счет количества усилительных элементов (высокопрочных нитей) в поперечном сечении полотна.

В последнее время основное преимущество отдается вязаным полотнам за счет высокой производительности вязальных машин и широких возможностей регулирования их свойств. Деформируемость, присущая вязаным структурам, может быть идеально использована во время уплотнения бетонной матрицы и придания необходимой каркасной формы изделию или конструкции, а также для того чтобы получить необходимые механические характеристики конечного материала. Механические свойства вязаных полотен достаточно легко могут варьироваться за счет введения дополнительных протяжек, набросков, сдваивания петель и прокладывания каркасных основных и уточных нитей. Эти решения позволяют вырабатывать текстиль с заданными механическими характеристиками и требуемой материалоемкостью.

Среди всех текстильных структур самыми востребованными могут оказаться трехмерные армирующие полотна, которые имеют форму конечного продукта. Это приводит к экономии рабочей силы при производстве бетонных элементов. Примерами таких структур могут служить трехмерные основовязанные полотна. В трехмерных полотнах нити ориентированы в трех направлениях и могут воспринимать нагрузку в данных

направлениях. Главное преимущество таких полотен состоит в определенной форме в виде конечного армирующего каркаса. Два разносторонних слоя, расположенные в наружных слоях бетонного элемента, воспринимают растягивающие усилия, которые являются максимальными в данных местах. Разработка полотен, имеющих в своей структуре все усилительные элементы и также имеющих форму армирующего каркаса, является достаточно экономичной технологией. Два слоя могут быть спроектированы с разным расстоянием между ними. Также возможно оставить свободные области, если необходимо изготовить бетонные элементы с определенной внутренней формой.

### Литература

1. Wang, Youjiang, Mechanics of fiber reinforced cementitious composites, Thesis (Ph. D.). Massachusetts Institute of Technology, 1989.
2. Stucke M. S., Majumdar A. J. Microstructure of glass fibre-reinforced cement composites // Journal of Materials Science, Volume 11, Issue 6, 1976.
3. D. G. Swift and R. B. L. Smith, The flexural strength of cement-based composites using low modulus fibres, Composites, Volume 10, Issue 3, 1979.
4. Peled A., Bentur A. Fabric structure and its reinforcing efficiency in textile reinforced cement composites // Composites, Volume 34, Issue 2, 2003.
5. Hannant D. J., Zonsveld J.J., Hughes D.C. Polypropylene film in cement based materials // Composites, Volume 9, Issue 2, 1978.
6. Wang Y., Backer S. An experimental study of synthetic fibre reinforced cementitious composites // Journal of Materials Science, Volume 22, Issue 12, 1987.
7. Walton P.L., Majumdar A.J. Properties of cement composites reinforced with Kevlar fibres // Journal of Materials Science, Volume 13, Issue 5, 1978.
8. Walton P.L., Majumdar A.J. Creep of Kevlar 49 fibre and a Kevlar 49-cement composite // Journal of Materials Science, Volume 18, Issue 10, 1983.
9. Konczalski P. and Piekarski K. Tensile properties of portland cement reinforced with kevlar fibers // Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 1, No. 4. 1982.
10. Mansur M.A., Aziz M.A. Study of bamboo-mesh reinforced cement Composites // The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, 5, 1983.
11. Parton G.M., Shendy-El-Barbary M.E. Polystyrene concrete sandwich beams: stiffness and ultimate load analysis // International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, 4(4), 1982.
12. Currie B., Gardiner T. Effect of low temperature on the flexural behaviour of Polypropylene Mesh Reinforced Fibre Cement Composite // Cement and Concrete Composites, 11(3), 1989.
13. Mu B. and Meyer C. Flexural Behavior of Fiber Mesh-reinforced Concrete with Glass Aggregate // ACI Materials Journal, 99(5), 2002.
14. Hanisch, V., Kolkman A., Roye A., Gries T. Influence of machine settings on mechanical performance of yarn and textile structures, in proceedings: ICTRC 2006 1st International RILEM Symposium on Textile Reinforced Concrete, 2006.
15. Hanisch, V., Kolkman, A., Roye, A., Gries, T. Yarn and textile structures for concrete reinforcements in proceedings: FERRO8, Bangkok, 2006.

*\*Олег Николаевич Столяров, Санкт-Петербургский государственный университет технологии и дизайна*

*Тел. раб.: (812) 315-15-98, тел. моб.: +7(911) 999-94-96*

*Эл. почта: oleg.stolyarov@rambler.ru*