

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» <https://t-s.today>

Russian journal of transport engineering

2019, №1, Том 6 / 2019, No 1, Vol 6 <https://t-s.today/issue-1-2019.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/17SATS119.pdf>

DOI: 10.15862/17SATS119 (<http://dx.doi.org/10.15862/17SATS119>)

Статья поступила в редакцию 12.02.2018; опубликована 03.04.2019

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

Стругач А.Г., Трифонов А.Г. Архитектура современных пешеходных мостов из фиброармированных композитных материалов // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2019 №1, <https://t-s.today/PDF/17SATS119.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/17SATS119

**For citation:**

Strugach A.G., Trifonov A.G. (2019). Architecture of contemporary pedestrian bridges made of fiber-reinforced composite materials. *Russian journal of transport engineering*, [online] 1(6). Available at: <https://t-s.today/PDF/17SATS119.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/17SATS119

УДК 624.21 + 678.5

ГРНТИ 67.29.63

**Стругач Александр Геннадьевич<sup>1</sup>**

ООО «САБ», Санкт-Петербург, Россия

Генеральный директор

E-mail: r-9@bk.ru

ИНЦИ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=1010107](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1010107)

**Трифонов Андрей Геннадьевич**

ООО «САБ», Санкт-Петербург, Россия

Главный архитектор

E-mail: triffon@mail.ru

## Архитектура современных пешеходных мостов из фиброармированных композитных материалов

**Аннотация.** Композитные материалы сегодня всё чаще находят применение в строительной промышленности. В том числе в таких отраслях, как строительство мостов – уникальных сооружений. Из композитов на основе фиброармированных пластиков сегодня можно производить не только отдельные детали мостов и элементы конструкций, но и целые пролётные строения и цельнокомпозитные переправы, изготавливаемые в виде моноблокового изделия.

В статье анализируется архитектура современных пешеходных мостов, построенных с применением фиброармированных композитных пластиков в последние десятилетия. В исследовании рассматривается история пластика как конструкционного материала, тенденции и эволюция дизайна пластиковых изделий. В работе предложена классификация современных пешеходных мостов из фиброармированных композитов – на основе сочетания новаторства в применении материалов и в дизайне объектов.

---

<sup>1</sup> <https://www.facebook.com/alexander.strugach>

Исходя из выбранных характеристик, авторами выделены следующие три группы объектов: композитные материалы + традиционный дизайн; композитные и традиционные материалы + гибридный дизайн; композитные материалы + новый дизайн.

В ходе работы авторами были рассмотрены и проанализированы новейшие примеры объектов, относящиеся к каждой из трёх выделенных в классификации групп, в том числе – современные российские примеры композитных пешеходных переходов.

Особое внимание в работе уделено наиболее передовым технологиям, таким как трёхмерная печать цельнокомпозитных мостов, а также ряду других современных экспериментальных методов производства. Изучен опыт специалистов из Германии, Испании, Великобритании, Китая и других регионов мира.

Дальнейшее исследование и применение современных фиброармированных композитов в сочетании с новейшими производственными технологиями трёхмерной печати и компьютерного параметрического дизайна может способствовать развитию современного мостостроения, расширению типологии сооружений и совершенствованию дизайна новых объектов строительства.

**Ключевые слова:** мостостроение; пешеходный мост; архитектура; композитные материалы; композиты; пластики; 3D-печать; строительство

