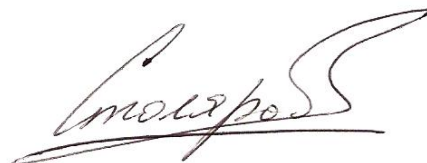


Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

*На правах рукописи*



**СТОЛЯРОВ Олег Николаевич**

**ТЕКСТИЛЬНО-АРМИРОВАННЫЙ БЕТОН ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА И  
ЭКСПЛУАТАЦИИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ**

Специальность 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Санкт-Петербург – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

**Научный консультант:**

доктор технических наук **Козинец Галина Леонидовна**  
Высшая школа гидротехнического и энергетического строительства,  
профессор, директор

**Официальные оппоненты:**

доктор технических наук, доцент **Корниенко Сергей Валерьевич**  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет», кафедра «Архитектура зданий и сооружений», заведующий кафедрой

доктор технических наук **Давиденко Вячеслав Михайлович**  
Акционерное общество «Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники имени Б.Е. Веденеева», отдел «Диагностика сооружений, механического оборудования и сопровождения спецработ», ведущий научный сотрудник

доктор технических наук, профессор **Гусев Борис Николаевич**  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный политехнический университет», кафедра материаловедения, товароведения, стандартизации и метрологии, профессор

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Защита состоится «29» декабря 2020 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета У.05.23.01 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, корпус ГК-2, аудитория 411).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте [www.spbstu.ru](http://www.spbstu.ru) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Автореферат разослан " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2020 г.

и.о. ученого секретаря диссертационного совета  
доктор технических наук, доцент



Баденко В.Л.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** В строительных конструкциях на протяжении более чем ста лет в качестве арматуры для бетона традиционно широко используется стальная арматура. Наряду с целым рядом важных положительных свойств железобетонных конструкций, таких как высокая прочность и жесткость, их масса весьма велика, а применяемая стальная арматура порой ограничивает размеры и форму выпускаемых изделий. Кроме того, сталь подвержена коррозии, вызывая, таким образом, коррозию арматуры, что может привести к разрушению бетона.

На сегодняшний день применение волокнистых, полимерных и композиционных материалов в строительстве получило широкое развитие по ряду направлений, включающие: использование высокопрочных полотен и полимерных композитов на их основе для усиления строительных конструкций внешним армированием при реконструкции зданий и сооружений [1, 2]; применение стеко-, угле- и базальто-пластиковой композитной арматуры [3, 4]; использование короткого волокна для изготовления фибробетона [5-11]; текстиль-бетон [12-14] и изготовление бетонных конструкций с помощью 3-D аддитивных технологий [15, 16].

Высокопрочные текстильные материалы широко используются в различных областях строительства, включая строительство зданий и сооружений, дорожное строительство, гидротехническое строительство и др. В сочетании с бетонной матрицей они образуют новый класс конструкционных строительных материалов – текстильно-армированный бетон (ТАБ). В строительных работах часто возникает необходимость создания легких конструкций, таких как арки, перекрытия входов, навесы, козырьки, карнизы и ряда декоративных элементов. Текстильные конструкционные композиты становятся перспективным 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 [17-19]. Более того, из-за исключительно выгодного соотношения веса и прочности, они 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.

**Степень разработанности темы.** Анализируя исследования отечественных и зарубежных авторов, можно выделить работы, посвященные как усилению и реконструкции зданий и сооружений, так и

непосредственному использованию ТАБ для разработки конструкций зданий и сооружений. Вместе с тем, эффекты от применения различных видов текстильной арматуры недостаточно исследованы. В рамках данной работы акцент делается на использовании текстильной арматуры для разработки элементов строительных конструкций. Перспективными являются разные направления, включающие выбор текстильной арматуры с оптимальными характеристиками, повышения эффективности армирования бетонных композитов, мониторинг нагруженных состояний.

**Цель работы** состояла в разработке конструктивных элементов из ТАБ с экспериментальными исследованиями особенностей строения и механического поведения армирующих материалов, а также регулирования технологических параметров с установлением взаимосвязи между строением и свойствами.

**Объекты исследования:** высокопрочные стеклянные и углеродные ровинги; армирующие полотна на их основе; ТАБ и композитные бетонные изделия.

**Основные задачи работы** состояли в следующем:

- теоретические и экспериментальные основы технологии изготовления ТАБ с заданным комплексом свойств; оптимизация технологических процессов с целью регулирования свойств и получения требуемых характеристик бетонных композитов;
- исследование основных параметров строения армирующих полотен для ТАБ; определение взаимосвязи строения и механических свойств, параметров и механизмов образования строения плоских и пространственных комбинированных армирующих структур на основе волокнистых анизотропных элементов;
- исследование механического поведения текстильной арматуры, включая арматуру с покрытием и напряженную арматуру; установление взаимосвязи между изменением структуры бетонного композита при нагружении;
- повышение эффективности реализации механических свойств высокопрочных армирующих ровингов на различных структурных уровнях на основе измерений параметров структуры и свойств;
- разработка технических решений, связанных с измерением деформаций в бетонных композитах с использованием электропроводящих свойств углеродных ровингов; разработка универсальной измерительной системы на основе гибкого армирующего полотна в форме сетки.

**Научная новизна работы:**

- выполнен анализ строения и механических свойств армирующих волокнистых материалов;
- усовершенствованы технологические процессы изготовления армирующих нитей, включая крученые и оплетённые для армирования бетона, путем регулирования параметров образования структуры;

– установлены закономерности влияния процессов переработки высокопрочных армирующих нитей на текстильном оборудовании на свойства армирующих полотен и бетонных композитов на их основе;

– предложен новый универсальный подход, позволяющий оптимально реализовать механические свойства высокопрочных нитей при их переработке в армирующие полотна и бетонные композиты; установлено влияние прочности и жесткости составляющих нитей на реализацию их свойств в армирующем полотне и композите;

– разработан подход по использованию армирующих электропроводящих углеродных ровингов для определения деформаций композита в качестве универсальной измерительной системы на основе гибкого полотна в форме сетки с открытыми ячейками, включающего в свою структуру углеродные ровинги;

– экспериментально установлены особенности взаимодействия волокна и матрицы в текстильно-армированном бетоне;

– выявлены закономерности изменения структуры армирующих ровингов при предварительном нагружении и их влияние на свойства предварительно-напряженного ТАБ;

– проведена оценка долговечности конструкций зданий и сооружений из ТАБ с рекомендациями по эксплуатации.

**Теоретическая значимость работы** состоит в установлении особенностей строения и их взаимосвязи с механическими свойствами ТАБ с созданием комплекса методов их измерения и проектирования. Предложена концепция технологического регулирования строения и механических свойств ТАБ. Усовершенствованы технологические приемы, позволяющие повысить эффективность реализации текстильной арматуры в бетонных композитах. Предложена концепция 3D печати с применением непрерывной текстильной арматуры.

**Практическая значимость работы** состоит в разработке новых технических решений для обеспечения повышения эффективности применения армирующих полотен в бетонных композитах, новом подходе к выполнению измерений механических свойств текстильной арматуры и установления их взаимосвязи с внутренним строением. Установлено, что ключевым фактором, влияющим на сцепление с бетоном, является строение текстильной арматуры. Установлена корреляция между строением армирующего ровинга и механическими характеристиками образцов бетонных композитов, позволяющая обеспечить эффективность армирования за счет оптимизации параметров армирующей структуры. Усовершенствован перспективный метод измерений механических свойств конструктивных композитов с использованием электропроводящих углеродных нитей. Разработаны и изготовлены опытные образцы ТАБ. Полученные результаты обеспечивают экономичность и эффективность проектирования и эксплуатации ТАБ.

Диссертационная работа была поддержана рядом научных грантов и выполнялась в рамках: грант Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых № МК-2160.2007.8. «Разработка технологии изготовления и исследование свойств текстильных полимерных композитов конструкционного назначения с повышенной удельной прочностью и жесткостью»; грант № 30-04/85 Санкт-Петербургского конкурса персональных грантов 2008 года для молодых ученых, молодых кандидатов наук»; «Разработка технологии изготовления вязаных армирующих полотен из высокопрочных нитей для конструкционных композитов»; грант № 26-05/91 Санкт-Петербургского конкурса персональных грантов 2009 года для молодых ученых, молодых кандидатов наук «Разработка расчетных методов моделирования и прогнозирования механических свойств текстильных армирующих структур для конструкционных композитов»; АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы» (2009-2011) №2.1.2/4466 «Развитие концепции создания комбинированных и многослойных структур на основе анизотропных волокнистых элементов и разработка физических и биохимических методов оптимизации их функциональных свойств»; Немецкого научно-исследовательского сообщества (DFG), Немецкой службы академических обменов (DAAD); грант РФФИ №12-08-31113 мол\_а. «Многоуровневый модельный анализ структуры и механических свойств текстильно-армированных конструкционных композитов» (2012-2013); государственное задание подведомственными Министерству образования и науки Российской Федерации высшими учебными заведениями №11.7181.2013 «Исследование взаимосвязи структуры и свойств современных текстильно-армированных полимерных композитов конструкционного назначения».

**Методология и методы исследований.** Методология решения поставленных задач включает рассмотрение строения ТАБ композитов на различных уровнях их иерархического строения при продвижении от одного уровня к другому. В работе используются следующие методы: испытания на растяжение ровингов, полотен, бетонных композитов; сдвиг армирующих полотен методом деформируемой рамки; поперечный и чистый изгиб бетонных композитов; устойчивость пространственных полотен; оптическая микроскопия; электромеханические измерения электропроводящих нитей и композитов.

**Личный вклад автора диссертационной работы.**

Все результаты диссертационной работы получены лично автором или при его непосредственном участии.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

– комплекс экспериментальных методов измерений механических свойств ТАБ и его компонентов в зависимости от их строения;

- установленные закономерности влияния параметров строения армирующих полотен на механические свойства бетонных композитов;
- способ электромеханических измерений бетонных композитов с углеродными ровингами, которые одновременно выполняют армирующую функцию;
- способ изготовления армирующих структур, позволяющий обеспечить повышение и сохранение прочности дорогостоящих армирующих нитей, а также реализовать регулируемые механические свойства ТАБ;
- концепция применения текстильной арматуры при изготовлении строительных конструкций.

**Степень достоверности и обоснованности результатов** исследований подтверждается статистически обоснованным объемом экспериментальных исследований; использованием современных средств и методов исследования; корректным использованием математического аппарата; применением статистической обработки экспериментальных результатов на основе дисперсионного многофакторного анализа (ANOVA); использованием современного измерительного оборудования.

**Апробация работы.** Результаты работы были представлены на Санкт-Петербургской ассамблеях молодых ученых и специалистов (г. Санкт-Петербург, 2008, 2009); Петербургских чтениях по проблемам прочности (Санкт-Петербург, 2005, 2006, 2008 гг.); Международной конференции «Волокнистые материалы XXI век» (Санкт-Петербург, 2005); Петербургском Текстильном коллоквиуме (Санкт-Петербург, 2006, 2007, 2009 гг.); II Международной текстильной конференции (Дрезден, Германия 2008); VII Международной конференции «Научно-технические проблемы прогнозирования надежности и долговечности конструкций и методы их решения» (Санкт-Петербург, 2008); III Международной текстильной конференции (Ахен, Германия 2009); Всероссийской научно-технической конференции «Популярное бетоноведение» (Санкт-Петербург, 2009); Международной конференции «Актуальные проблемы механики - 2009» (Санкт-Петербург, 2009); Семинарах секции строительной механики и надежности конструкций имени профессора Н.К. Снитко и секции Прочности и пластичности материалов имени академика Н.Н. Давиденкова (Санкт-Петербург, Дом ученых им. М. Горького, 2012, 2016); Международном симпозиуме Технический текстиль (Москва, 2013); Международной текстильной конференции AUTEX (Дрезден, Германия 2013); Международной конференции по геосинтетическим материалам (Берлин, Германия, 2014); Международной конференции по композиционным материалам «ICSM-20» (Копенгаген, Дания, 2015); Международной конференции «Волокна нового поколения для интеллектуальных продуктов» (Ахен, Германия 2017); Международной

конференции «Деформирование и разрушение композиционных материалов и конструкций» (Москва, 2016, 2018).

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 34 печатные работы, включая 16 статей в журналах, входящих в «Перечень...» ВАК РФ и базы данных WoS, Scopus, 1 монографию, 1 патент.

**Структура и объем работы.** Диссертация содержит введение, 7 глав, выводы и список использованных источников из 347 наименований. Работа изложена на 275 страницах, содержит 116 рисунков и 30 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** дана краткая оценка современного состояния проблемы, показана актуальность выбранного направления, сформулированы цели и задачи исследования.

**В первой главе** рассмотрено современное состояние и перспективные направления разработки облегченных бетонных композитов, армированных высокопрочными текстильными материалами. Проблемам исследования и разработки волокнистых, полимерных и композиционных материалов в строительстве посвящены работы В.В. Бабкова, Ю.М. Баженова, А.В. Бенина, В. Брамесхубера, А.В. Бучкина, Ю.В. Грачевой, Т. Грися, А.С. Иноземцева, С.С. Каприелова, С.В. Ключева, А.Е. Лапшинова, В.С. Лесовика, Б. Мобашера, Г.Э. Окольниковой, А. Пелед, Ю.В. Пухаренко, Е.В. Королева, П. Краваева, В.С. Семенова, А.Г. Тамразяна, Т. Триантафиллоу, Л.А. Урухановой, В. Ханиш, Й. Хеггера, А. Хорошенкова, Р. Худобы, С. Чиу, Ч. Шерифа, Ш. Янецко и других ученых.

