

Особенности проектирования мостовых сооружений из композитных материалов

Н.С. Любин, В.О. Герасимова, А.А. Коробкова

Тульский государственный университет, Тула

Аннотация: В статье рассматривается использование армированных волокон полимеров (FRP – Fibre-reinforced plastic – также называемых армированными полимерами) в архитектурном и конструкционном проектировании мостов на примере сооружений в Нидерландах. Представлена химическая структура этого материала – полимерная матрица, армированная натуральными или искусственными волокнами. Дана краткая историческая справка применения композитных материалов, проведен сравнительный анализ сооружений из нового строительного материала и традиционного по нескольким критериям: масса конструкции, срок эксплуатации, стоимость, экономия затрат на обслуживании, экологичность, эстетичность и др. Обсуждаются проблемы и возможности этого относительно нового материала, как для архитектора, так и для инженера. Предложены варианты конструктивных решений для мостостроения нового поколения: ручное ламинирование, сборка из пултрузионных профилей, устройство мостовых настилов и несущего равномерного настила. Описаны основные методы производства составляющих моста, отвечающих эстетическим и экономическим требованиям: использование модульных элементов краев настила, устройство умной опалубки и монококовых сооружений. Подробно изучены физико-химические свойства полимерных материалов, из которых на сегодняшний день возможно изготовление арматуры для мостов. К ним относятся: биокомпозиты, натуральные волокна, биосмолы. Представлены, в том числе иллюстративным рядом, несколько современных примеров FRP использования при проектировании мостов на примере Нидерландов. В заключение проведен анализ эффективности использования этого материала в архитектуре и строительстве за последние десятилетия (от отделочного до конструкционного применения), и высказаны предположения о дальнейшем векторе изучения и применения полимеров (FRP).

Ключевые слова: биокомпозиты, биосмолы, композитные материалы, ламинирование, монококовые сооружения, мостовой настил, мостостроение, пултрузионный профиль.

1. Введение

Несмотря на то, что строительная индустрия имеет тенденцию быть более консервативной, чем другие отрасли, такие как автомобильная или аэрокосмическая промышленность, инновационные материалы и новые технологии находят свое применение в строительстве мостов в Нидерландах. Одной из наиболее перспективных групп новых материалов в



мостостроительстве является армированный волокном полимер (FRP). FRP – это композитные материалы, которые состоят из полимерной матрицы, армированной волокнами [1]. Волокна могут быть стеклом, углеродом, базальтом или арамидом, хотя также используются и другие волокна, такие как бумага, дерево или растительные волокна. Полимер обычно представляет собой эпоксидный, виниловый эфир или полиэфирный термореактивный пластик. Волокна и матрица проявляют различные физические и химические свойства, которые при объединении образуют прочный и жесткий композитный материал. Начиная с первого пешеходного моста FRP в Харлингене в 1995 году, практика в Нидерландах демонстрирует растущий интерес к этому новому материалу для проектирования мостов. Этот интерес привел к значительному количеству реализованных мостов, в которых был применен FRP. Примеры мостов, обсуждаемые в этой статье, показывают, что FRP используется как для основной несущей конструкции, так и для более комплиментарных частей, таких как модульные краевые элементы и системы мостовых настилов. В Нидерландах чрезвычайно высокая плотность автомобильных, железнодорожных и водных путей. Поэтому неудивительно, что в стране сегодня слишком много транспортных и пешеходных мостов, большинство из которых было построено после Второй мировой войны. После войны интенсивность движения выросла в десять раз, в то время как нормы и правила проектирования стали более строгими, особенно в отношении износа и динамики. Это развитие привело к большому количеству послевоенных мостов, срок эксплуатации которых подходит к концу. Замена стоит дорого, и поскольку государственные органы были вынуждены сократить свои расходы из-за экономического спада, на техническое обслуживание остается мало средств. Поэтому при строительстве новых мостов возникает вопрос о том, являются ли традиционные материалы, такие как бетон и сталь, по-прежнему наилучшим выбором как с точки зрения

рациональных инженерных соображений, так и по культурным и эстетическим причинам [2].