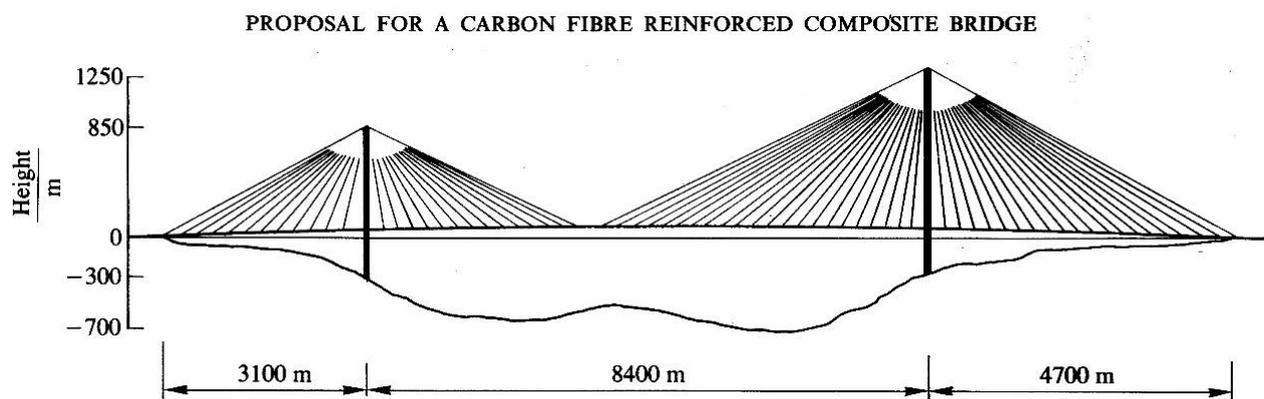
## Введение

История пластиков охватывает период более чем в 150 лет. Первые пластмассы появились в середине XIX столетия: их прочили на замену камню, металлам и древесине. Некоторые из современных композитов были получены ещё во второй половине 1930-х гг.<sup>2</sup>, но широкое их применение, в том числе для изготовления несущих строительных конструкций, стало возможным лишь существенно позднее [1]. В строительстве мостов – уникальных сооружений – композиты начали применяться сравнительно недавно [2]. Настоящий бум полимерных изделий наступил в 1960-е. В последующие десятилетия – в 1970–1980-е гг. было создано множество экспериментальных проектов, в которых композитные материалы предполагалось применять для строительства мостов в диапазоне от малых пешеходных

---

<sup>2</sup> Pultron Composites. History of FRP [Электронный ресурс] <http://www.mateenbar.com/history-of-frp/> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. англ. (дата обращения: 28.03.2019).

переходов до колоссальных мостов-рекордсменов. Большая часть таких проектов осталась на бумаге. К числу наиболее амбициозных относится, к примеру, вантовый переход через Гибралтарский пролив на основе конструкций из углепластика с максимальным пролётом 8,4 км, оставшийся не реализованным [3].



**Рисунок 1.** Концепция вантового моста  
из углепластика через Гибралтарский пролив. 1987 г. [3]

**Figure 1.** CFRP-bridge across the Strait of Gibraltar conceptual drawing. 1987 [3]

В начале XXI века в центре внимания уже не утопии с заявками на рекорды, а реальные прототипы – преимущественно малые пешеходные мосты из современных композитов. Наиболее перспективными для исследования и внедрения в производство на сегодняшний момент являются технологии, позволяющие создавать цельнокомпозитные (моноконтинентные, моноблочные) мосты, которые можно возводить с высокой скоростью и высоким уровнем автоматизации строительства. В статье исследуется практика применения современных композитных материалов в сфере строительства пешеходных мостов и влияние этой тенденции на архитектурно-художественный облик сооружений. Данные для исследования получены при анализе новейших публикаций в ведущих отечественных [1; 2; 4; 5; 9; 14; 16; 19; 20; 26] и зарубежных [3; 8; 12; 13; 21; 23; 29; 32] научных изданиях.

Цель исследования: выявить архитектурные особенности, характерные для современных пешеходных мостов, построенных с применением композитных материалов, кратко описать и классифицировать их.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести краткий обзор истории технологии и применения пластиковых и композитных материалов. Показать роль пластика в истории дизайна и отметить тенденции его применения в современном мостостроении.
2. На основе типологии композитных материалов и технологии производства предложить классификацию. Классифицировать современные пешеходные мосты, построенные с применением композитных материалов в последнее десятилетие по наличию инноваций и новизны в их дизайне, применяемых конструктивных решениях, используемых материалах, технологиях изготовления и строительства и т. д.
3. Провести краткий обзор реализованных объектов, отобранных в соответствии с принятой классификацией (шесть объектов за десять лет).
4. Оценить архитектурно-художественный потенциал строительства современных пешеходных мостов из композитных материалов с учётом перспективы – для создания в будущем оригинальных и выразительных объектов.

### Открытие пластиков и внедрение их в производство. Особенности дизайна объектов из пластмасс

Изобретение первых пластиков традиционно связывают с именем британского изобретателя – металлурга Александра Паркса<sup>3</sup>. В середине XIX века учёный занимался исследованием клеточных стенок растений и работал с целлюлозой. В 1855 году он получил новое вещество, взяв за основу нитроцеллюлозу и растворив её в этаноле. Лёгкий органический пластик, открытый Парксом, был назван паркезином<sup>4</sup>.