**Во второй главе** приводятся результаты исследования взаимосвязи параметров структуры и механических свойств текстильной арматуры для ТАБ. Исследовалась иерархическая цепочка компонентов: волокно → нить → полотно → композит [20]. Основная цель такого исследования состояла в выявлении путей оптимальной реализации и повышения эффективности свойств компонента на каждом уровне.

На начальном этапе стояла задача исследования параметров структуры и механических свойств различных типов высокопрочных ровингов и нитей (стеклянных, углеродных, арамидных и др.): крученых нитей и оплетенных со структурой периодического профиля. Рассмотрены основные возможности повышения эффективности реализации механических свойств на образцах высокопрочных нитей. Предложены усовершенствованные методики подготовки образцов хрупких нитей для испытаний на растяжение. Проведены измерения прочностных характеристик щелочестойких (ЩС) стеклянных ровингов различной линейной плотности, величины крутки и различным количеством спиралеобразных витков на метр длины.



На следующем этапе рассмотрена задача повышения эффективности реализации свойств высокопрочных ровингов в армирующих полотнах. Рассмотрены две группы армирующих полотен: исходные и с покрытием. Первая группа армирующих полотен включает полотна, непосредственно полученные, из высокопрочных ровингов, а вторая группа включает полотна с нанесением покрытия. В обычных полотнах эффективность реализации механических свойств нитей достигается, главным образом, за счет изменения структуры полотна. В пропитанных полотнах нить покрывается, как правило, полимерным составом, вследствие чего все внутренние филаменты приобретают прочные связи друг с другом. В табл. 1 представлены характеристики исследуемых образцов исходных полотен.

Таблица 1 – Характеристики исследуемых образцов

| Образец | Материал ровингов                                |                                       |
|---------|--|---------------------------------------|
|         | основные (продольные)                            | точные (поперечные)                   |
| СР      | Щелочестойкий стеклянный ровинг, 2400 текс       | Щелочестойкий стеклоровинг, 2400 текс |
| УР1     | Углеродный ровинг, ПАН-прекурсор, 1600 текс, 24К |                                       |
| УР2     | Углеродный ровинг, ПАН-прекурсор, 810 текс, 24К  |                                       |
| УР3     | Углеродный ровинг, нефт.пек., 1560 текс, 24К     |                                       |

На рис. 1 представлены фото трех типов армирующих полотен из ШС стеклянных ровингов. Структура с переплетением трико (рис. 1а) или сукно (рис. 1б) имеет очень широкие расплюснутые ровинги с дополнительной сеткой из провязывающих нитей, а вторая с переплетением цепочка имеет открытую структуру с ячейками в виде сетки. Переплетение цепочка характеризуется вертикальным расположением протяжки (рис. 1в). В этом случае нить сильно сужается и, как следствие, ее диаметр значительно уменьшается.

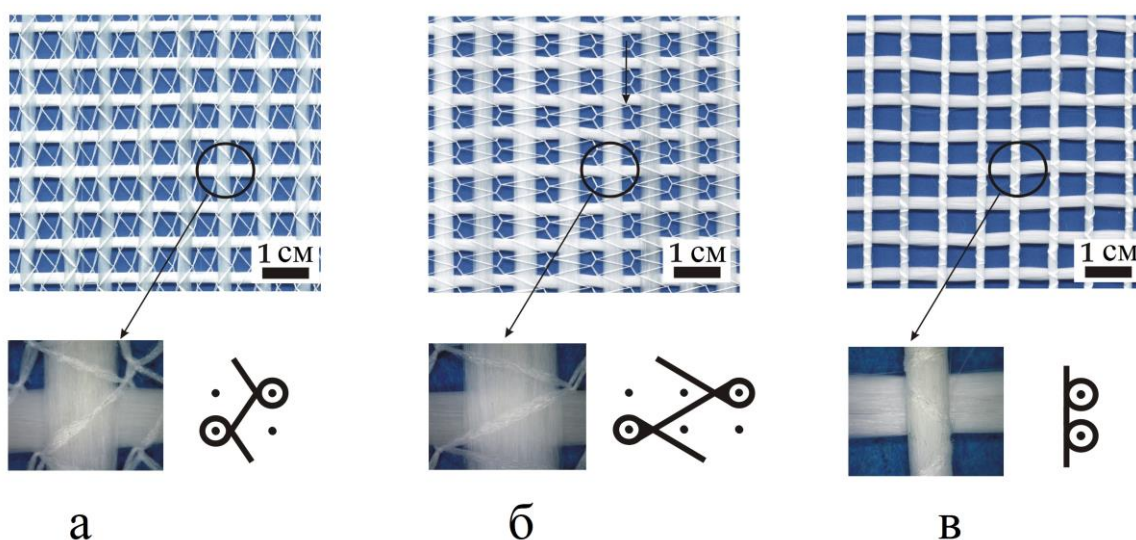


Рисунок 1 – Структура основовязаного полотна из стеклянных ровингов: (а) трико, (б) сукно, (в) цепочка

Для сравнения типов переплетения были использованы характеристики контактной длины и среднего радиуса на основе построенных распознанных моделей координат отдельных филаментов в поперечных сечениях ровинга (рис. 2). Средний радиус распределения волокон определялся по формуле [22]

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{[x(i) - c_x]^2 + [y(i) - c_y]^2}}{n_f}, \quad (1)$$

где  $x(i)$ ,  $y(i)$  - координаты  $i$ -го распознанного армирующего волокна;  $c_x$ ,  $c_y$  - координаты центра тяжести всех волокон;  $n_f$  - количество волокон.

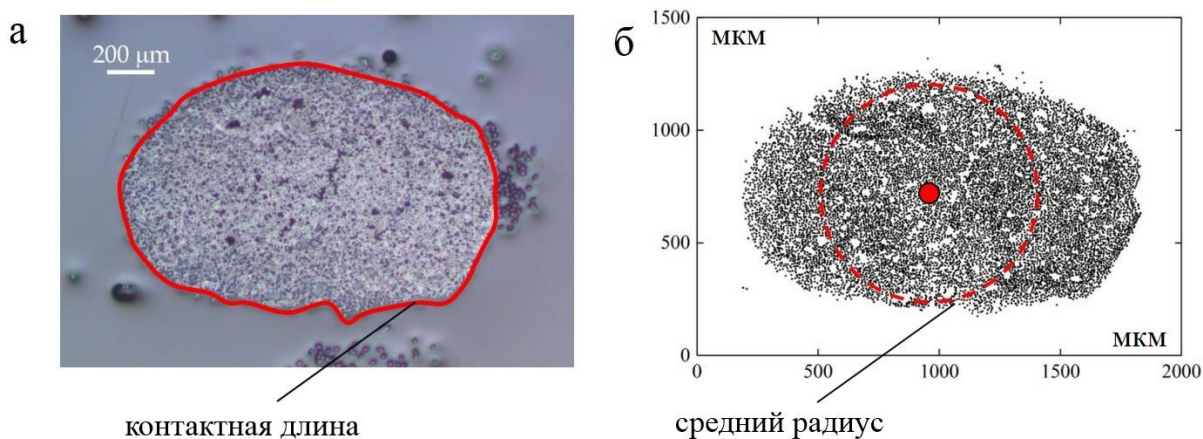


Рисунок 2 – Определение контактной длины и среднего радиуса

На рис. 3 представлены модели поперечных сечений стеклянного и углеродного ровингов в основовязаном полотне. Расплющенность нити в полотне с переплетением трико и сукно приводит к более высоким результатам в механических характеристиках по сравнению с ровингом круглого сечения за счет отсутствия межволоконного трения и большей контактной длины (внешней поверхности) ровинга. В переплетение цепочка сечение нити приобретает эллиптическую, практически круглую, форму за счет ориентации соединительных нитей вдоль оси армирующей нити и ее затяжки. Средний радиус распределения волокон в переплетение цепочка почти в два раза меньше по сравнению с трико и сукно. Контактная длина также в два раза меньше, что, безусловно, сказывается на прочностных свойствах композитов из нее. За счет большей контактной поверхности ровинга достигается улучшенная сцепляемость с бетонной матрицей.

Результаты определения механических характеристик представлены на рис. 4. Тип переплетения сильно влияет на механические свойства армирующих полотен при растяжении. Максимальной прочностью

обладают образцы переплетения трико для всех типов ровингов. Образцы переплетения цепочка показывают более низкую прочность, что обусловлено формой их поперечного сечения.

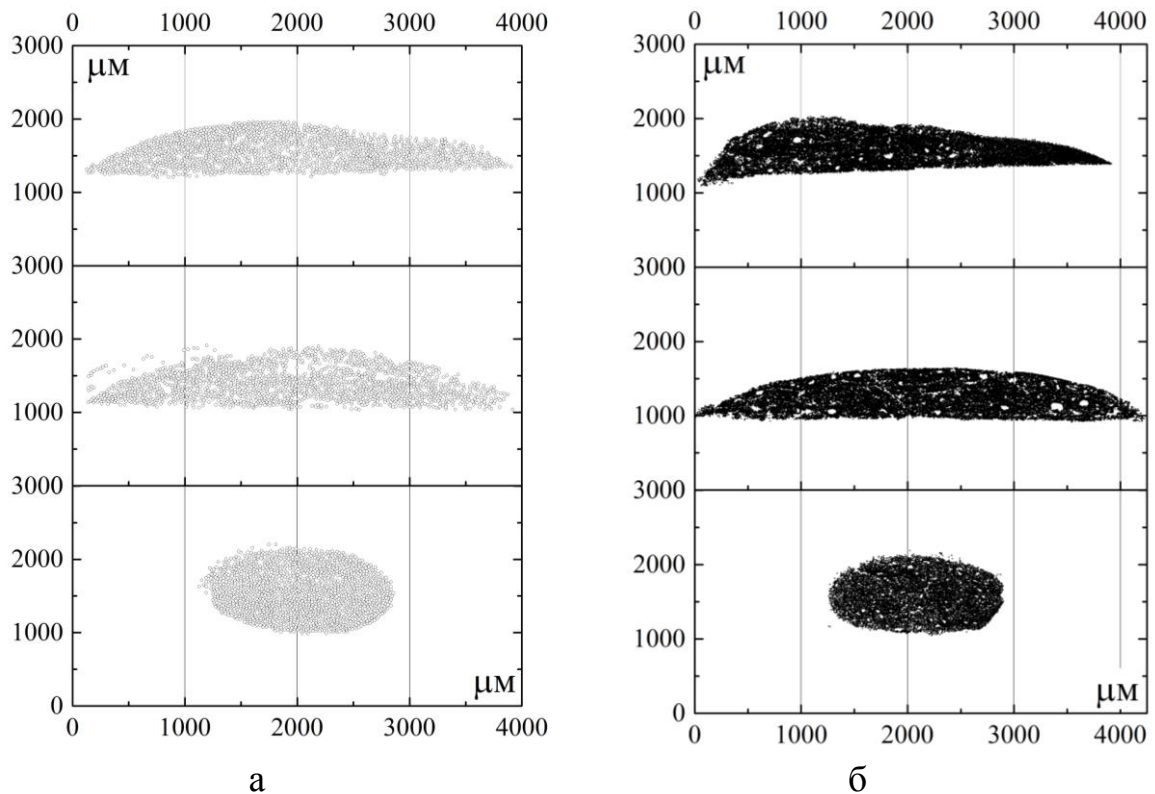


Рисунок 3 – Распознанные модели поперечных сечений ровингов в армирующем полотне: (а) стеклянный ровинг, (б) углеродный ровинг

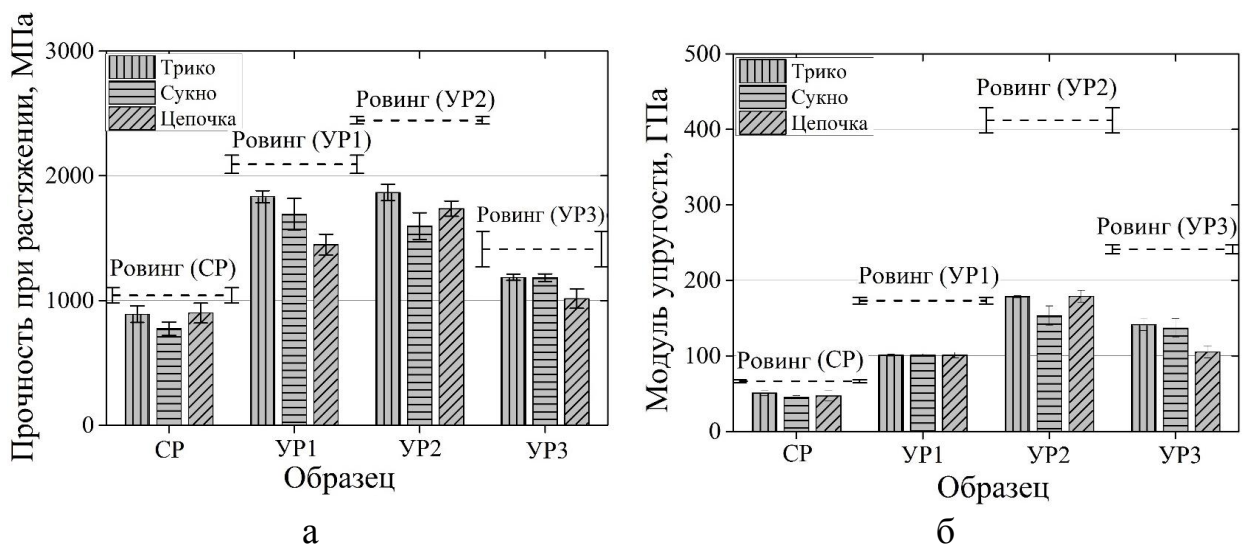


Рисунок 4 – Механические характеристики армирующих полотен: (а) прочность при растяжении и (б) модуль упругости

Взаимосвязь между прочностью и модулем упругости исходных нитей и их свойствами в полотне представлены на рис. 5а и 5б

соответственно. Наклонная штриховая линия, проведенная под углом в  $45^\circ$ , показывает полную (оптимальную) реализацию свойств армирующих ровингов в полотне. Как видно на представленных графиках, наибольшей реализацией свойств обладает стеклянный ровинг, демонстрирующий практически полное сохранение прочности для всех переплетений (до 98% от исходной прочности нити). Все образцы углеродных нитей лежат ниже этой линии. С увеличением прочности углеродных нитей реализация их свойств в полотне значительно снижается. Аналогичная зависимость наблюдается и для модуля упругости. Сохранение модуля упругости углеродных ровингов гораздо хуже и снижается с увеличением модуля упругости составляющих его нитей. Такую меньшую реализацию свойств можно объяснить высокой хрупкостью углеродных нитей и тем, что с повышением жесткости исходных нитей происходит разрушение части филаментов при растяжении.