В области проектирования мостов были разработаны новые материалы, одним из которых является FRP. Хотя за последние 20 лет в Нидерландах было построено значительное количество мостов из стеклопластика, заметно, что эстетика рассматривалась как законный вопрос лишь для немногих из них. Большинство из этих конструкций являются чрезвычайно простыми и массивными, они явно не показывают факт работы с новым и инновационным материалом. Эти мосты – просто плиты через воду; в тех немногих случаях, когда рассматривается эстетика, новые материалы используются для имитации традиционных материалов, таких как дерево (то есть для парапетов или настилов) или стали. Эта тенденция ссылаться на традиционное применение напоминает первые конструкции железных мостов, в которых традиционные деревянные соединительные детали были без разбора переведены в железо. Чтобы ответить на вопрос о том, что FRP может предложить в архитектурном проектировании мостов, сначала необходимо определить, как использование FRP может изменить внешний вид моста.

2. Инженерные решения использования FRP

Ретроспектива развития FRP показывает, что именно инженеры, а не архитекторы, были первыми, кто экспериментировал с этим новым материалом. В аэрокосмической, морской и автомобильной промышленности эти пластики были впервые представлены за десятилетия до того, как их приняли архитекторы. Еще в 1940 году Генри Форд выпустил новаторский композитный автомобиль из конопляного волокна и смолы под девизом: «в десять раз прочнее стали». Пластмассовые материалы постепенно начали привлекать и другие отрасли, включая дизайн, архитектуру и строительство.

Архитектурные подрядчики, такие как Future Systems Architects, осознали потенциал технологии литья в производстве новых форм и разработали футуристические дома и конструкции из FRP. Однако, что касается конструкции моста, ни один из ранних проектов FRP не учитывал эстетический потенциал материала. В связи с такими проблемами, как техническое обслуживание и долговечность, инженеры, ищущие альтернативы традиционным строительным материалам, обнаружили, что FRP обладает сопоставимыми и часто превосходящими традиционные материалы свойствами. Одним из их самых сильных преимуществ является его низкая плотность, что приводит к уменьшению массы. Сравнительные примеры показывают, что средний композитный мост FRP составляет примерно половину веса стального моста с той же производительностью. Это преимущество в отношении веса также приводит к снижению энергии и затрат на транспортировку, подъем, сборку, опорную конструкцию и фундаменты [3]. С точки зрения сниженного количества сырья строительных материалов и их углеродного следа, мосты FRP часто являются очень рациональным выбором. Существуют и значительные преимущества с точки зрения долговечности, так как композиты FRP показывают высокую устойчивость к коррозии. Следовательно, требования к обслуживанию низкие.

2.1. Ручное ламинирование: пешеходный мост в Харлингене

В декабре 1995 года Министерство инфраструктуры и окружающей среды Нидерландов первым инициировало проект пешеходного моста, полностью сделанного из FRP в Нидерландах. Два года спустя этот ламинированный вручную мост был открыт для использования в гавани Харлингген. Мост был вдвое легче традиционного стального моста и в два раза дороже, а его отношение длины к глубине (L/D) было вдвое ниже из-за его концепции U-

образной балки с массивными несущими парапетами. Ручное ламинирование, или ручная укладка, является широко используемой и старой техникой для изготовления композитных деталей на основе многократных укладок слоев смолы и армирующих волокон. Простой, но трудоемкий ручной процесс обеспечивает гибкость конструкции, хотя качество компонентов зависит от квалификации мастера. Что касается фракции волокон на единицу объема, высокие коэффициенты не могут быть достигнуты с использованием этого метода из-за ручной обработки.

2.2. Сборка из пултрузионных профилей

Другим распространенным решением, которое применяется во многих мостах, является использование пултрузионных профилей FRP. Пултрузия – это непрерывный автоматизированный процесс, который производит большое количество идентичных деталей. С помощью этого автоматизированного процесса могут быть получены сложные формы поперечного сечения и фракции с высоким содержанием волокон. Арматура протягивается через ванну со смолой, а затем через нагретую формовку, чтобы получить окончательную форму профиля по всей длине. Широкий спектр сплошных и полых конструкций с постоянным поперечным сечением может быть изготовлен и применен в качестве мостовых балок, панелей настила, решетчатых систем, поручней и так далее. С точки зрения детализации, мост FRP, который состоит из пултрузионных компонентов, очень похож на стальной мост. Прямые профили и пултрузионные листы собираются в фермы, арки, пилоны или U-образные балки. Швы являются ключевыми элементами при использовании профилей пултрузии. Поскольку волокна часто являются однонаправленными по длине профиля, они склонны расщепляться вблизи стыков, которые часто полны болтов и пластин [4].