*Рисунок 2. Коллекция объектов из Паркезина, XIX век. Великобритания*

*Figure 2. Collection of items made from Parkesine, XIX century. UK*

<https://sciencenotes.org/today-science-history-june-29/>

Из паркезина первоначально изготавливались копии каменных, деревянных и металлических декоративных изделий. Делали, например, слепки камей, медалей, пуговицы и так далее. «Несмотря на чаяния Паркса и открытие им в 1886 году компании по производству изделий из паркезина, этот вид пластика оказался недостаточно удачным, плюс к этому, попытка производства доступных по цене изделия привела к низкому качеству и банкротству компании» [4].

После паркезина были открыты более стабильные и пригодные для массового производства материалы – целлулоид и бакелит. Последний стал настоящим прорывом в производстве. Этот материал был получен в виде мастики, которую синтезировал бельгийский

<sup>3</sup> Александр Паркс (Alexander Parkes, 1813–1890).

<sup>4</sup> Parkesine (англ.).

химик-экспериментатор Лео Хендрик Бакеланд<sup>5</sup>. «Бакелит стал основой для появления современной полимерной глины <...>. На сегодняшний день дизайнеры разрабатывают из полимерной глины скульптурные композиции, украшения, бытовые предметы, а также используют её в имитации различных фактур и природных материалов (дерево, камень, металл)» [5].

Применение пластмасс в строительстве связано с использованием принципа композитного (композиционного) материала. По словам исследователей Г.А. Аверченко и А.В. Квитко, «с появлением и внедрением пластиков в строительство, появляется возможность использования уникального материала, свойства которого не будут уступать всем материалам, применяемым ранее в комплексе. Использование свойств нескольких материалов в одном теле называют композиционным. Объединение волокна и пластика в одном композиционном материале обозначают как «FRP Composites» – Fibre-Reinforced Polymer Composites (волоконно-армированный полимерный композит)» [2].

Началом эры фиброармированных пластиков (далее: ФАП) считается 1935 год, когда две американские промышленные компании «Корнинг Гласс»<sup>6</sup> и «Оуэнс-Иллинойс»<sup>7</sup> совместно разработали и внедрили в производство первый в мире стеклопластик – композитный пластиковый материал, армированный стекловолокном. В течение последующего десятилетия, к середине 1940-х гг., американским промышленникам из «Оуэнс Корнинг»<sup>8</sup> удалось существенно расширить масштабы производства и применения стеклопластиков<sup>9</sup>.

В середине 1930-х гг. пластмассы приходят в лёгкую промышленность. Как отмечает Ирина Щербакова, благодаря разработкам Эльзы Скиапарелли<sup>10</sup> уже в 1935 году были представлены детали костюмов, накидки и плащи из родофана – прозрачного полимерного материала. После войны пластики приходят и в современное искусство, которое в этот период всё больше дрейфует с территории левого радикального авангарда в пространство моды, роскоши и развлечений. «Люблю Голливуд, – как-то сказал Энди Уорхол. – Все пластмассовые, но мне нравится пластмасса. Я и сам хочу быть пластмассовым» [6].

По-настоящему широкое промышленное применение пластмассы приобрели лишь во второй половине XX века. В этот период из пластиков начали впервые массово производить предметы мебели, детали машин и оборудования. Тогда же зарождаются специфические тенденции в дизайне, соответствующие механическим и эстетическим свойствам новых материалов.

Философ Ролан Барт в своём эссе «Пластик», опубликованном в 1957 г. в сборнике «Мифы», указывал на «алхимическую сущность» пластмасс и называл их «чудом и внезапным преображением самой Природы». По словам Барта, «пластмасса есть не столько вещество, сколько сама идея его бесконечных трансформаций; <...> Пластмасса насквозь пропитана нашей удивлённостью чудом, она не столько предмет, сколько запечатлённое движение вещества» [7].

---

<sup>5</sup> Лео Хендрик Бакеланд (Leo Hendrik Baekeland, 1863–1944).

<sup>6</sup> Corning Glass Works (англ.).