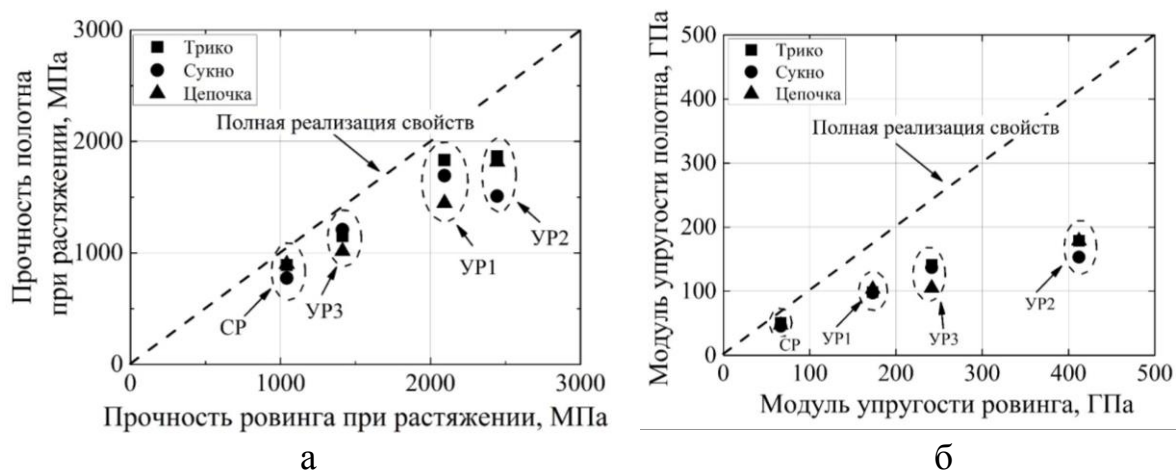


Рисунок 5 – Реализация механических свойств исходных нитей в армирующих полотнах

В следующей части этой главы приведены исследования сдвигового деформирования наработанных образцов основовязаных полотен методом деформируемой рамки. Результаты измерений показали, что полотно с переплетением трико обладает наибольшим сопротивлением сдвигу.

Основная проблема применения армирующих полотен состоит в хрупкости высокопрочных ровингов, что приводит к их высокой повреждаемости. Решением является использование полотен с покрытием, предотвращающим возможные повреждения. Кроме того, может быть улучшено сцепление текстильной арматуры с матрицей. В табл. 2 приведены характеристики основовязаных полотен с покрытием. По результатам исследований определены основные характеристики образцов полотен. Полученные данные представлены на рис. 6. Прочность на растяжение пропитанных полотен зависит от типа покрытия поверхностной плотности полотна. Увеличение прочности основано на



распределении напряжений между филаментами. Из-за пропитки локальные пики напряжений, вызванные несовершенствами, такими как поврежденные филаменты или непрямолинейность, переносятся на соседние филаменты. Влияние типа пропитки на модуль упругости не столь значимо, как на прочность.

Таблица 2 – Характеристики основовязаных полотен с покрытием

| № | Образец | Сырье                              | Тип покрытия  | Вязкость, мПас     | Поверхностная плотность, г/м <sup>2</sup> |
|---|---------|------------------------------------|---|--------------------|---|
| 1 | СР-Н    | Стекло-<br>ровинг,<br>1200<br>текс | непропитанный   | -                  | 373±5                                     |
| 2 | СР-С    |                                    | силикат калия (раствор)                                   | < 100              | 416±5                                     |
| 3 | СР-К    |                                    | карбоксилированный стирол-<br>бутадиеновый каучук (дисп.) | < 1000             | 507±8                                     |
| 4 | СР-Э    |                                    | эпоксидная смола<br>(двухкомпонентный)                    | 10 000 –<br>12 000 | 557±12                                    |

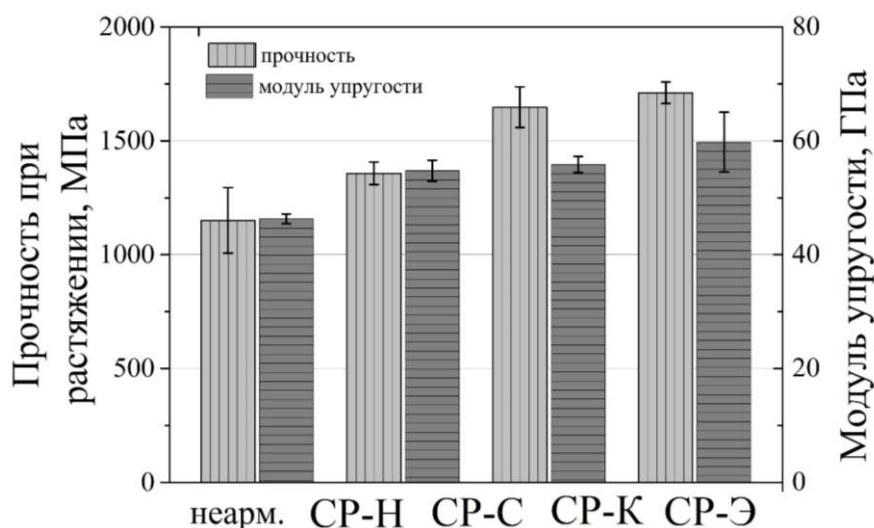


Рисунок 6 – Механические характеристики полотен с покрытием

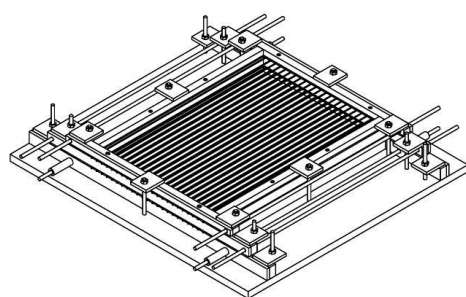
**В третьей главе** рассмотрены технологические аспекты изготовления ТАБ, механические свойства бетонных композитов с учетом особенностей строения армирующего компонента и эффективность реализации свойств текстильной арматуры в бетонном композите

Образцы ТАБ изготавливались с помощью специальной формы, показанной на рис. 7. Форма была изготовлена из политетрафторэтилена (фторопласт-4) и представляет собой сборную конструкцию, состоящую из трех рамок (рис. 7а и б). Данная конструкция позволяет зафиксировать два слоя полотна на определенном расстоянии друг от друга. Образцы армирующего полотна располагались в растянутом и сжатом слое на расстоянии в 7,5 мм от каждого края, как показано на рис. 7в. После чего полученная плита разрезалась на три отдельных образца (рис. 7г). Для производства образцов бетонного композита использовался

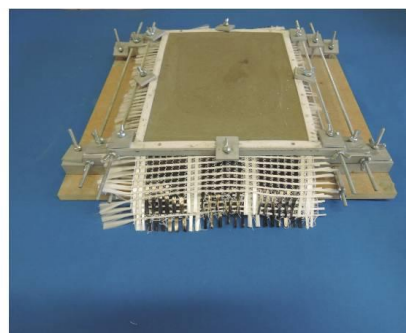
мелкозернистый бетон с максимальной фракцией песка 0,6 мм (табл. 3). Объемная доля волокна в изготовленных образцах составляла приблизительно 0,7%. Испытуемые образцы хранились перед измерениями в течение 28 суток при температуре 23°C и относительной влажности 95%.

Таблица 3 – Состав мелкозернистого бетона

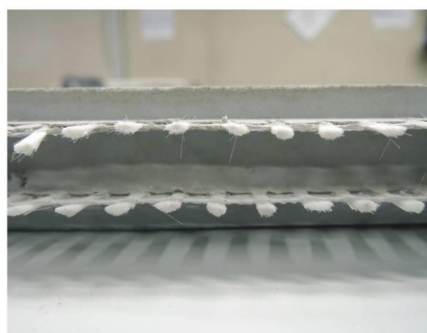
| Цемент | Зола | Песок<br>(0-0,25 mm) | Песок<br>(0,2-0,6 mm) | Пластификатор | Кремнезём | Вода |
|--------|------|----------------------|-----------------------|---------------|-----------|------|
| 490    | 175  | 499                  | 714                   | 7             | 70        | 245  |



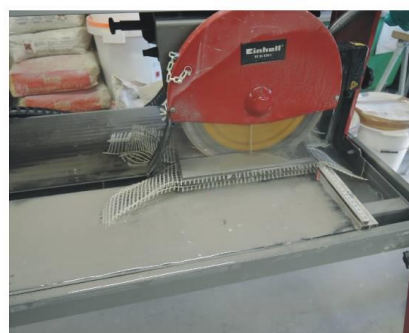
а



б



в



г

Рисунок 7 – Изготовление образцов ТАБ

Как было показано в главе 2, строение полотна существенно влияет на форму и положение армирующих нитей в полотне и композите. Аналогичные результаты можно проследить при определении механических свойств бетонных композитов. На рис. 8 показаны кривые деформирования при изгибе для образцов армированных бетонных композитов. Характер поведения образцов различен и существенно зависит как от вида армирующего ровинга, так и от типа переплетения. Начальный участок деформирования характеризуется линейностью свойств с последующим переходом в участок с незначительной нелинейностью. После этого появляется первая поперечная трещина, соответствующая максимальному пику на диаграмме изгиба. Затем наблюдается рост прочности при изгибе за счет сопротивляемости

армирующих нитей. Этот процесс происходит скачкообразно с образованием еще нескольких пиков.

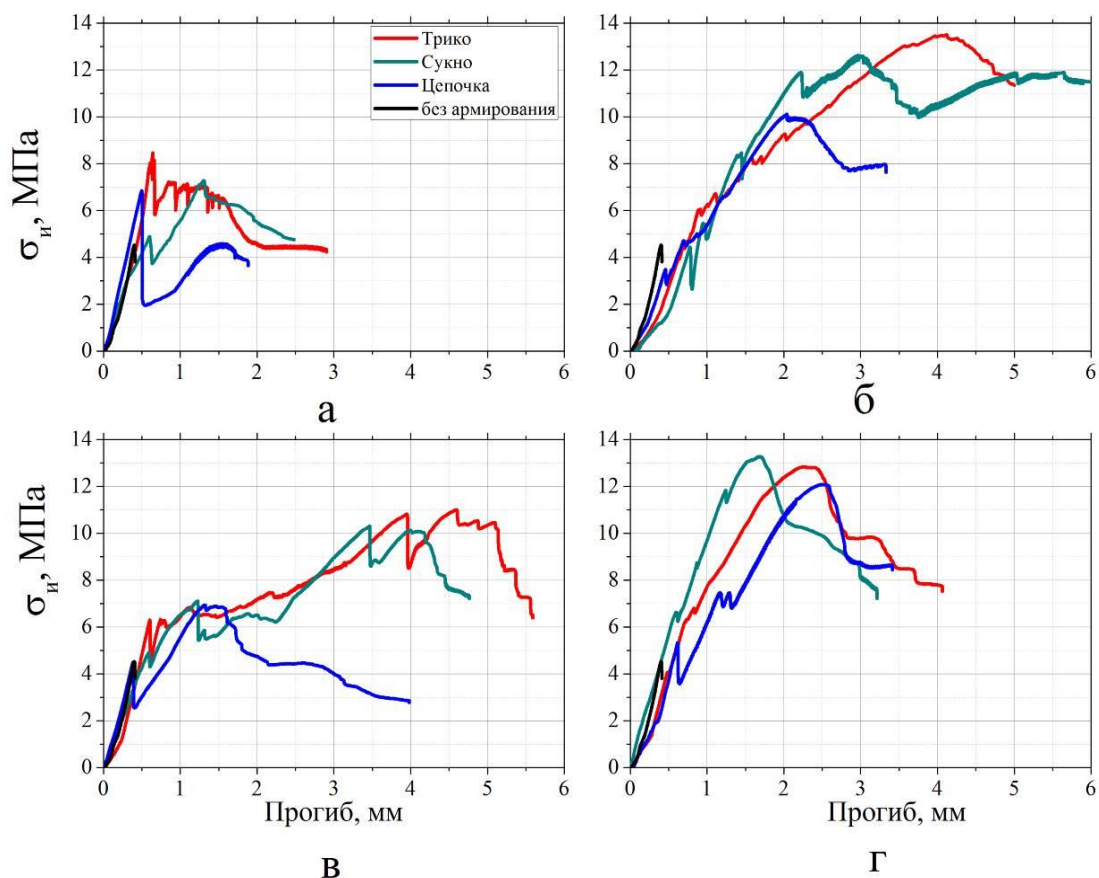


Рисунок 8 – Диаграммы изгиба бетонных композитов с различными типами переплетения полотна: (а) СР, (б) УР1, (в) УР1, (г) УР1



а



б



в

Рисунок 9 – Образование трещин в бетонном композите

На рис. 9 показан характер разрушения для образцов с различными типами переплетений. В случае образцов композитов с переплетениями трико и сукно образуются множественные трещины, как видно на рис. 9а и 9б соответственно. В то же время этот эффект особенно выражен в случае переплетения трико. Для образцов с переплетением цепочка наблюдается только одна трещина, как показано на рис. 9в.