2.3. Мостовые настилы

Настилы, как правило, являются наименее прочной частью как для пешеходных мостов, так и для транспортных мостов. Плохая первоначальная конструкция, отсутствие надлежащего технического обслуживания и условия окружающей среды являются основными факторами, которые сокращают срок службы мостового настила. Исключая покраску, на ремонт и замену настила моста, приходится 75%-90% ежегодных расходов на содержание моста в Нидерландах [5]. В дополнение к использованию их для замены изношенных стальных или бетонных настилов, композиты могут применяться для расширения существующих конструкций без значительного добавления статических нагрузок для опор и контрфорс.

2.4. Несущий равномерный настил

Как упоминалось ранее, в Нидерландах за последнее десятилетие наблюдался значительный рост пешеходных и велосипедных мостов FRP. Значительное количество этих мостов было построено с использованием другого эффективного метода. Эти мосты состоят из полых доски FRP со стальными перилами, установленными сверху этого. Производственный процесс включает в себя серию параллельно расположенных несущих основных элементов, которые обернуты в ткани. Армирование проходит непрерывно от горизонтальных лицевых плоскостей элемента через стенки и облицовки смежных элементов. После размещения сердечника и арматуры на деформируемой форме конструкция герметизируется гибким пакетом. Затем смолу вытягивают вакуумным способом, состоящим из вакуумного насоса на выходной стороне формы, который вытягивает смолу из резервуара на входной стороне формы. В зависимости от используемого оборудования толщина стенки и фланца может достигать десятков сантиметров, а доля волокон - до 70% [6]. Несмотря на то, что легкое ядро не играет

конструктивной роли в конечном продукте, оно необходимо в качестве опалубки в процессе производства и остается закрытым в конструкции после строительства. Однако материал сердцевины, который обычно представляет собой пену, должен быть достаточно прочным, чтобы выдерживать давление вакуума во время процесса пропитки. Хотя архитектурный дизайн этих мостов является минимальным и ограничен конструкцией парапета, их более низкое отношение пролета к глубине и отделение парапетов от несущей функции конструкции заставляют эти мосты иметь более тонкий внешний вид, чем мосты, сделанные используя подходы, описанные выше (рис.1).

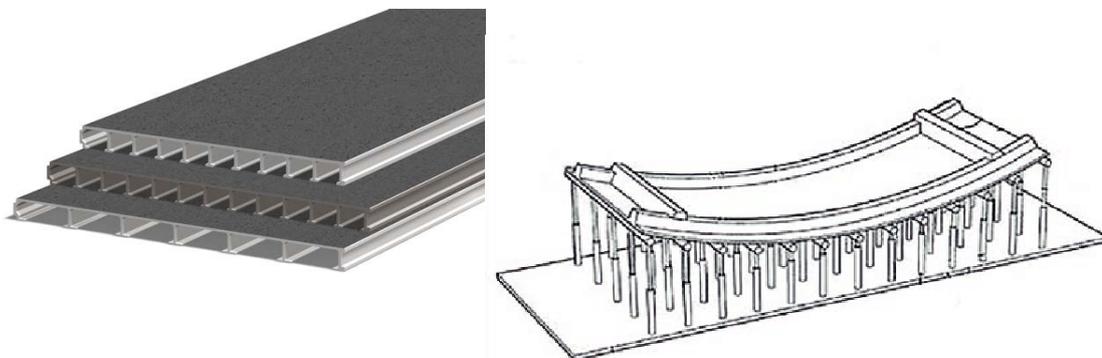


Рис. 1 – Устройство равномерного несущего настила в конструкции моста.

3. Проблемы архитекторов

В предыдущем разделе рассматривалось, как инженеры работали с FRP за последние два десятилетия. Тем не менее, вопрос исследования этой статьи до сих пор остается без ответа: какие архитектурные мысли и проблемы возникают у архитекторов при проектировании мостов из FRP? Чтобы ответить на этот вопрос, в этом разделе рассматривается ряд архитектурных проектов мостов FRP.