<sup>7</sup> Owens-Illinois (англ.).

<sup>8</sup> Owens Corning (англ.).

<sup>9</sup> Pultron Composites. History of FRP [Электронный ресурс] <http://www.mateenbar.com/history-of-frp/> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. англ. (дата обращения: 28.03.2019).

<sup>10</sup> Эльза Скиапарелли (Elsa Schiaparelli, 1890–1973).



*Рисунок 3. Стул Пантона. Образцы фабрики Витра. Модель 1999 года. Германия*  
*Figure 3. Panton Chair. Vitra Manufacturer. 1999 model. Germany*

<https://www.smow.com/en/manufacturers/vitra/chairs/panton-chairs/panton-chair.html>

Подлинным открытием в области дизайна пластиковых изделий стал «стул Пантона», представленный в 1959 году. Это эффектное цветное криволинейное цельнокомпонитное изделие, в котором функция решается единой обобщённой динамичной формой<sup>11</sup>. Концепцию разработал Вернер Пантон<sup>12</sup>, технология производства оттачивалась затем в течение более чем 20 лет. По словам исследователя дизайна А.С. Михайловой, «этот моноблок, ставший символом эры пластикового дизайна, полностью поменял представление о стуле, расширил границы его восприятия, стал важным пунктом в ряде экспериментов в этом направлении и весьма часто его можно встретить в интерьерах с футуристической ноткой, или даже в качестве декораций фантастических фильмов последнего десятилетия» [4].

Пик моды на пластмассовые предметы остался в прошлом: пластик у потребителя начала XXI столетия едва ли ассоциируется с долговечностью и качеством. Пластмассы стали привычной обыденностью и ассоциируются, прежде всего, с мощью китайской полимерной и сборочной промышленности. Таким образом, сегодня изделия из новых композитов стали неотъемлемой частью предметного окружения человека: корпуса и детали смартфонов, планшетов, персональных компьютеров, автомобилей, яхт, самолётов, чайников, стиральных машин – всё это сегодня преимущественно изготавливается на основе тех или иных видов пластмасс. Композитные пластики приходят сегодня и в дизайн транспортных инфраструктурных объектов – сферу, где эстетика определяется безопасностью, надёжностью и технологичностью.

В эстетике современных пешеходных мостов, реализованных с применением композитов, таким образом, присутствует своеобразное противоречие. С одной стороны, наиболее актуальные проектно-производственные методы – например, параметрическое проектирование и трёхмерная печать объектов, бесспорно, являются современными и технологичными. С другой стороны, – характерная пластиковая поверхность и «текущие» литые

<sup>11</sup> (smow) Vitra Panton chair by Verner Panton [Электронный ресурс] <https://www.smow.com/en/manufacturers/vitra/chairs/panton-chairs/panton-chair-chartreuse.html> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. англ. (дата обращения: 28.03.2019).

<sup>12</sup> Вернер Пантон (Verner Panton, 1926–1998) – один из ведущих датских дизайнеров интерьера и специалистов в области предметного дизайна. Автор множества изделий из различных пластиков, вошедших в коллекцию лучших образцов предметного дизайна XX столетия. Использовал в своих работах динамичные криволинейные формы и яркие цвета, раскрывавшие возможности полимерных материалов. Всемирно известный «стул Пантона» до сих пор производится, например, фабрикой Витра.

формы служили источником вдохновения для дизайнеров и архитекторов полувековой давности – начиная с 1960–70-х гг. [4]. Последнее обстоятельство, наряду с применением комбинированных конструкций, основанных на сочетании композитных и традиционных материалов, породило своеобразный гибридный дизайн, подробнее о котором будет сказано далее.



**Рисунок 4.** *Пешеходный мост «Стрекоза» с пролётным строением из ФАП. Хардервейк. Голландия. 2014 г.*  
**Figure 4.** *“Dragonfly” footbridge with FRP-deck. Harderwijk. Netherlands. 2014*  
<http://moura.nl/Dragonfly-project.html>

Новейшие технологии трёхмерной печати позволяют воплотить дух современности не только в части применения экспериментальных материалов, но и в интуитивно реализуемой возможности создания необычных, недостижимых ранее простыми способами пространственных форм. Конструкция, созданная из нового композитного материала, будет выглядеть современной, к примеру, если получит образ формы параметрического построения или арт-объекта высокой степени абстракции, явно отсылающего зрителя к эстетике компьютерного моделирования. Параметрика в дизайне существует уже более десяти лет. Современные технологии – в том числе роботизированная трёхмерная печати объектов – делают параметрику весьма актуальной. В этом свете, большой интерес представляют новейшие исследования и испытания немецких специалистов [8].