На рис. 10 представлены зависимости реализации свойств (прочности и модуля упругости) ровинга в композите. Штриховая линия показывает эффективность реализации свойств текстильного армирования в бетонном композите, а именно величину прочности при изгибе на единицу величины модуля упругости ровинга. Все точки, лежащие выше этой линии, свидетельствуют о более высокой эффективности армирования. Из приведенной диаграммы видно, что наилучшей реализацией свойств обладают образцы полотен из стеклоровинга и углеродного ровинга УР1. Анализируя данные в целом, следует отметить, что с увеличением модуля упругости углеродной нити снижается прочность бетонного композита.

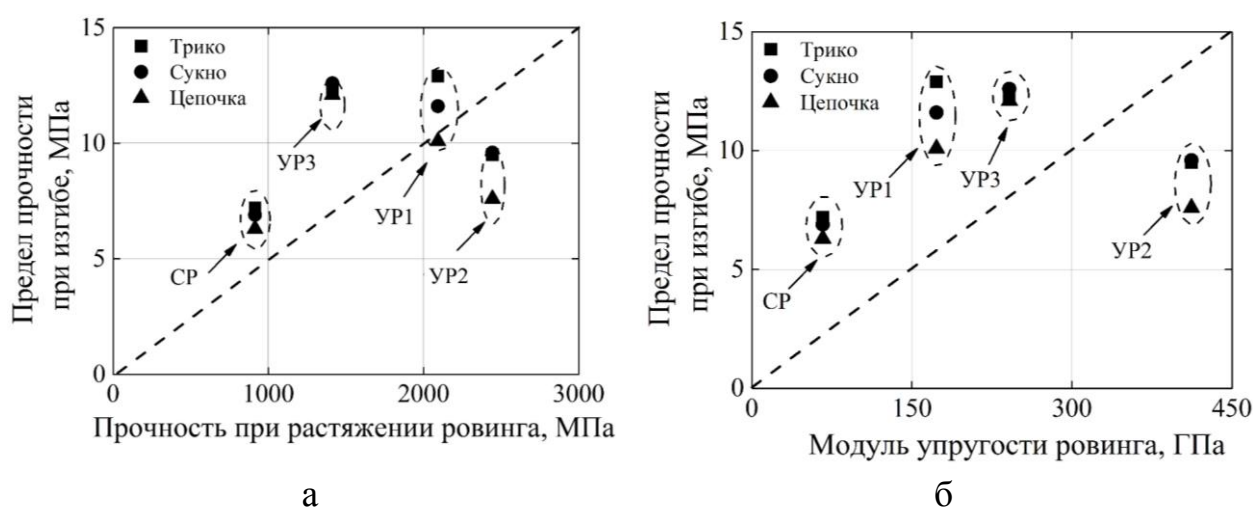


Рисунок 10 – Реализация свойств ровинга в бетонном композите

При сравнении результатов испытаний образцов бетонных композитов, армированных стеклянными полотнами с различными типами полимерных покрытий, было обнаружено, что поведение образцов изменяется и сильно зависит от типа полимерного покрытия. В образцах с армированием без покрытия (СР-Н) и силиката калия (СР-С) происходит мгновенное частичное разрушение, в основном из-за высокой адгезии арматуры и матрицы. В образцах с покрытием (СР-К) и эпоксидной смолой (СР-Э) после достижения первого пика разрушение происходит ступенчато, что обеспечивает высокую остаточную прочность. Эффективность армирования бетонного композита рассчитывалась как

$$\mathcal{E}_{\text{ар}} = \frac{R_{\text{и}}^{\text{ар}}}{R_{\text{исх.}}}, \quad (2)$$

где  $R_{\text{и}}^{\text{исх}}$  - предел прочности при изгибе исходного (неармированного бетона) в МПа;  $R_{\text{и}}^{\text{ар}}$  - предел прочности при изгибе армированного образца в МПа.



На рис. 11а показан коэффициент эффективности армирования по отношению к исходному неармированному образцу бетона. Образцы композитов, армированных стеклоровингом, имеют минимальную эффективность армирования - не более 1,86. Для образцов композитов из углеродных ровингов коэффициент эффективности армирования достигает значений от 2,2 до 3 в случае образцов с применением переплетения трико и ровинга УР1 и для всех трех типов переплетений образцов композитов с ровингом УР3. Бетонный композит, армированный ровингом УР2, показал наименьшую эффективность реализации прочностных свойств, хотя этот ровинг обладал самым высоким модулем упругости. На рис. 11б показан коэффициент эффективности армирования по отношению к исходному неармированному образцу бетона. Образец, армированный основовязаным полотном без покрытия, имеет минимальный коэффициент, не более 1,55. Для образцов данных композитов с покрытием коэффициент эффективности армирования был выше 1,86 по пределу прочности на изгиб.

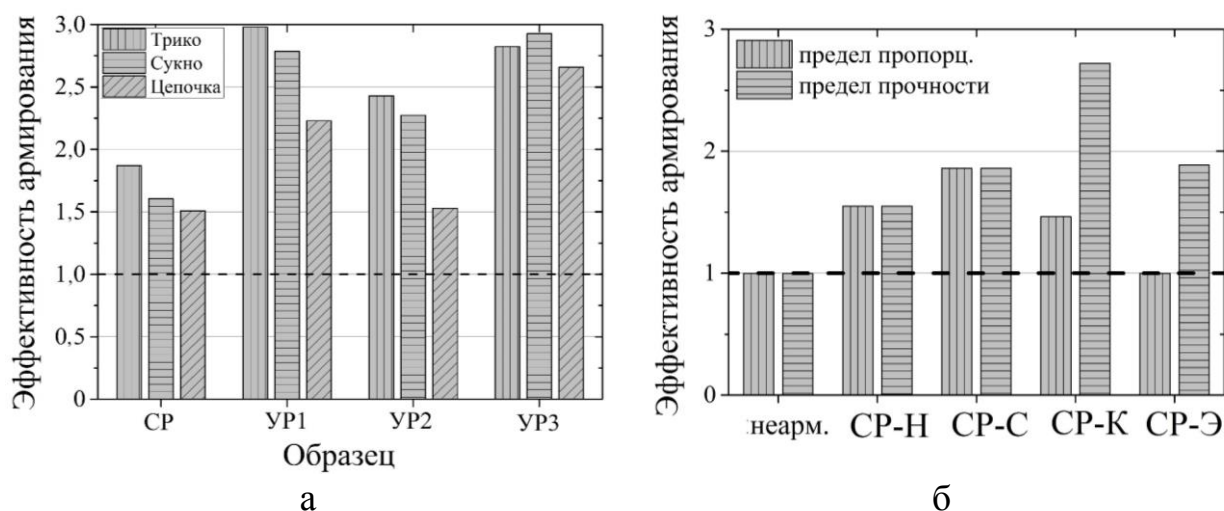


Рисунок 11 – Эффективность армирования в бетонном композите

В результате можно заключить, что применение стеклянного ровинга может быть экономически более целесообразно по сравнению с углеродными ровингами. Практически тот же самый армирующий эффект может достигаться за счет гораздо меньшей стоимости сырья, которая для стеклянных нитей является на порядок меньшей чем для углеродных. Другим аспектом при выборе исходного материала, в случае если мы все-таки хотим достичь как можно наибольшей прочности являются критические прочностные характеристики ровингов. Например, в случае применения в ответственных конструкциях, где требуется существенное снижение веса, и стоимость не имеет решающего значения. Тогда, как было показано выше, при применении углеродного ровинга определяющим фактором будет его прочность. Так образец, армированный

углеродным ровингом УР1, показал высокие прочностные характеристики, хотя имел меньшие значения прочности и модуля упругости. И наоборот образец УР2 с максимальной прочностью и модулем упругости показал минимальные значения в прочности при изгибе бетона. Как было отмечено выше, это главным образом связано с хрупкостью углеродных нитей и сложностью при их переработке. Таким образом, можно ввести понятие так называемых критических текстильных свойств высокопрочных нитей. То есть при достижении определенного уровня по прочности и жесткости, нить в дальнейшем не показывает удовлетворительных характеристик при переработке в композиты. Среди результатов данной работы такими критическими характеристиками свойств являются 1700-1870 МПа для прочности и 250-280 ГПа для модуля упругости. То есть дальнейший выбор предельных значений этих характеристик не целесообразен.

**В четвертой главе** приводятся результаты по исследованию механизма взаимодействия волокна и матрицы в ТАБ. С помощью испытаний на выдергивание исследовалось взаимодействие армирующего ровинга и бетонной матрицы. В качестве образцов были выбраны образцы с полимерными покрытиями: стеклоровинг (2400 текс); базальтовый ровинг (2400 текс) и углеродный ровинги (3200 текс), извлеченные из полотна с переплетением трико. Для сравнения помимо мелкозернистой матрицы испытания были проведены с использованием бетонной матрицы на основе гранулированного доменного шлака. Длина заглупления ровинга в матрицу составляла 20 мм.

Из диаграммы выдергивания (рис. 12а) видно, что максимальные нагрузки при выдергивании для ровингов близки по значению. Так как необходимым механизмом разрушения бетонных композитов является выдергивание волокнистой арматуры из матрицы, можно сделать вывод, что данные ровинги являются эффективными. Стеклоровинг показал наименьшую эффективность. Увеличение его прочности не сказалось бы на эффективности его работы в матрице, так как запас прочности остался бы неизрасходованным после выдергивания. В дополнении были испытаны короткие полипропиленовые волокна с насечкой. График зависимости имеет волнообразную форму, что характерно для волокон с негладкой поверхностью. При сравнении максимального усилия выдергивания в мелкозернистой бетонной матрице и матрице на основе гранулированного доменного шлака видно (рис. 12б), что в последнем случае наблюдается уменьшение максимальной силы при выдергивании, хотя характер деформирования остается неизменным. Результаты исследований показали, что доминирующим фактором является форма ровинга. Максимальной силой сцепления обладают ровинги, извлеченные из готовой армирующей структуры. Наилучшего сцепления достигает пропитанный ровинг и характеристики прочности и жесткости самого

ровинга не имеют решающего значения. Гладкий ровинг показывает минимальную прочность сцепления в обеих исследуемых матрицах.

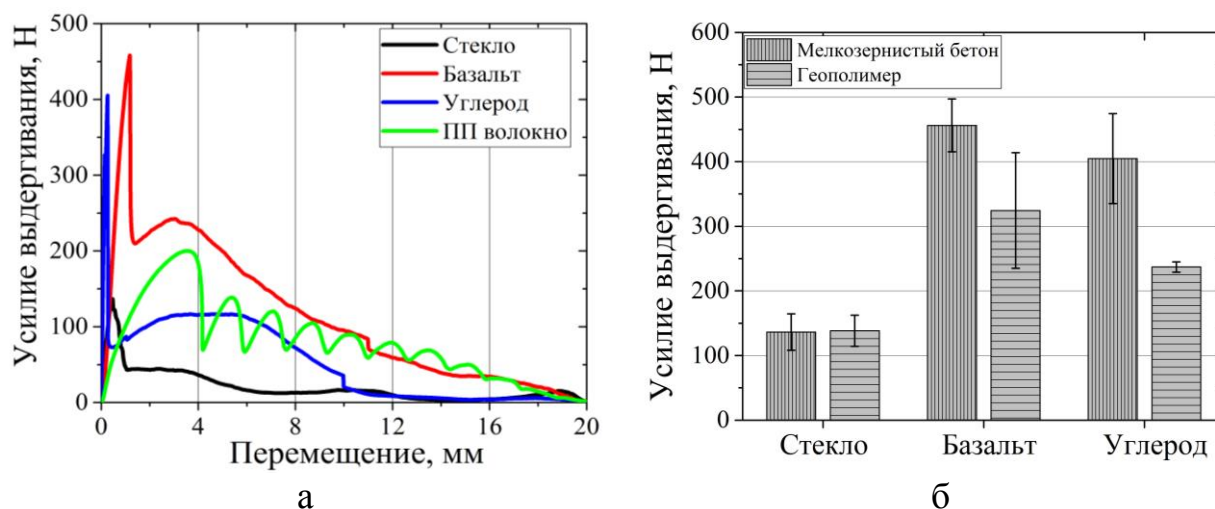


Рисунок 12 – Диаграммы выдергивания волокна и ровингов из бетона (а) и усилие выдергивания из двух типов матриц (б)

В главе 5 рассмотрены вопросы, связанные с предварительно напряженным бетоном с текстильной арматурой. Изготовлены образцы напряженного бетона с покрытыми эпоксидной смолой углеродным и стеклянным ровингами. Уровень предварительного напряжения составил 1/3 от максимальной прочности при растяжении ровинга. Выполнен анализ изменения формы поперечного сечения ровинга в зависимости от уровня приложенного напряжения. По результатам испытаний предложен метод определения критического значения предварительного напряжения на основе убывающей зависимости контактной длины и среднего радиуса от предварительного растяжения (рис. 13).

Указанные зависимости аналитически удобно задавать в виде:

$$l_{ct} = l_{\infty} + (l_0 - l_{\infty})e^{-t/t_s}, \quad (3)$$

$$r_{av} = r_{\infty} + (r_0 - r_{\infty})e^{-t/t_s}, \quad (4)$$

где  $l_{ct}$  и  $r_{av}$  – контактная длина и средний радиус соответственно;  $l_0$ ,  $r_0$  и  $l_{\infty}$ ,  $r_{\infty}$  – начальное и конечное значения;  $t$  – предварительное натяжение;  $t_s$  – значение предварительного натяжения, характеризующая данную зависимость.