3.1. Модульные элементы края настила

Краевые элементы в значительной степени определяют внешний вид моста, потому что дизайн конструкции в основном воспринимается и

оценивается по высоте, если смотреть с соседнего поля или берега реки, а не с точки зрения над мостом. Движение по мосту в лучшем случае обеспечивает хороший обзор, но части самого моста, которые видны с этой точки зрения, в основном ограничены асфальтом, ограждением и парапетами. Таким образом, использование FRP для производства кромочных элементов значительно расширяет возможности проектирования. Поскольку FRP обеспечивает большую степень свободы, чем другие обычные материалы, такие как сталь, изогнутые поверхности и гладкие края могут быть достигнуты на материале с полированной поверхностью. Помимо возможностей дизайна, краевые элементы FRP устраняют важные проблемы долговечности. До использования FRP краевые элементы были либо изготовлены из твердого бетона с коническими концами, либо выполнены в виде полых стальных носиков. Хотя последний вариант предлагал преимущество широкого, доступного пространства кабелей, низкая долговечность оказалась проблемой. Стальные носы имели тенденцию к коррозии из-за конденсации влаги, тогда как грибы и мох росли на поверхностях бетонных элементов. Детализация и сборка краевых элементов FRP также выгодны. Кромочные элементы FRP изготавливаются с фланцами вдоль торцевых кромок, которые направлены внутрь. Это не только дает тонкий и гладкий конец на краю, но также приводит к небольшим допускам, которые возникают во время сборки. Наблюдение за соединением под углом после того, как панели были размещены на вторичной конструкции, показало, что тот же материал распространяется до бетонной конструкции, не оставляя зазор. Обычно 60 мм глубины фланца с радиусом 10 мм достаточно, чтобы замаскировать незначительные недостатки. В случае, если архитектор не указывает эти фланцы, результат может быть довольно непривлекательным, что в конечном итоге было доказано с панелями одного уникального моста в Нидерландах. Вертикальный зазор между этими

панелями виден, и практически невозможно отрегулировать расстояние между всеми панелями для достижения равной ширины стыка. Однако виадук имеет непрерывный линейный вид на определенном расстоянии, так как невооруженным глазом можно различить только более широкие промежутки между некоторыми панелями и изгибы с более близкой перспективы. Преимущества использования FRP для проектирования краевых элементов настила четко выражены на тонких боковых краях моста Джулианы в Занстаде, Нидерланды. Панели этого моста с высокой полировкой и гладкими краями имеют изогнутое и коническое поперечное сечение, состоящее из консолей диаметром 900 мм, которые соединены с бетонной платформой [7]. Шов между панелями специально детализирован, чтобы иметь внутренние фланцы глубиной 60 мм. Конструкция виадуков шоссе N201 доказала, что возможности армированных волокном пластиковых краевых элементов выходят за рамки формы, цвета и текстуры (рис.2). В этом проекте идея структуры, которая светилась бы ночью, была введена путем установки фонарей за верхней частью композитных панелей. Для достижения желаемого эффекта использовался полупрозрачный FRP вместе с сотовой сердцевиной, которая обеспечивала равномерную передачу света по толщине и по поверхности панели, и которая обеспечивала достаточную жесткость панели. Для этого проекта красный свет был выбран для установки в верхней части краевых панелей, придавая окончательный, линейный эффект свечения для конструкции (рис.3).



Рис. 2 – Конструкция моста Джулианы в Занстаде, Нидерланды.