#### **Краткая типология фиброармированных композитов, применяемых в строительстве**

В современной архитектурно-строительной практике и, в частности, в мостостроении применяются преимущественно три вида ФАП. Они классифицируются по типу армирующего материала (матрицы), а именно: стеклопластики (GFRP<sup>13</sup>), углепластики (CFRP<sup>14</sup>) и органопластики (OFRP<sup>15</sup>). Эти композиты армируются, соответственно, – стекловолокном, углеродным волокном, органическим волокном. В последнем случае возможны варианты применения волокон, полученных при переработке биоматериалов [4]. Новейшие тенденции в средовом дизайне и проектировании инфраструктуры стимулируют учёных и

<sup>13</sup> GFRP – Glass Fiber Reinforced Plastic (Polymer) (англ.).

<sup>14</sup> CFRP – Carbon Fiber Reinforced Plastic (Polymer) (англ.).

<sup>15</sup> OFRP – Organic Fiber Reinforced Plastic (Polymer) (англ.).

проектировщиков обращаться к вопросам экологии и защиты окружающей среды [9]. Здесь всё больше значение приобретают биоразлагаемые пластики. «В большинстве случаев предусматривается добавление в полимер на стадии его производства катализаторов, благодаря которым происходит быстрое разрушение длинных молекулярных цепочек» [10]. Интересные образцы переправ с биоразлагаемыми конструкциями реализованы в последние годы голландскими специалистами [11]. Такие объекты могут прослужить, в перспективе, от 30 до 100 лет (в зависимости от типа используемого материала) и затем могут быть подвергнуты биопереработке, в том числе – в естественных условиях.



*Рисунок 5. Виадук Зумленд. Экологический переход через автомагистраль A58 с фасадными конструкциями из органопластика (биоразлагаемый композит из эпоксидной смолы, армированной льняным волокном). Голландия. 2017 г.*

*Figure 5. Zoomland viaduct. Eco-bridge across the A58 motorway with bio-based OFRP façade elements (flax fiber wrapped in epoxy). Netherlands. 2017*

<https://www.agro-chemistry.com/articles/zoomland-viaduct-bio-based-showcase-across-the-motorway/>

В качестве оболочки и связующего в каждом из вариантов компаундов могут выступать различные вещества и их сочетания, например – термореактивные полимеры (эпоксидные смолы, резина и т. д.), бетоны (высокопрочный мелкозернистый бетон и т. д.) и иные материалы. Объекты с применением в структуре составного материала бетонов и их модификаций в данном исследовании не рассматриваются, так как относятся к отдельному классу современных композитов.

### Технологии производства

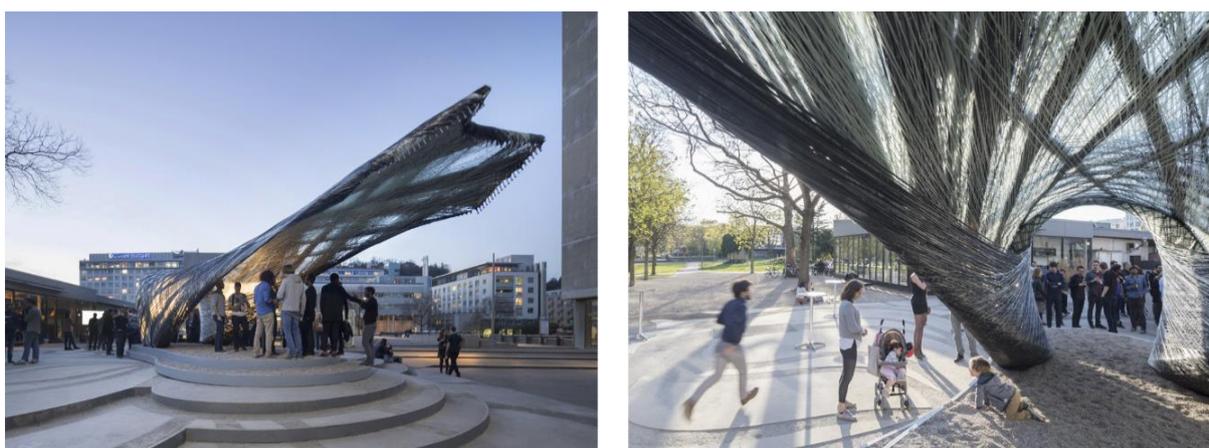
Для изготовления композитных материалов и конструкций применяется несколько методов.