Оптимальные значения по уравнениям (3) и (4) приведены в табл. 4. По полученным данным видно, что в переплетение трико наблюдается наиболее сильное влияние предварительного натяжения на форму арматуры.

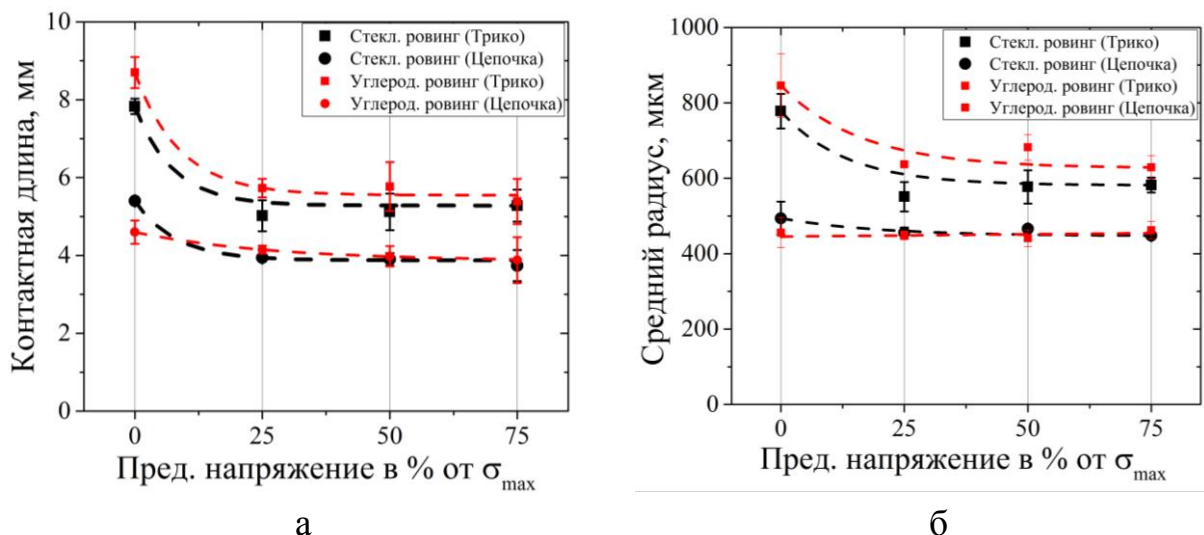


Рисунок 13 – Зависимость контактной длина (а) и среднего радиуса (б) ровинга в зависимости от предварительного напряжения

Таблица 4 – Параметр экспоненты в уравнениях (3) и (4)

|                  | Тип ровинга | Трико | Цепочка |
|------------------|-------------|-------|---------|
| Средний радиус   | стеклянный  | 13,1  | 19,7    |
|                  | углеродный  | 16,3  | -       |
| Контактная длина | стеклянный  | 7,5   | 8,0     |
|                  | углеродный  | 8,8   | 27,1    |

На рис. 14 показаны диаграммы чистого изгиба для образцов напряженного бетона и образцов без предварительного натяжения. Для образцов, армированных стекловолокном (рис. 14а), наблюдается некоторая схожесть в деформационном поведении. Для углеродного композита наблюдается значительное уменьшение прогиба (рис. 14б). Образец с напряженным ровингом демонстрирует меньший прогиб около 4 мм по сравнению с деформацией около 12 мм для армированного композита. После появления первой трещины кривая напряженного образца увеличивается почти линейно, пока не достигнута максимальная нагрузка. Вид кривой после предела пропорциональности имеет неровную форму, что указывает на наличие множества других трещин в образце.

Предел пропорциональности для композита со стекловолокном составляет 4,47 и 5,64 МПа для армированного и напряженного образцов соответственно. Для образцов композитов из углеродного ровинга предел пропорциональности составляет 8,72 и 10,26 для армированного. Так прочность при пределе пропорциональности увеличивается в 1,26 и 1,85 раза для образцов напряженного бетона их стеклянного и углеродного ровинга соответственно. Прочность на изгиб увеличивается примерно в 1,2 раза.

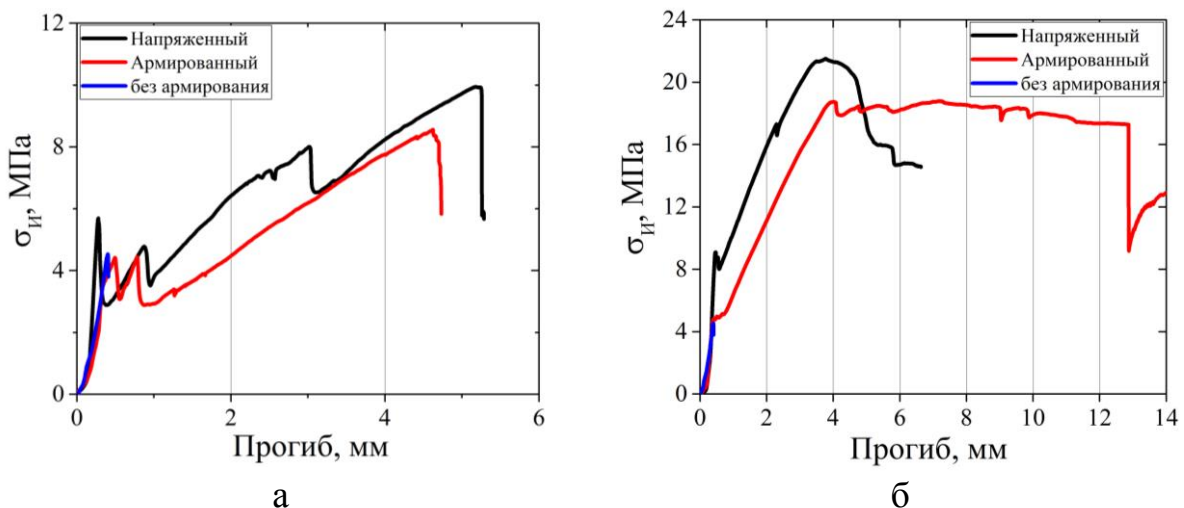


Рисунок 14 – Диаграммы изгиба напряженных бетонных композитов: (а) стеклоровинг, (б) углеродный ровинг

Проанализировано изменение формы поперечного сечения армирующих ровингов напряженном состоянии. Изменение строения сильнее всего затрагивает углеродный ровинг из-за меньшего диаметра филаментов и большего их количества (десятки тысяч) по сравнению со стеклоровингом (около тысячи). Это обуславливает большую миграцию филаментов, приводящую к значительному увеличению размеров поперечного сечения. Большая контактная длина является основным фактором, влияющим на механические характеристики композита.

**В шестой главе** приводятся результаты электромеханических измерений композиционных материалов с интегрированными в их структуру гибкими датчиками на основе электропроводящих углеродных ровингов. Предложены способы измерения при растяжении и изгибе образцов бетонных композитов, показана возможность их использования для измерения деформаций и мониторинга нагруженных состояний строительных конструкций.

Развитие систем измерения напряженно-деформированных состояний материалов и элементов конструкций является на сегодняшний день одной из наиболее актуальных направлений в строительстве. Мониторинг нагруженных состояний элементов конструкций является неотъемлемой частью задачи по поддержанию их в работоспособном состоянии в течение длительного периода эксплуатации. Как альтернатива обычным тензодатчикам, для измерения деформации могут использоваться различные электропроводящие волокнистые материалы в форме ровингов или нитей. Преимущество такой системы контроля состоит в использовании обычных углеродных ровингов широко используемых при армировании композиционных материалов. На рис. 15 представлены основные этапы подготовки углеродного ровинга для электромеханических измерений. Измерения на образцах бетонных



композитов с интегрированными в их структуру углеродными ровингами были произведены аналогично способу, примененному для измерения отдельных ровингов.

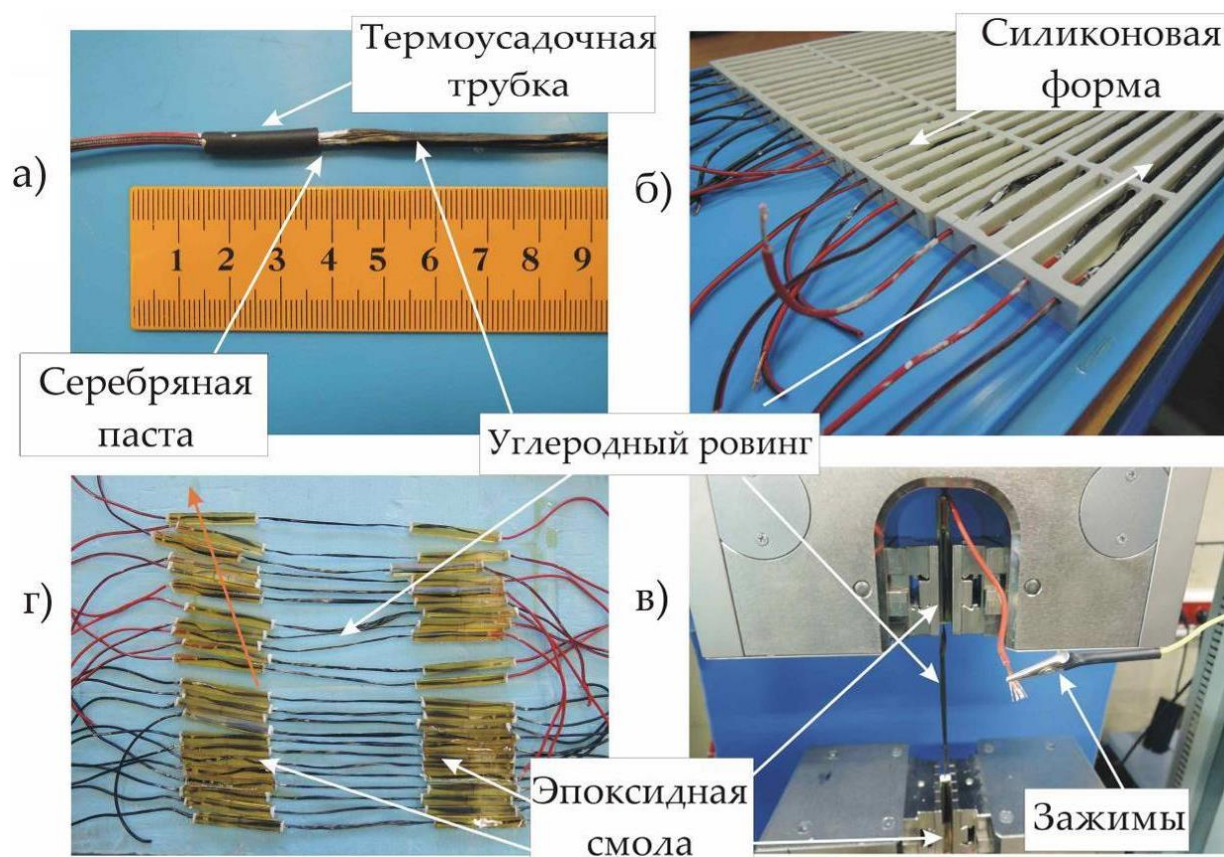


Рисунок 15 – Измерение электромеханических свойств углеродных ровингов: (а) соединение ровинга; (б) подготовка формы; (в) готовые образцы; (г) испытание на растяжение

На рис. 16 приведены результаты испытаний углеродных ровингов на растяжение до разрыва с одновременным измерением электрического сопротивления. Изменение электрического сопротивления представлено как функция деформации растяжения и показана в виде штриховой линии. Как видно из полученной кривой, на начальном участке кривой зависимость строго линейна и пропорционально возрастает до величины 0,8-1,2% относительной деформации. Затем начинается разрушение отдельных филаментов ровинга, что приводит к резкому увеличению электрического сопротивления. Высокий модуль упругости углеродного ровинга, практически сравнимый с модулем упругости стали, делает возможным проведение измерений на особо жестких образцах и конструкционных композитах.

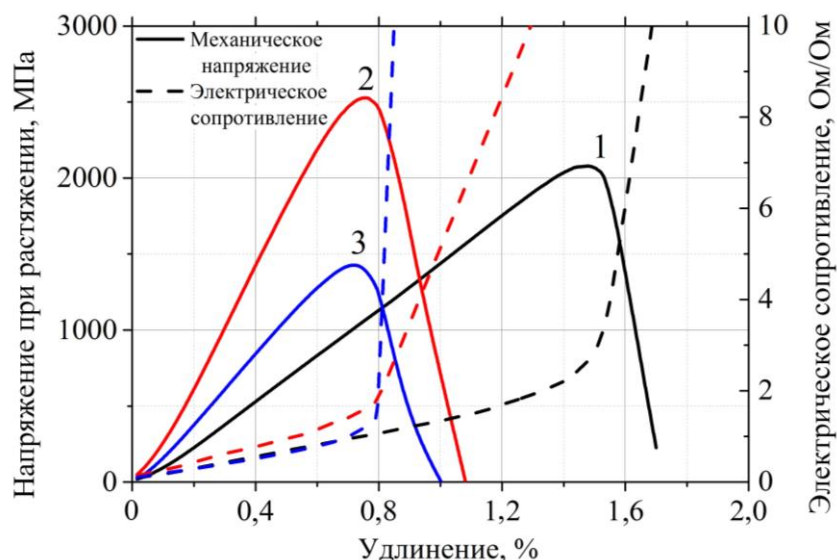


Рисунок 16 – Зависимость изменения электрического сопротивления от напряжения при растяжении углеродных ровингов

На рис. 17а представлен процесс измерения электрического сопротивления в образце бетона при растяжении. Образцы фиксировались в зажимах, а концы углеродного ровинга через соединительные провода выводились на измерительное устройство. На рис. 17б представлено измерение на образце бетона с сетчатым армирующим углеродным полотном на чистый изгиб. Измерения производилось в растянутой зоне образца.