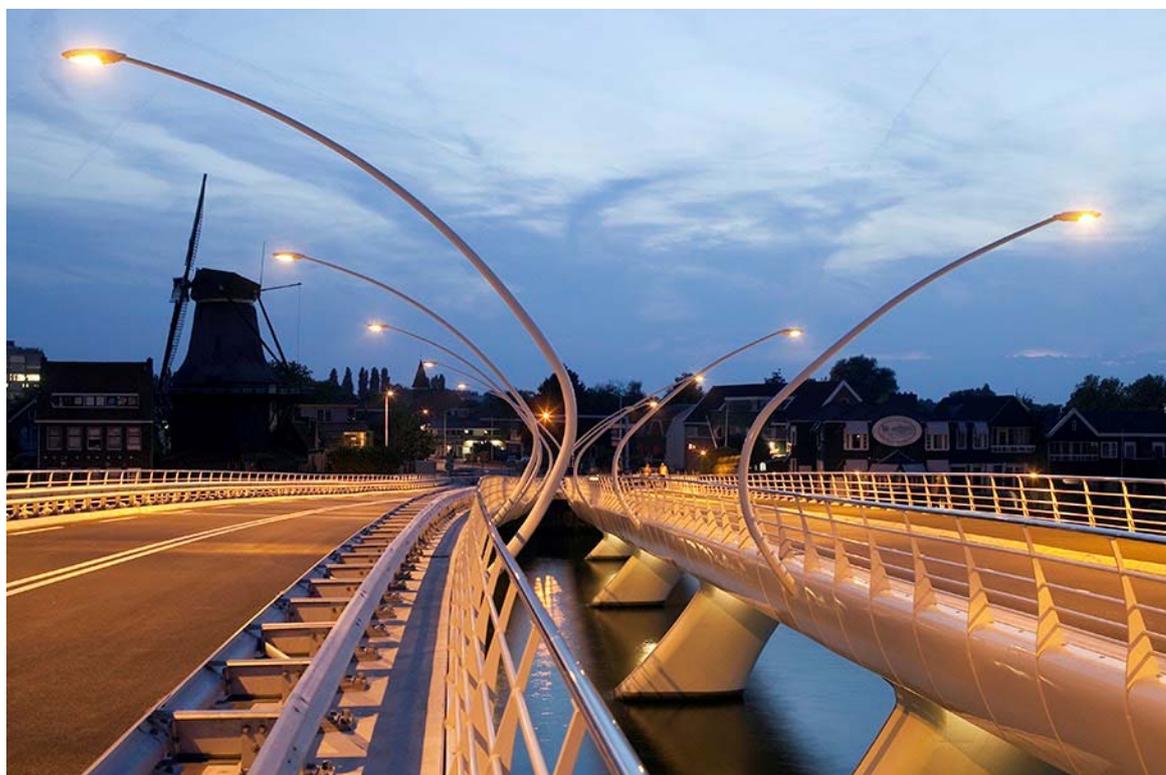


Рис. 3 – мост Джулианы в Занстаде, Нидерланды.

3.2. Монококовые сооружения

Применение FRP в строительстве не ограничивается модульными мостовыми элементами, поскольку уже изготовлены целые несущие конструкции из FRP. Такие конструкции экспериментируют с потенциалом

проектирования, предлагаемым FRP. Монококи – это структуры с несущей внешней оболочкой. Эти структуры имеют эффективно сконцентрированный материал на внешней области поперечного сечения и обеспечивают преимущество, заключающееся в том, что можно сделать тонкие формы достижимыми [8]. С точки зрения технического обслуживания и эстетики тот факт, что нижняя часть моста является гладкой и закрытой, дает некоторые преимущества. Грязь не накапливается на выступающих фланцах, и предотвращается создание птичьих гнезд под конструкцией. Создание монококового моста с двойной кривизной может быть сложной процедурой. Чтобы получить гладкую и удобную в обслуживании поверхность, необходимо использовать сложную форму. Изготовление пресс-форм может стать дорогостоящей частью общих производственных затрат. Альтернативно, стоимость пресс-формы может быть эффективно снижена путем использования простых плоских пресс-форм. Метод производства также имеет решающее значение для конечного результата. При вакуумной инъекции в одной форме, при которой перемишка получается перевернутой, текстура вакуумной фольги и волокон становится видимой на открытой нижней части перемишки, подобно старому каноэ. Использование двойной пресс-формы или обработка после шлифовки и полировки могут исправить этот недостаток. Другим процессом является ручное ламинирование, при котором ламинат строится вокруг поверхности специально разработанного сердечника, заключая его в конечную структуру. Хотя этот ручной процесс обеспечивает большую свободу проектирования, он не является оптимальным с точки зрения использования материала из-за его низкой объемной доли волокна, что приводит к необходимости большего количества смол и, наконец, к более тяжелой структуре с увеличенной толщиной оболочки. В случае ручного ламинирования гладкая поверхность возможна

только путем интенсивного последующего шлифования, нанесения покрытия и полировки [9] (рис.4).