Формование матрицы изделия может производиться посредством вакуумирования, напыления в открытую форму (ручное или автоматизированное), холодного и горячего прессования, экструзии и намотки (для изготовления протяжённых изделий, например – труб и нитей) [12]. В последние годы наиболее перспективным методом считается трёхмерная печать.

Эта технология построена на полной автоматизации процесса, а также на использовании новейших программно-аппаратных средств и комплексов [8].

Готовое изделие, как правило, образуется в ходе многоступенчатого технологического процесса. В мостостроении возможно применение модульных технологий на основе ФАП. Инфраструктурное сооружение может собираться на строительной площадке из элементов заводского изготовления. Инновационный проект первого сборного модульного моста из пластика подобного типа был разработан и внедрён в производство специалистами компании «АРУП»<sup>16</sup> в 2017 году [13].

Композитные материалы также применяются для ремонта и усиления существующих конструкций, частично утративших рабочие параметры. В этом случае производится, например, наклейка лент, холстов и хомутов из полимерных материалов, которые способны обеспечить значительное увеличение жизненного цикла ремонтируемой конструкции, в том числе – в условиях сурового климата [14].



*Рисунок 6. Павильон научно-исследовательского института ICD/ITKE, напечатанный из углепластиков и стеклопластиков с помощью БПЛА. Штутгарт. 2016–2017 гг.*

*Figure 6. ICD/ITKE Research Pavilion: CFRP/GFRP structure 3D-printed by drone. Stuttgart. 2016–2017*

<https://icd.uni-stuttgart.de/?p=18905>

Наиболее передовые технологии включают такие методы как печать с помощью БПЛА<sup>17</sup> (дрона): так был изготовлен, например, экспериментальный павильон, построенный в 2016–2017 гг. в Штутгарте с помощью нескольких летательных печатных аппаратов. Немецкими специалистами были также реализованы проекты навесов, пергол, сборных куполов, мебели и других малых форм [8].

### **Применение фиброармированных композитов в архитектуре и строительстве инфраструктурных объектов**

ФАП, как правило, хорошо работают на растяжение. Из ФАП можно изготавливать эффективные большепролётные конструкции: оболочки, пневматические покрытия, тенты и т. д. Используя свойства пластика при работе на сжатие, можно сооружать купола, сетчатые покрытия и оболочки, своды и другие распорные конструкции [12]. При сооружении современных мостов из ФАП могут выполняться как отдельные конструкции и детали

<sup>16</sup> ARUP (англ.).

<sup>17</sup> БПЛА – беспилотный летательный аппарат.

сооружения (пилоны, несущие кабели, одежды прохожей и проезжей частей, перильные ограждения, элементы крепежа и так далее), так и весь объект в целом – в том числе в виде цельнокомпозитного изделия. В России, к примеру, серийные малые цельнокомпозитные пешеходные мосты из стеклонита успешно изготавливаются методом вакуумной инфузии [15].



*Рисунок 7. Малые архитектурные формы в парке: пешеходный мостик и клумбы из стеклопластика, изготовленные с помощью трёхмерной печати. Шанхай, Китай. 2018 г.*

**Figure 7. 3D-printed GFRP-elements in a landscape park. Shanghai, China. 2018**  
[http://zqb1.cyol.com/html/2018-09/18/nw.D110000zqgnb\\_20180918\\_4-10.htm](http://zqb1.cyol.com/html/2018-09/18/nw.D110000zqgnb_20180918_4-10.htm)

По мнению ведущего российского исследователя мостов И.Г. Овчинникова и его коллег, существует четыре основных направления применения композитных материалов в мостостроении. «Первое направление связано с изготовлением целых мостовых сооружений или их элементов (пролётных строений, плит проезжей части, тротуарных настилов и т. д.) из полимерных композиционных материалов. <...> Второе направление связано с применением неметаллической композитной арматуры для армирования бетонных конструкций. <...> Третье направление связано с применением композиционных материалов для усиления существующих металлических и железобетонных мостовых сооружений. <...> Четвертое направление – применение полимерных композиционных материалов в малонагруженных изделиях и конструкциях (перильное ограждение, водоотводные лотки, мачты освещения и т. д.)» [16].