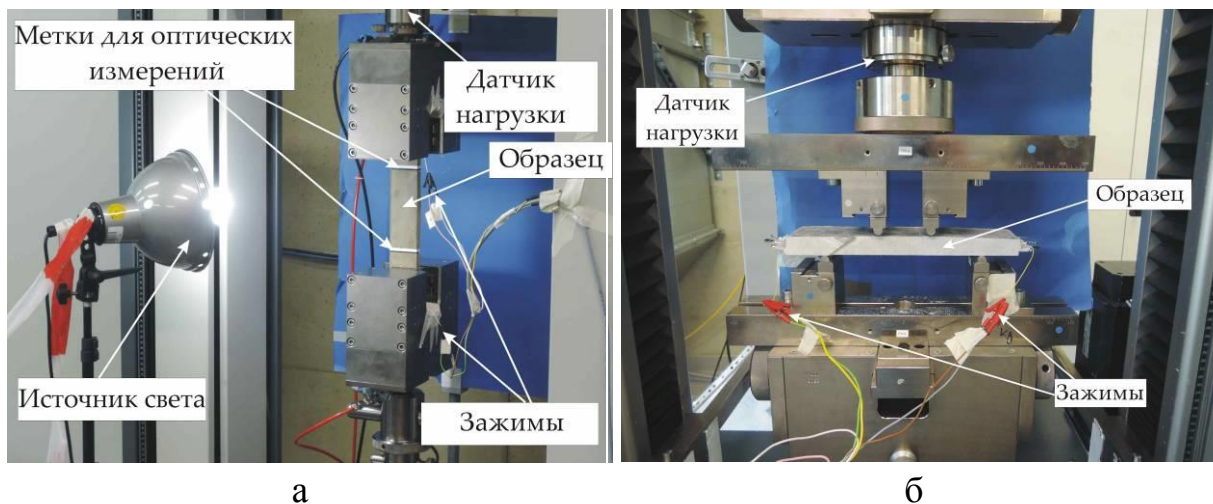


Рисунок 17 – Измерение электромеханических свойств бетонных композитов: (а) растяжение; (б) изгиб

На рис. 18а представлены результаты испытания на растяжение бетонного образца с одновременным измерением изменения электрического сопротивления ровинга внутри него. Электромеханическое

поведение ровинга в данном испытании аналогично предыдущим испытанием отдельных ровингов на растяжение.

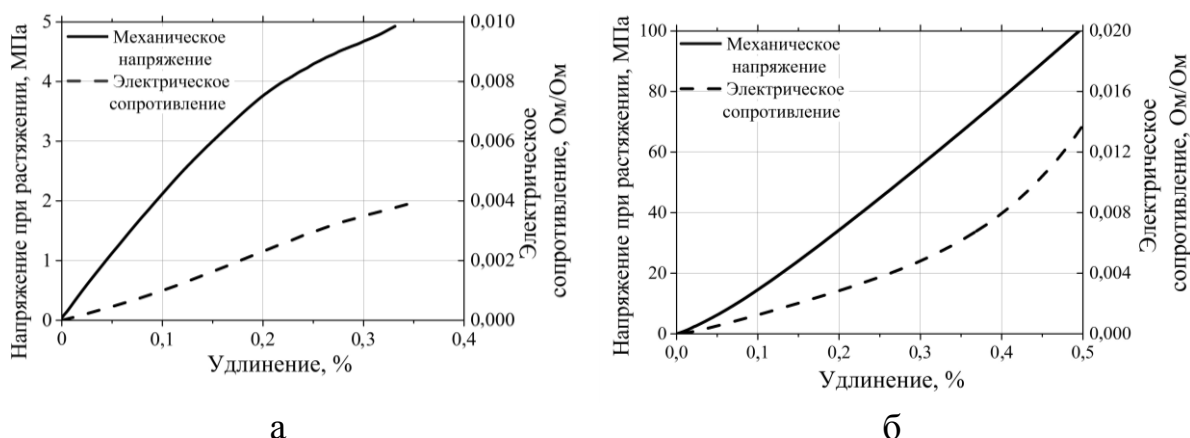


Рисунок 18 – Зависимость изменения электрического сопротивления от напряжения при растяжении для бетонного (а) и полимерного (б) композитов

Электрическое сопротивление увеличивается вместе с увеличением напряжения в бетонном образце. При этом, как кривую растягивающего напряжения, так и кривую электрического сопротивления можно условно разделить на два участка. Первый участок с деформацией примерно до 0,2% представляет собой линейный участок, соответствующий закону Гука. На втором же участке происходит некоторое отклонение от линейности. Кривая становится полой, модуль упругости уменьшается, что в определенный момент приводит к разрушению образца. При этом кривая электрического сопротивления примерно повторяет кривую напряжения. Первый участок также соответствует прямой пропорциональности, что может быть использовано для определения напряжения растяжения при соответствующем электрическом отклике. На втором же участке кривая электрического сопротивления также становится полой, и точка перегиба примерно соответствует точке перегиба на диаграмме растяжения. Для того чтобы подтвердить работоспособность углеродного ровинга в качестве тензодатчика были проведены аналогичные эксперименты на образцах полимерных композитов (эпоксидная смола/стекло). Результаты испытаний представлены на рис. 22б. Для сравнения кривая деформирования приведена в начальной зоне до 0,5%. Электромеханическая реакция ровинга в полимерном композите в начальной зоне деформирования является достаточно схожей с кривой деформирования бетонного композита. До деформации 0,2-0,25% наблюдается линейная зависимость в электрическом сопротивлении. Затем идет резкий рост электрического сопротивления, видимо вызванный разрушением отдельных филаментов ровинга.



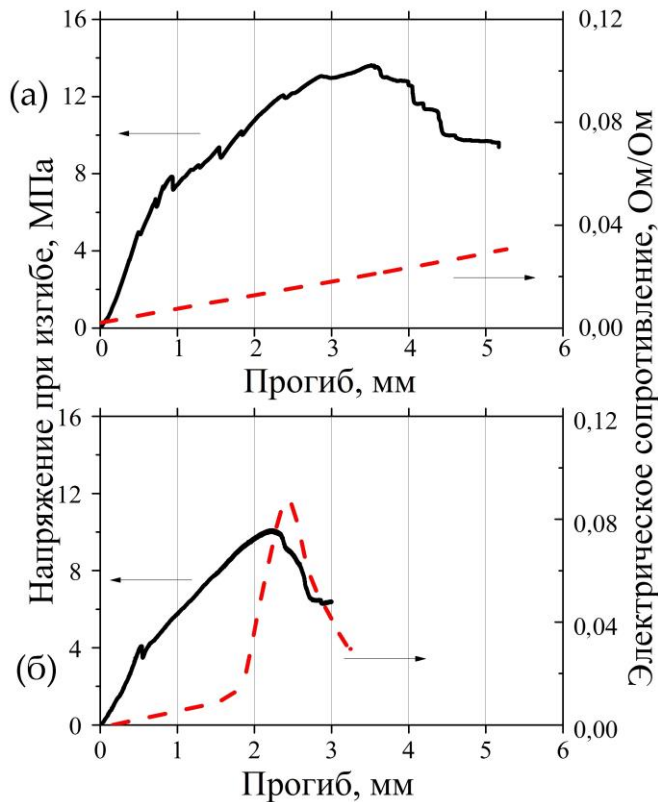


Рисунок 19 – Разница в поведении электрического сопротивления для образцов бетона: (а) переплетение трико (б) переплетение цепочка

На рис. 19 показаны результаты испытаний бетона на чистый изгиб с одновременной интеграцией основязаного полотна с углеродным ровингом в качестве датчика. К сожалению, в данном случае не удастся исключить эффект влияния армирования полотном на результаты из-за малых размеров исследуемых балок. Кроме того, характер поведения при изгибе существенно различался для двух исследуемых образцов. Принципиально можно выделить следующее. Для образца с переплетением трико (рис. 19а) наблюдается возрастание электрического сопротивления на

протяжении всей деформации с практически линейной зависимостью. В противоположность этому для образца переплетения цепочка (рис. 19б) наблюдается сначала незначительное увеличение сопротивления близкое к линейной зависимости, а затем оно резко возрастает. При этом максимальный пик соответствует пику разрушения самого бетонного композита. Далее следует резкое падение сопротивления с одновременным падением нагрузки.

На рис. 20 представлены этапы изготовления тонкостенной панели с возможностью мониторинга нагруженного состояния. Вначале изготавливается специальная форма. Производится укладка бетонной смеси на небольшую высоту (рис. 20а). На этом же этапе монтируется электропроводящий углеродный ровинг. Производится укладка второго слоя бетона (рис. 20б). Устанавливают армирующее полотно и вновь укладывают бетонную смесь (рис. 20в). На рис. 20г показан пример готовой тонкостенной плиты. Подобные системы могут использоваться для мониторинга нагруженного состояния строительных конструкций зданий и сооружений. Еще одним аспектом применения такой системы может служить пример усиления существующих конструкций, где

подобное полотно может внедряться в качестве арматуры. Тогда одновременно с функцией усиления возможно получать информацию о текущем состоянии конструкции.

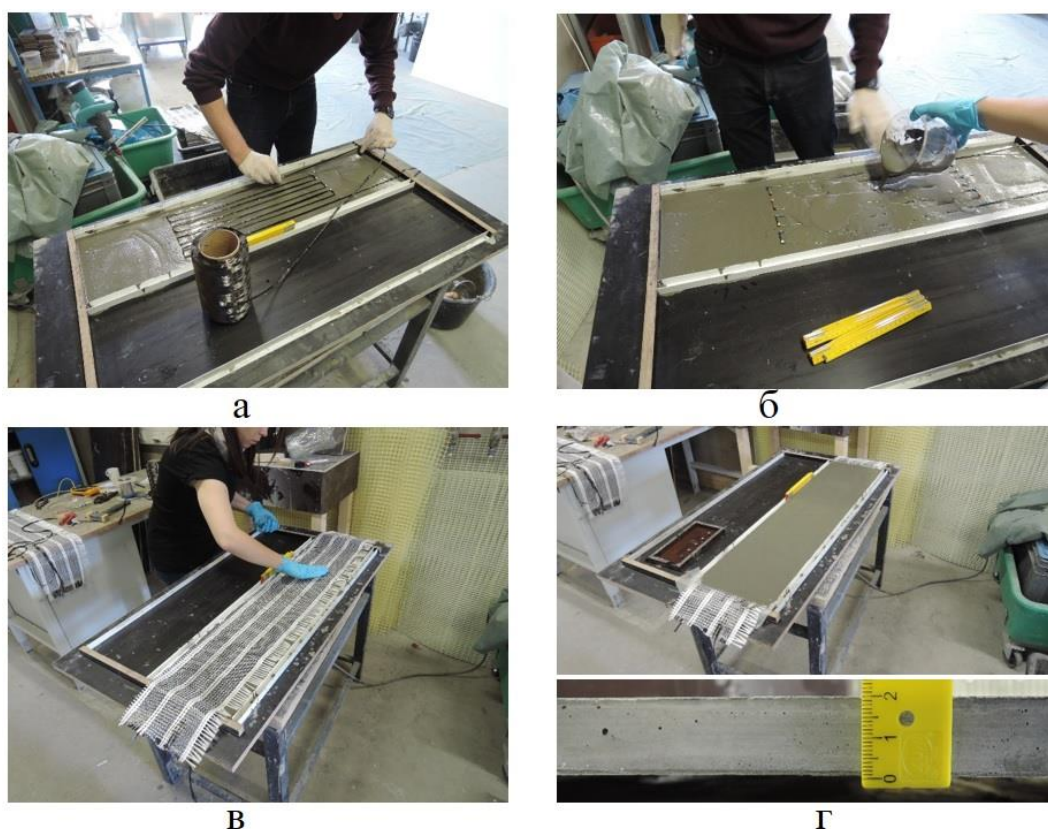


Рисунок 20 – Технологический процесс изготовления тонкостенной панели с возможностью мониторинга нагруженного состояния

**В седьмой главе** рассмотрены вопросы, касающиеся проектирования, расчета и эксплуатации текстильно-армированных бетонных конструкций. Исследованы основные этапы проектирования конструктивных элементов различной формы, долговечность конструкций зданий и сооружений из ТАБ, факторы, влияющие на долговечность. Разработаны рекомендации по применению текстильной арматуры для армирования бетонных композитов.

На рис. 21 показаны примеры возможной реализации строительных конструкций из ТАБ. В основе предлагаемой технологической цепочки лежат два возможных варианта реализации. На начальном этапе каждого из вариантов лежит выбор исходного сырья (ровинг или гибридная нить). Далее продвигаясь по предложенной цепочке, мы переходим на следующий иерархический уровень строения – полотно. Здесь, помимо разработки необходимой структуры полотна, можно выполнить определенную модификацию армирующей структуры для придания специальных свойств. После того как армирующая структура готова

имеются два принципиально разных подхода для реализации ТАБ. В первом подходе реализуется изготовление готовых изделий на примере ЖБИ. Это классический вариант реализации бетонных изделий и на данный момент он уже реализован в нескольких коммерческих примерах. На рис. 22 представлена разрабатываемая по такому способу сэндвич-панель.