Рис.4 – Монококовый мост с двойной кривизной.

3.3. Умная опалубка

Когда речь идет о реализации сложных трехмерных геометрий в FRP, одним из наиболее важных определяющих факторов является стоимость опалубки. Для большого производства, в котором может быть достигнуто повторение идентичных элементов, как для краев настила моста, обсужденных в подразделе 3.1, производство становится доступным. Однако, когда требуются различные уникальные элементы с изменяющимися трехмерными формами, индивидуальное, назначенное решение для пресс-формы становится недоступным. Несколько исследователей исследуют интеллектуальные и гибкие опалубки и экспериментируют с новыми системами формования, которые могут предложить эффективное решение геометрических изменений. Исследования гибких форм для бетонных конструкций и регулируемых опалубок для изогнутых стеклянных панелей могут быть успешно скорректированы и применены к FRP, и в конечном итоге могут дать больше возможностей для проектирования.



Рис. 5 – Устройство «умной» опалубки.

3.4. Биокompозиты

В современной практике архитекторы и клиенты все больше внимания уделяют энергоэффективности. Хотя недавние исследования, проведенные в Нидерландах, доказали, что пешеходные мосты из FRP работают лучше с точки зрения углеродного следа по сравнению с пешеходными мостами из традиционных строительных материалов, таких как сталь и бетон, большинство FRP по-прежнему основаны на невозобновляемых источниках. FRP, используемый в конструктивных применениях, обычно состоит из синтетических волокон, таких как стекло и углерод, в сочетании со смолами на основе нефти. В последние годы в области охраны окружающей среды материалы на основе возобновляемых сырьевых ресурсов вошли в композитную промышленность и нашли применение в различных продуктах. Натуральные волокна были успешно использованы для замены искусственных волокон, и на рынке были представлены новые типы смол на основе натуральных веществ с целью снижения воздействия на окружающую среду и воплощенной энергии FRP [10]. Хотя биокompозиты используются в

других отраслях, таких как автомобильная промышленность, они только появляются в строительной отрасли. Для несущих структурных применений, таких как мостки, использование полимеров на основе био- и натуральных волокон все еще находится на экспериментальной стадии [11].

3.4.1. Волокна

Термин «натуральные волокна» относится к волокнам, которые встречаются в природе и встречаются в растениях (целлюлозные волокна) или животных (белковые волокна), хотя в качестве подкрепления в композитах используются только растительные волокна. Целлюлозные волокна получают из различных частей растений, таких как семена (хлопок, капок, молочай), стебли (лен, джут, пенька, рами, кенаф, крапива, бамбук), листья (сизаль, манила, абака) или фрукты (койра); существуют и другие волокна [12]. В зависимости от их происхождения, такие волокна могут быть длинными или короткими. Длинные волокна извлекаются из внешней оболочки стеблей длинных растений, таких как лен и джут, и, как правило, предпочтительны в качестве армирования из-за их более высоких механических характеристик по сравнению с другими волокнами. За исключением нескольких типов длинных волокон, большинство натуральных растительных волокон имеют более низкие механические свойства, чем их искусственные аналоги. Тем не менее, одним из их главных преимуществ является их низкая плотность, что приводит к тому, что компоненты намного легче, чем композиты, армированные стекловолокном. Благодаря их низкому удельному весу удельная прочность и удельная жесткость натуральных волокон увеличиваются. Это критические свойства для биокompозитов, особенно в деталях, рассчитанных на жесткость при изгибе, поскольку натуральные волокна обладают большей жесткостью, чем прочностью. Кроме того, на механические свойства растений сильно влияет растущая

среда (температура, влажность, состав почвы и воздуха, а также метод сбора и обработки), что приводит к отклонению значений свойств даже для волокон одного типа [13]. Натуральные волокна также характеризуются плохой прочностью. Плохая совместимость между натуральными волокнами и гидрофобными смолами является еще одной причиной плохой прочности. Натуральные волокна также подвержены ультрафиолетовому излучению. Фотохимическое разложение под действием ультрафиолетового света приводит к изменениям в молекулярной структуре композита, способствующему поверхностному охрупчиванию, растрескиванию, обесцвечиванию и потере прочности на разрыв и ударной вязкости. Тем не менее, было проведено много исследований по разработке методов, которые улучшают долговечность натуральных волокон.