В России в настоящее время разработаны промышленные линейки цельнокомпозитных пролётных строений мостов. Опытные экземпляры были изготовлены и построены специалистами группы компаний «Рускомполит». Испытания и расчёты показывают, что «цельнокомпозитные пролётные строения являются выгодной альтернативой железобетонным мостовым конструкциям. Реальный срок службы композитного моста – 100 лет при практически нулевой стоимости обслуживания в процессе эксплуатации». В соответствии с проведёнными испытаниями, технологи «Рускомполита» пришли к выводам, что наиболее эффективными являются моноблочные решения, где применяются «несущие конструкции типа «сэндвич», изготавливаемые по технологии вакуумной инфузии» [17].

Первым в России мостом с цельнокомпозитным пролётным строением стал пешеходный переход через железнодорожные пути в районе платформы «Чертаново» в Москве. Проект был реализован в 2004 году компанией НПП «АпАТЭК» по заказу ОАО «РЖД». Мост шириной 3 м и длиной 41,4 м выполнен в виде сквозной фермы с движением понизу. Конструкция пролётного строения разрезная. Пролётное строение, перильные ограждения и настил выполнены из композитных материалов.<sup>18</sup>

<sup>18</sup> АпАТЭК – прикладные перспективные технологии. Пешеходный мост в районе платформы «Чертаново» [Электронный ресурс] <http://www.apatech.ru/chertanovo.html> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус. (дата обращения: 28.03.2019).



**Рисунок 8.** Первый в России мост с цельнокомпозитным пролётным строением из пултрузионного стеклопластика. Железнодорожная Станция «Чертаново», Москва, Россия. 2004 г.

**Figure 8.** First Russian full-composite bridge made of pultruded GFRP. “Chertanovo” railway station, Moscow, Russia. 2004

<http://www.apatech.ru/chertanovo.html>

Архитектурный облик сооружения внешне соответствует привычному виду компактного пешеходного моста из металлических конструкций. Применение ФАП в данном случае никак не повлияло на дизайн объекта. Для изготовления конструкций переправы применялся отечественный стеклопластик «СППС» («Стеклопластик Профильный Пултрузионный Строительный») – материал, основанный на пропитке стекловолокна терморективным связующим<sup>19</sup>.

Интересный вариант применения профильного пултрузионного стеклопластика был реализован в 2011 году при строительстве пешеходного моста на пересечении Юбилейного пр., ул. Горшина и ул. 9 мая в г. Химки Московской Области.



**Рисунок 9.** Ажурная архитектурная решётка надземного пешеходного перехода из стеклопластика. Химки, Московская Область, Россия. 2011 г.

**Figure 9.** Composite architectural grid made of GFRP. Khimki, Moscow Oblast, Russia. 2011

[https://places.moscow/places/peshekhodniy\\_most\\_himki/peshekhodniy\\_most\\_himki.html](https://places.moscow/places/peshekhodniy_most_himki/peshekhodniy_most_himki.html)

<sup>19</sup> АпАТЭК – прикладные перспективные технологии. Строительный стеклопластик «СППС» [Электронный ресурс] <http://www.apatech.ru/spps-stroi.html> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус. (дата обращения: 28.03.2019).

Крестообразный в плане пешеходный мост расположен над площадью кругового движения, имеет четыре цилиндрических лестнично-лифтовых узла и ажурную архитектурную решётку, изготовленную из стеклопластика. Изящная конструкция из криволинейных стержней круглого сечения оплетает лаконичные объёмы перехода единой трёхмерной сетью. Сооружение является примером гибридного дизайна, соединяющего традиционную узнаваемую конструкцию из металлического каркаса и фасадного остекления с эстетикой современной композитной трёхмерной сетки, геометрия которой построена с помощью САД-технологий 3D-проектирования. Вес сетчатой четырёхпролётной конструкции составляет 17,2 т (из них 15,2 т – композиционный материал). Габариты объекта в плане – 90х90 м<sup>20</sup>.