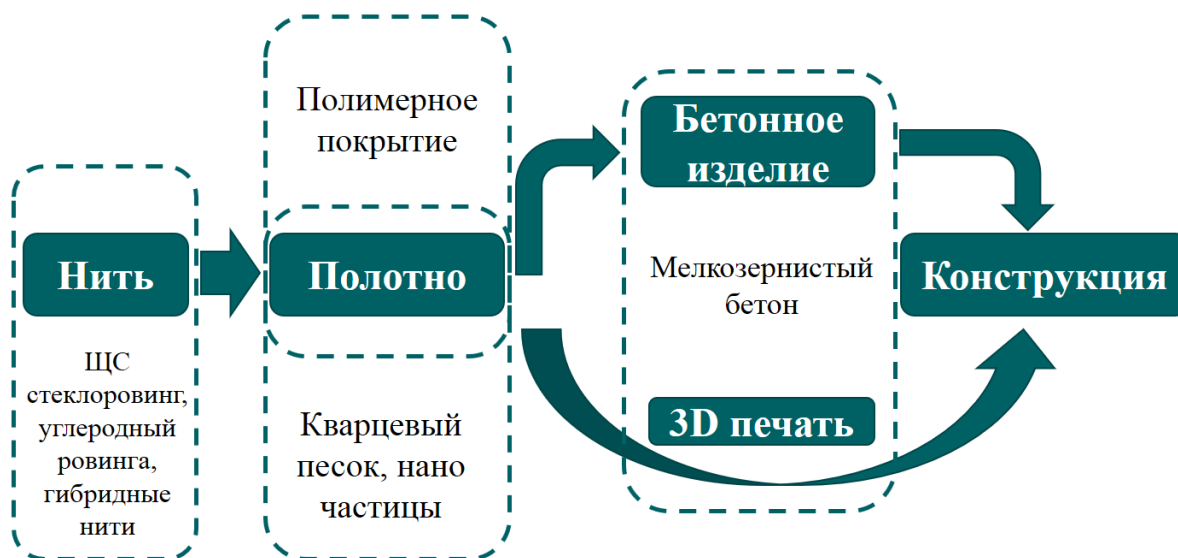
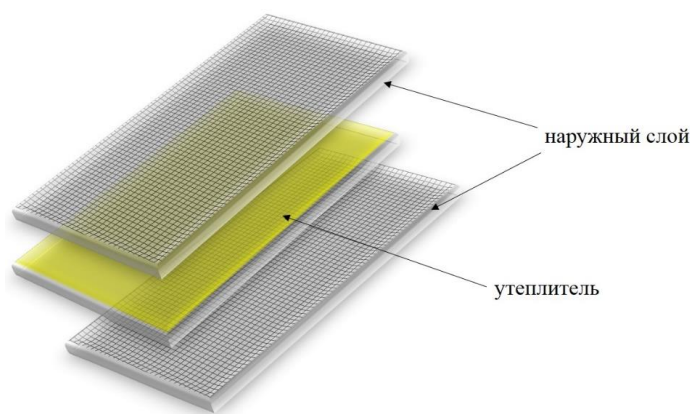


Рисунок 21 – Схематичное представление возможности реализации строительных конструкций из ТАБ



а



б

Рисунок 22 – Сэндвич-панель

Второй подход состоит в использовании текстильной арматуры для 3D печати бетонных конструкций. То есть в предлагаемой концепции мы избегаем одного промежуточного шага – изготовления изделия. Вместо этого армирующее полотно доставляется на строительную площадку и при помощи экструдера и устройства для придания формы и укладки полотна изготавливается конструкция. На сегодняшний день уже на практике реализованы строительные 3D



принтеры, позволяющие печатать с применением коротких волокон [16]. Перспективным дополнением к таким принтерам будет раскладчик текстильной арматуры, который, например, из узкого полотна на месте будет образовывать пространственную форму для последующего обеспечения горизонтального и вертикального армирования. Основная сложность реализации такой идеи состоит в придании необходимой формы армирующему каркасу. На рис. 23а и б представлен прототип 3D армирующего каркаса для печати бетоном. Данный армирующий каркас разделен на три части. Боковые части предназначены для заполнения бетонным раствором в то время как средняя часть остается пустой. При изготовлении, армирующее полотно будет сматываться с паковки и поступать в направляющее устройство в котором ему будет придаваться нужная форма. Затем сформованный каркас подается в экструдер и боковые части заполняются быстротвердеющей бетонной смесью. Печать производится по заданной программе слоями. Ширина армирующего полотна может легко подбираться в зависимости от ширины готовой стеновой конструкции. На рис. 23в и г представлен прототип готовой конструкции. Основным препятствием печати таких конструкций может явиться проникновение бетонного раствора в пустоты средней части. В то же время использование других переплетений с более плотными ячейками будет ограничивать формообразование конструкции. Поэтому остановившись на варианте полотна с открытыми ячейками необходимо исключить нежелательное проникновение бетона.

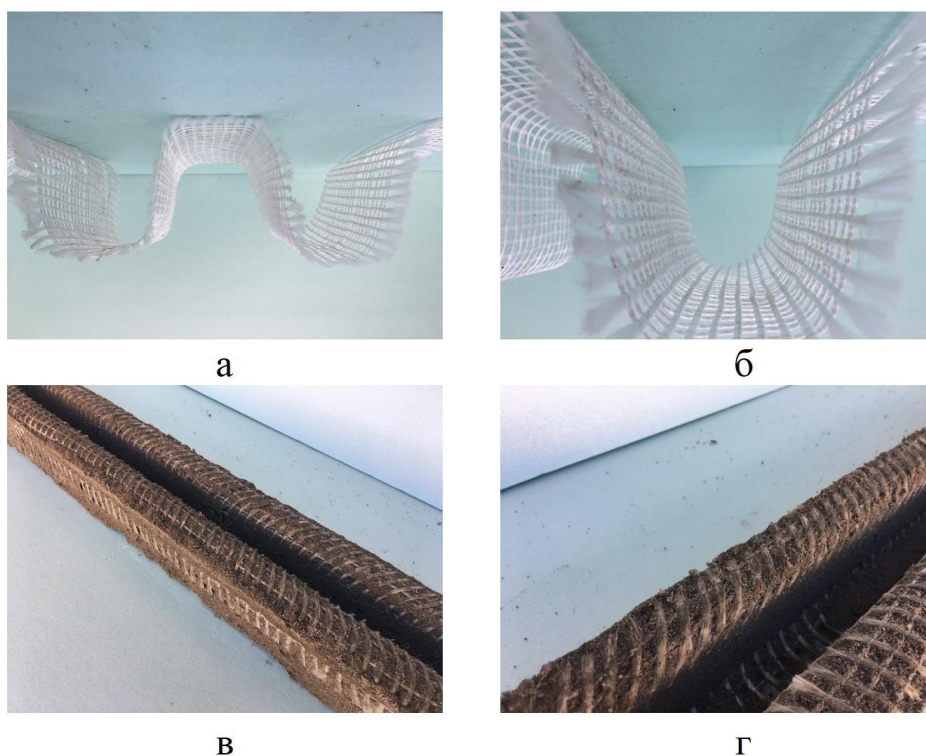


Рисунок 23 – Прототип 3D печатной ТАБ конструкции

Проектирование армирующего полотна осуществляется по следующему методу, который устанавливает способ расчета для различных высокопрочных ровингов. Исходные данные для расчета включают размеры ячейки А и В в мм, форму строения внутренней ячейки армирующего полотна, необходимую прочность на растяжение полотна. В качестве основы для расчета берется структура с переплетением цепочка.

Сначала производится расчет количества ровингов в продольном и поперечном направлениях по формулам (5) и (6)

$$N_m = \frac{\text{Ш}}{A + A_1\eta} \quad (5)$$

$$N_s = \frac{\text{Ш}}{B + B_1\eta} \quad (6)$$

где Ш – ширина полотна, м; А и В – размеры ячейки, мм; А<sub>1</sub> и В<sub>1</sub> – ширина ровинга для переплетения цепочка; η – коэффициент, учитывающий тип переплетения полотна (принимается η=1 для переплетения цепочка и η=2,6 для переплетения трико и сукно).

Прочность ровинга в армирующем полотне для продольного и поперечного направления определяется по формуле (7)

$$\sigma_p = \sigma_n \lambda \quad (7)$$

где σ<sub>p</sub> – прочность армирующего ровинга, МПа; σ<sub>n</sub> – прочность армирующего полотна, МПа; λ – фактор эффективности реализации прочностных свойств (принимается λ =0,8 для переплетения трико и сукно и λ =0,7 для переплетения цепочка).

В заключении главы приводятся рекомендации по определению расчетного срока службы ТАБ конструкции. Расчетный срок должен определяться принимая во внимание особенности строения и свойства текстильной арматуры. Особая роль отводится понижающим коэффициентам долговечности, которые наряду с коэффициентом запаса вносят существенный вклад в определение допускаемых напряжений. Расчетного срок службы определяется по формуле

$$R = \frac{R_n}{c_1 \cdot c_2 \cdot c_3 \cdot \gamma} \quad (8)$$

где R<sub>n</sub> - кратковременная прочность при испытании на растяжение или изгиб, МПа; γ – коэффициент запаса, принимается равным 1,5 [22]; c<sub>1</sub>.....c<sub>i</sub> – понижающие коэффициенты, учитывающие влияние различных факторов (c<sub>1</sub> – понижающий коэффициент, учитывающий механические

повреждения текстильной арматуры при изготовлении и деформировании;  $c_2$  – понижающий коэффициент, учитывающий воздействие агрессивных сред;  $c_3$  – понижающий коэффициент, учитывающий влияние ползучести).

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Основные научные результаты, полученные при выполнении работы:

1 Выполнены исследования механических свойств широкого круга новых и перспективных видов армирующих материалов для бетонных композитов. Исследуемые материалы включали в себя волокна и нити различного строения, текстильные полотна и бетонные композиты на их основе. Разработан принципиально новый подход к выполнению измерений механических свойств текстильной арматуры и установления их взаимосвязи с внутренним строением.

2 Исследовано строение и свойства новых и перспективных видов высокопрочного армирующего текстиля. Предложены новые технические решения, позволяющие обеспечить повышение эффективности применения армирующих полотен в композитах на основе анализа различий в их внутреннем строении. Усовершенствованы способы подготовки образцов различных видов текстильной арматуры для механических испытаний, позволяющие существенно повысить воспроизводимость результатов измерений. Выполненный анализ расположения волокон в поперечных сечениях армирующих ровингов позволил связать значения характеристик строения формы сечения ровинга и механических свойств армирующего полотна.

3 Разработаны методологические основы повышения эффективности реализации механических свойств текстильной арматуры на различных структурных уровнях строения. Предложена концепция технологического регулирования строения и механических свойств ТАБ. На основе накопленных сведений по экспериментальным измерениям получены технически-обоснованные результаты, позволяющие регулировать строение и механические свойства ТАБ, что вносит существенный вклад в решении крупной научной проблемы – получение бетонных композитов на их основе с заданным комплексом механических свойств. Получены значения оптимальных характеристик армирующих ровингов для экономически обоснованного использования в ТАБ.

4 Проведены исследования по определению механики взаимодействия волокна и матрицы в ТАБ. Выполнены измерения при выдергивании различных типов структур армирующих ровингов. Установлено влияние состава матрицы, типа текстильной структуры, вида ровинга и его механических свойств на адгезионные свойства при взаимодействии с армирующим ровингом. Показано, что ключевым фактором является строение текстильной арматуры.

5 Получены образцы напряженного бетона, усиленные стеклянными и углеродными ровингами. Установлена корреляция между строением армирующего ровинга и механическими характеристиками образцов бетонных композитов, позволяющая обеспечить эффективность армирования за счет оптимизации параметров армирующей структуры. Предложен универсальный подход для оценки деформированной структуры при разных уровнях растяжения.

6 Усовершенствован перспективный метод измерений механических свойств конструкционных композитов с использованием электропроводящих углеродных нитей. Проведена апробация на образцах бетонных и полимерных композитов. Возможность использования углеродных ровингов в качестве тензометрических датчиков продемонстрирована посредством измерений при испытаниях на растяжение и чистый изгиб. Изготовлены опытные концептуальные образцы тонких бетонных панелей с одновременной функцией мониторинга.

7 Разработан и изготовлен опытный образец сэндвич-панели, состоящий из теплоизоляционного утеплителя и двух наружных слоев. Детализированы технологические процессы изготовления ТАБ. Предложена концепция 3D печати с применением непрерывной текстильной арматуры. Разработан прототип армирующего каркаса для печати бетоном и изготовлен опытный образец стеновой конструкции. Исследованы основные этапы проектирования конструктивных элементов различной формы, долговечность конструкций зданий и сооружений из ТАБ, факторы, влияющие на долговечность. Разработаны рекомендации по применению текстильной арматуры для армирования бетонных композитов.

### **Список цитируемых источников**

1 Тамразян, А.Г. Оценка надежности железобетонных конструкций, усиленных углепластиковым внешним армированием / А.Г. Тамразян, Н.В. Федорова // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2016. – №6. – С.226–231.

2 Окольникова, Г.Э. Применение базальтовой и углеродной сетки при реконструкции зданий и сооружений / Г.Э. Окольникова, Г.И. Тихонов, Д.А. Бронников, И.С. Васильев // Системные технологии. – 2019. – №2. – С.14–18.

3 Лапшинов, А.Е. К влиянию поперечного армирования на прочность и деформативность сжатых бетонных элементов, армированных композитной полимерной арматурой / А.Е. Лапшинов, А.Г. Тамразян // Строительство и реконструкция. – 2018. – №4. – С.20–30.

4 Окольникова, Г.Э. Перспективы использования композитной арматуры в строительстве / Г.Э. Окольникова, С.В. Герасимов // Экология и строительство. – 2015. – №3. – С.14–21.