3.4.2. Смола

С целью дальнейшего улучшения воздействия биокompозитов на окружающую среду за счет увеличения доли возобновляемого сырья были разработаны биосмолы. Биосмолы, также известные как полимеры на биологической основе или органические пластмассы, представляют собой синтетические полимеры, полученные из возобновляемого сырья, такого как крахмал и целлюлоза, или из сельскохозяйственных отходов. В зависимости от их химического состава биосмолы классифицируются с точки зрения их биоразлагаемости и долговечности. Как и натуральные волокна, биоразлагаемые пластики имеют тенденцию поглощать влагу из окружающей среды; кроме того, они более хрупкие, чем смолы на нефтяной основе. Таким образом, биоразлагаемые пластики предпочтительны во временных применениях, включая упаковку и недолговечные потребительские товары. Прочные биосмолы представляют собой следующее поколение биоразлагаемых полимеров. Эти пластмассы, основанные на

растительном масле, максимизируют содержание возобновляемого сырья, сохраняя при этом длительную функциональность. Естественная деградация и хрупкость сдерживаются добавлением наполнителей и добавок во время производства [14]. Благодаря своим долговечным свойствам, долговечные биосмолы используются в областях с более длительным сроком службы.

4. Выводы

Использование FRP в мостостроении значительно выросло за последние два десятилетия. Области применения варьируются от простых элементов настила до пултрузионных элементов. Даже целые несущие конструкции, сделанные из FRP, теперь осуществимы. Привлеченные конструктивными и экономическими преимуществами, такими как снижение веса и экономия затрат на обслуживании, инженеры разработали строительные решения с использованием FRP, которые конкурируют с обычными конструкциями. В области архитектуры недавнее создание FRP в качестве строительного материала для мостов привело к многочисленным успешным проектам, в которых FRP служит как архитектурным, так и эстетическим целям. Архитекторы и инженеры продемонстрировали использование FRP в качестве материала для облицовки настилов, как в простой форме, так и в полупрозрачной, а также в сочетании со светом. Они также продемонстрировали более смелые конструктивные применения FRP, включая несущую оболочку, складывающиеся конструкции и нестандартные изогнутые монококовые конструкции. Кроме того, этот инновационный материал явно еще не достиг своих максимальных возможностей и требует дополнительных исследований. В частности, следует дополнительно изучить вопрос об улучшении воздействия на окружающую среду и энергоэффективности FRP путем замены возобновляемых сырьевых

материалов (натуральные волокна, смолы на биологической основе) на традиционные материалы.

Литература

1. Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Мандрик-Котов Б.Б., Михалдыкин Е.С. Проблемы применения полимерных композиционных материалов в транспортном строительстве // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 8, №6 2016. URL: naukovedenie.ru/PDF/89TVN616.pdf

2. Фиговский О.Л. Нанотехнологии для новых материалов // Инженерный вестник Дона, 2012, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2012/1048

3. Majumdar, P. K., Liu, Z., Lesko, J. J., & Cousins, T. E. Performance evaluation of FRP composite deck considering for local deformation effects. *Journal of Composites for Construction*, 2009, vol. 13(4), pp.332-338. [doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000008](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000008)

4. Karbhari, V. M. Materials considerations in FRP rehabilitation of concrete structures. *Journal of materials in civil engineering*, 2001, vol. 13(2), pp.90-97. [doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2001\)13:2\(90\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2001)13:2(90))

5. Veltkamp, M., & Peeters, J. Hybrid bridge structure composed of fibre reinforced polymers and steel. *Structural Engineering International*, 2014, vol. 24(3), pp.425-427. doi.org/10.2749/101686614X13844300210515

6. Кузеванов Д.В. Научно-технический отчет «Конструкции с композитной неметаллической арматурой. Обзор и анализ зарубежных и отечественных нормативных документов», 2012 г. URL: niizhb2.ru/Article/nka2012.pdf

7. Степанова В.Ф., Степанов А.Ю. Неметаллическая композитная арматура для бетонных конструкций // Промышленное и гражданское строительство. 2013. №1. С. 45-47.



8.Кудрявцев П.Г., Фиговский О.Л. Нанокompозитные органоминеральные гибридные материалы // Инженерный вестник Дона, 2014, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2476

9.Nguong C.W., Lee S.N.B., Sujan D.A. A review on natural fibre reinforced polymer composites World Acad Sci, Eng Tech, 2013, vol. 73, pp.1123-1130

10.Zini E., Scandola M. Green composites: An overview. Polymer Composites, 2011, vol. 32, pp.1905-1915. doi.org/10.1002/pc.21224

11.Faruk O., Bledzki A. K., Fink H.P., Sain M. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010, Progress in Polymer Science, 2012, vol. 37, pp.1552-1596. doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003

12.Alix S., Philipp E., Bessadok A., Lebrun L., Morvan C., Marais S. Effect of chemical treatments on water sorption and mechanical properties of flax fibres. Bioresource Technology, 2009, vol. 100, P.4742. doi.org/10.1016/j.biortech.2009.04.067

13.Гиздатуллин А.Р., Хусаинов Р.Р., Хозин В.Г., Красникова Н.М. Прочность и деформативность бетонных конструкций, армированных полимеркомпозитными стержнями // Инженерно-строительный журнал. 2016. №2 (62). С. 32-41.

14.Brooke H. Quinn, Scott A. Civjan, Andrew Lahovich, Sergio F Breña, Shoukry Elnahal. Monitoring of the First “Bridge-in-a-Backpack” Bridge in Massachusetts // TRB 2013 Annual Meeting. pp. 1-16.

References

1.Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Mandrik-Kotov B.B., Mihaldykin E.S. Internet-zhurnal «NAUKOVEDENIE» Tom 8, №6 2016. URL: naukovedenie.ru/PDF/89TVN616.pdf

2.Figovskij O.L. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2012, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1518



3. Majumdar, P. K., Liu, Z., Lesko, J. J., & Cousins, T. E. *Journal of Composites for Construction*, 2009, vol. 13(4), pp.332-338. doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000008

4. Karbhari, V. M. *Journal of materials in civil engineering*, 2001, vol. 13(2), pp.90-97. doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2001)13:2(90)

5. Veltkamp, M., & Peeters, J. *Structural Engineering International*, 2014, vol. 24(3), pp.425-427. doi.org/10.2749/101686614X13844300210515

6. Kuzevanov D.V. *Nauchno-tehnicheskij otchet «Konstrukcii s kompozitnoj nemetallicheskoj armaturoj. Obzor i analiz zarubezhnyh i otechestvennyh normativnyh dokumentov»*, 2012. URL: niizhb2.ru/Article/nka2012.pdf

7. Stepanova V.F., Stepanov A.Ju. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2013. №1. P.P. 45-47.

8. Kudryavcev P.G., Figovskij O.L. *Inzhenernyj vestnik Dona (Rus)*, 2014, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1518

9. Nguong C.W., Lee S.N.B., Sujana D.A. *World Acad Sci, Eng Tech*, 2013, vol. 73, pp.1123-1130

10. Zini E., Scandola M. *Polymer Composites*, 2011, vol. 32, pp.1905-1915. doi.org/10.1002/pc.21224

11. Faruk O., Bledzki A. K., Fink H.P., Sain M. *Progress in Polymer Science*, 2012, vol. 37, pp.1552-1596. doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003

12. Alix S., Philipp E., Bessadok A., Lebrun L., Morvan C., Marais S. *Bioresource Technology*, 2009, vol. 100, P.4742. doi.org/10.1016/j.biortech.2009.04.067

13. Gizdatullin A.R., Husainov R.R., Hozin V.G., Krasinikova N.M. *Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal*. 2016. №2 (62). pp. 32-41.

14. Brooke H. Quinn, Scott A. Civjan, Andrew Lahovich, Sergio F Breña, Shoukry Elnahal. *Monitoring of the First “Bridge-in-a-Backpack” Bridge in Massachusetts. TRB 2013 Annual Meeting*. pp. 1-16.