- 5 Ключев, С.В. Высокопрочный фибробетон для промышленного и гражданского строительства / С.В. Ключев // Инженерно-строительный журнал. – 2012. – №8. – С.61–66.
- 6 Хежев, Х.А. Гипсобетонные композиты, армированные базальтовыми волокнами / Х.А. Хежев, Ю.В. Пухаренко // Вестник гражданских инженеров. – 2013. – №2. – С.152–156.
- 7 Пухаренко, Ю.В. Физико-механическое моделирование процессов деформирования и разрушения цементного композита, армированного синтетической макрофиброй / Ю.В. Пухаренко, М.П. Кострикин // В книге: Современные материалы и передовые производственные технологии (СМПТТ-2019). Тезисы докладов международной научной конференции. – 2019. – С.37–38.
- 8 Bazhenov, Yu.M. Ways to improve properties of high-strength building polymer composites / Yu.M. Bazhenov, D.K.S. Bataev, S.A.Yu. Murtazaev и др. // В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 3rd International Symposium on Engineering and Earth Sciences (ISEES 2020). 2020. – С. 012006.
- 9 Duong, T.Q. Possibilities and limitations of high-strength lightweight fiber-reinforced concrete structures / T.Q. Duong, N.T. Vu, A.S. Inozemtcev, E.V. Korolev // В сборнике: Journal of Physics: Conference Series. Collection of Materials of the International Scientific Conference MMSA-2019. Moscow State University Of Civil Engineering (National Research University). – 2019. – С. 012067.
- 10 Иноземцев, А.С. Сравнительный анализ влияния наномодифицирования и микродисперсного армирования на процесс и параметры разрушения высокопрочных легких бетонов / А.С. Иноземцев, Е.В. Королев // Строительные материалы. – 2017. – №7. – С.11–15.
- 11 Семенов, В.С. Свойства облегченных строительных растворов с дисперсным армированием / В.С. Семенов, Т.А. Розовская, А.Ю. Губский, Р.Р. Губская // Промышленное и гражданское строительство. – 2016. – №10. – С.120–124.
- 12 Лесовик, В.С. Текстиль-бетон - эффективный армированный композит будущего / В.С. Лесовик, Д.Ю. Попов, Е.С. Глаголев // Строительные материалы. – 2017. – №3. – С.81–84.
- 13 Попов, Д.Ю. Состояние и перспективы применения текстиль-бетона / Д.Ю. Попов // Промышленное и гражданское строительство. – 2018. – №3. – С.51–57.
- 14 Peled, A. / Textile reinforced concrete: монография / A. Peled, A. Bentur, B. Mobasher – Boca Raton: CRC Press. Taylor and Francis Group, 2017. – 473 с.
- 15 Ключев, С.В. Фибробетон для 3-D аддитивных технологий / С.В. Ключев, А.В. Ключев, Е.С. Шорстова // Строительные материалы и изделия. – 2019. – №4. – С.14–20.
- 16 Khan, M. 3-D printing of concrete: Beyond horizons / M.S. Khan, F. Sanchez, H. Zhou // Cement and Concrete Research. –2020. – №133. – 106070.
- 17 Shams, A. Experimental investigations on textile-reinforced concrete (TRC) sandwich sections / A. Shams, M. Horstmann, J. Hegger // Composites Structures. –2014. – №118. – С. 643–653.
- 18 Hegger, J. Spatial textile reinforcement structures for ventilated and sandwich façade elements / J. Hegger, C. Kulas, M. Horstmann // Advances in Structural Engineering. – 2016. – №4. – С. 665–676.
- 19 Scholzen, A. Thin-walled shell structure made of textile reinforced concrete—Part I: structural design and construction / A. Scholzen, R. Chudoba, J. Hegger // Structural Concrete. – 2015. – №16. – С.106–114.
- 20 Hearle, J.W.S. On Some General Features of a Computer-Based System for Calculation of the Mechanics of Textile Structures / J.W.S. Hearle, M. Konopasek, A. Newton // Textile Research Journal. – 1972. – №4. – С. 613–626.



21 Chiu, S.H. Fiber recognition and distribution analysis of PET/Rayon composite yarn cross sections using image processing techniques / S.H. Chiu, J.Y. Chen, J.H. Lee // Textile Research Journal. – 1999. – №6. – С. 417–422.

22 Hegger, J. Textilbeton: Tragverhalten – Bemessung – Sicherheit / J. Hegger, N. Will, M. Schneider // 6th Colloquium on Textile Reinforced Structures (CTRS6), Berlin, Germany. –2011. – № – С. 269–284.

### **Основные положения диссертации опубликованы в работах: Монография**

Gries, T. Manufacturing of textiles for civil engineering applications / T. Gries, M. Raina, T. Quadflieg, O. Stolyarov: в монографии Textile Fibre Composites in Civil Engineering; под.общ. ред. Т. Triantafillou – Cambridge: Elsevier, 2016. – С.3–24.

### **Статьи в журналах, входящих в «Перечень...» ВАК РФ, журналах, индексируемых в WoS, Scopus по направлению исследований:**

1 Столяров, О.Н. Углеродные волокна в строительстве мостов / О.Н. Столяров, В.Я. Ольшевский, А.Е. Донцова, Ю.А. Демидова // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2019. – №3. – С.36–49.

2 Kirsanov, A.I. Mechanical properties of synthetic fibers applied to concrete reinforcement / A.I. Kirsanov, O.N. Stolyarov // Инженерно-строительный журнал. – 2018. – №4. – С.15–23.

3 Quadflieg, T. Effect of coating type on the mechanical performance of warp-knitted fabrics and cement-based composites / T. Quadflieg, S. Leimbrink, T. Gries, O. Stolyarov // Journal of Composite Materials. – 2018. – №19. – С. 2563–2576.

4 Полегуев, Р.А. Механические повреждения геосинтетических материалов при установке / Р.А. Полегуев, Н.С. Глебов, О.Н. Столяров // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2017. – №12. – С.97–112.

5 Quadflieg, T. Influence of the fabric construction parameters and roving type on the tensile property retention of high-performance rovings in warp-knitted reinforced fabrics and cement-based composites / T. Quadflieg, O. Stolyarov, T. Gries // Journal of Industrial Textiles. – 2017. – №4 – С.453–471.

6 Quadflieg, T. Carbonfaserbewehrung als Sensor für Bauwerke / Beton- und Stahlbetonbau // T. Quadflieg, O. Stolyarov, T. Gries. – 2017. №8. – С. 541–544.

7 Stolyarov, O. Characterization of shear behavior of warp-knitted fabrics applied to composite reinforcement / O. Stolyarov, T. Quadflieg, T. Gries // The Journal of the Textile Institute. – 2017. –№ 1. – С.89–94.

8 Quadflieg, T. Characterization of warp-knitted reinforcing fabrics and cement-based composites: Influence of yarn and stitch types on mechanical

performance / T. Quadflieg, O. Stolyarov, T. Gries // In: Fiber Society 2017 Spring Conference: Next Generation Fibers for Smart Products. – 2017. – С.108–110.

9 Quadflieg, T. Carbon rovings as strain sensors for structural health monitoring of engineering materials and structures / T. Quadflieg, O. Stolyarov, T. Gries // The Journal of Strain Analysis for Engineering Design. –2016. – №7. – С.482–492.

10 Quadflieg, T. Strain measurement in concrete using embedded carbon roving-based sensors / T. Quadflieg, T. Gries, O. Stolyarov // Materials Testing, – 2016. – №9. – С. 767–771.

11 Volkova, A. Flexural behavior of textile-reinforced concrete / A. Volkova, A. Paykov, S. Semenov, O. Stolyarov, B. Melnikov // MATEC Web Conference. – 2016. – №53.

12 Волкова, А.А. Структура и свойства текстильно-армированного бетона / А.А. Волкова, А.В. Пайков, О.Н. Столяров, С.Г. Семенов, Б.Е. Мельников // Инженерно-строительный журнал. – 2015. – №7. – С.50–56.

13 Stolyarov, O. Effects of fabric structures on the tensile properties of warp-knitted fabrics used as concrete reinforcements / O. Stolyarov, T. Quadflieg, T. Gries // Textile Research Journal. – 2015. – №2. – С.1934–1945.

14 Stolyarov, O. A study of warp-knitted fabric structure parameters affecting the mechanical properties of textile-reinforced concrete / O. Stolyarov, T. Quadflieg, T. Gries // ICCM 20: 20th International Conference on Composite Materials, Copenhagen, Denmark, 19th - 24th July 2015.

15 Логинова, И.И. Влияние структуры на вязкоупругие свойства геосинтетических материалов статья / И.И. Логинова, Д.А. Артамонова, О.Н. Столяров, Б.Е. Мельников // Инженерно-строительный журнал. – 2015. – №4. – С.11–18.

16 Столяров, О.Н. Применение высокопрочных текстильных материалов в строительстве / О.Н. Столяров, А.С. Горшков // Инженерно-строительный журнал. – 2009. – №4. – С.21–25.

### **Другие публикации в журналах**

17 Столяров, О.Н. Основовязанные пространственные полотна для армирования конструкционных композитов. Часть 1: Технология изготовления / О.Н. Столяров, Т.А. Крячкова // Известия вузов. Технология легкой промышленности. – 2009. – №3. – С.45–48.

18 Столяров, О.Н. Основовязанные пространственные полотна для армирования конструкционных композитов. Часть 2: Поведение при осевом сжатии / О.Н. Столяров, Т.А. Крячкова // Известия вузов. Технология легкой промышленности. – 2009. – № 4. – С.37–39.

19 Столяров, О.Н. Разработка структур кулирного трикотажа из базальтовых нитей / О.Н. Столяров, А.В. Труевцев // Вестник Санкт-

Петербургского государственного университета технологии и дизайна. – 2008. – №15. – С. 78–79.

20 Столяров, О.Н. Технология производства вязаных полотен из текстильных нитей с высокими значениями деформационной жесткости / О.Н. Столяров // Известия вузов. Технология легкой промышленности. – 2008. – №1. – С.49– 52.

21 Столяров, О.Н. Структура и свойства кулирного трикотажа из высокопрочных арамидных нитей для армирования композитов / О.Н. Столяров, А.В. Труевцев // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. – 2007. – №14. – С.43–46.

### **Труды конференций**

22 Столяров, О.Н., Изменение структуры текстильных армирующих полотен при растяжении // Сборник докладов международной конференции «Деформирование и разрушение композиционных материалов и конструкций DFСM-2018», ИМАШ, РАН, Москва, Россия, 23-25 Октября 2018 г. – С. 133-135.

23 Кирсанов, А.И. Ползучесть полипропиленовых волокон, применяемых для армирования бетона / А.И. Кирсанов, О.Н. Столяров // В сборнике: Неделя науки СПбПУ Материалы научной конференции с международным участием. Инженерно-строительный институт. 2018. – С. 276-278.

24 Quadflieg, T. Utilization of Carbon Fibres in Reinforced Concrete as Integrated Sensor / T. Quadflieg, T. Gries, O. Stolyarov // Сборник докладов международной конференции Performance-based approaches for concrete structures, Кейптаун, ЮАР, 21–23 ноября 2016 г, – 2016. – С. 483–484.

25 Столяров, О.Н. Взаимосвязь строения и механических свойств текстильно-армированных композиционных материалов / О.Н. Столяров, Мельников Б.Е. // Сборник докладов международной конференции «Деформирование и разрушение композиционных материалов и конструкций DFСM-2016», ИМАШ, РАН, Москва, Россия, 18–20 Октября 2016 г. – С. 179–181.

26 Stolyarov, O. A comparative study of the structure and the installation damage of geosynthetics / O. Stolyarov, A. Baranov, A. Deviatilov // 10<sup>th</sup> International Conference on Geosynthetics, Berlin, Germany, 21-25 September 2014.

27 Stolyarov, O. Analysis of the structure and time-dependent mechanical behaviour of textile fabrics / O. Stolyarov, S. Semenov // 13<sup>th</sup> AUTEX World Textile Conference, Dresden, May 22-24. – 2013. – С.37.

28 Девятилов, А.Н. Методы определения долговечности геосинтетических материалов / А.Н. Девятилов, О.Н. Столяров, А.Ю.

Баранов // Симпозиум Технический текстиль Россия, Москва, 19 апреля 2013.

29 Stolyarov, O. Analysis of buckling behaviour the 3D spacer fabrics under axial compression / O. Stolyarov // Proceedings of The XXXVII International Summer School - Conference “Advanced Problems in Mechanics”, St. Petersburg, June 30 –July 5, – 2009.

30 Столяров, О.Н. Моделирование деформационных свойств технического текстиля / О.Н. Столяров // Сборник материалов конференции «Актуальные проблемы проектирования автомобильных дорог и искусственных сооружений», Санкт-Петербург, 14-15 февраля – 2008. – С. 105–106.

31 Stolyarov, O. Structure and mechanical properties of the weft-knitted aramid fabrics for composite reinforcement / O. Stolyarov // Proceedings of 2<sup>nd</sup> Aachen-Dresden International Textile Conference, Dresden, December 04-05, – 2008. – С. 182.

32 Столяров, О.Н. Инженерное проектирование текстильных конструкционных композитов с повышенной удельной прочностью и жесткостью / О.Н. Столяров // XVIII Петербургские чтения по проблемам прочности, Санкт–Петербург, 21–24 октября 2008 г, ч. II, с. 94–95.

#### **Патент**

Пат. 2361983. Российская Федерация, E04C 5/07, E04B 2/10. Сетка арматурная для кирпичных конструкций / А.С. Горшков, О.Н. Столяров, А.Г. Макаров, А.С. Буланый; заявл. 29.01.2008; опубл. 20.07.2009. Бюл. №20.