Несмотря на растущие масштабы практического применения полимерных композитных материалов в мостостроении, проектировщики и строители в разных странах сталкиваются с тем, что действующая нормативная база не всегда позволяет в полной мере использовать преимущества новых материалов. Работа по формированию и оптимизации нормативной базы для широкого применения решений на основе современных композитов в Российской Федерации в настоящий момент продолжается. Подробный анализ и обсуждение этой темы можно найти в недавних профильных публикациях ведущих российских исследователей [18; 19].

Одним из наиболее репрезентативных примеров внедрения современных пешеходных мостов из ФАП в широкую строительную практику может служить городская программа, реализуемая в настоящее время в Роттердаме. Голландские специалисты столкнулись с необходимостью быстрой и эффективной замены малых пешеходных мостиков, количество которых в городе, славящемся своими многочисленными каналами, исчисляется сотнями<sup>21</sup>. Пролётные строения новых переправ, приходящих на смену старым, изготавливаются на основе стеклопластикового композита. На тонкую палубу устанавливаются металлические перила различного дизайна.



*Рисунок 10. Малый пешеходный мостик с пролётным строением из стеклопластика. Роттердам, Голландия. 2012 г.*

**Figure 10.** *Small footbridge with GFRP-deck. Rotterdam, Netherlands. 2012*  
<https://olafgipser.com/public-buildings-infrastructure/#33-01>

<sup>20</sup> АпАТЭК – прикладные перспективные технологии. Ажурная архитектурная решетка из композитных материалов надземного пешеходного перехода [Электронный ресурс] [http://www.apatech.ru/openwork\\_lattice.html](http://www.apatech.ru/openwork_lattice.html) (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус. (дата обращения: 28.03.2019).

<sup>21</sup> Material District. The Plastic Bridges of Rotterdam [Электронный ресурс] <https://materialdistrict.com/article/plastic-bridges-rotterdam/> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. англ. (дата обращения: 28.03.2019).

Пролётные строения получают тонкими и изящными: высота сечения может составлять всего 100...150 мм. Архитектурные концепции таких объектов для производственной компании «ФайберКор Европа»<sup>22</sup> впервые разработали Олаф Гипсер из «Олаф Гипсер Аркитектс»<sup>23</sup> и Клаас Ян Варденаар<sup>24</sup> из студии «Виста»<sup>25</sup>. Право разработки проекта было получено после победы на открытом конкурсе, который администрация города провела в 2010 году. Авторам нужно было предложить варианты для замены 65 старых пешеходных и велосипедных мостов<sup>26</sup>. Реализованный дизайн отличается лаконизмом и элегантностью. В соответствии с замыслом архитекторов, верхний профиль перильного ограждения не повторяет абрис пролётного строения, а остаётся строго горизонтальным. Это решение, по мнению авторов, добавляет спокойные горизонталы в окружающий городской пейзаж. Лёгкие и тонкие мосты на основе стеклопластика, проектный срок службы которых составляет до 60 лет, куда лучше вписываются в городскую среду, чем их более массивные деревянные предшественники. За последние годы берега обзавелись зрелыми деревьями, что способствует улучшению экологии и спокойному прогулочному стилю пешеходного движения, характерному для парковых зон. Именно поэтому силуэты перил новых мостов должны были стать максимально изящными: тонкими и почти незаметными. Решения удалось воплотить в жизнь в полной мере.



*Рисунок 11. Пешеходный мост на основе пролётного строения из стеклопластика с экспрессивной металлической решёткой перил. Роттердам, Голландия. 2016 г.*

*Figure 11. Footbridge with GFRP-deck and expressive metal railing grill. Rotterdam, Netherlands. 2016*

<https://materialdistrict.com/article/plastic-bridges-rotterdam/>

<sup>22</sup> FiberCore Europe (англ.).

<sup>23</sup> Olaf Gipser Architects (англ.).

<sup>24</sup> Klaas Jan Wardenaar (голл.).

<sup>25</sup> Vista Landscape Architecture and Urbanism (англ.).

<sup>26</sup> Olaf Gipser Architects. 033 / Slow-traffic Bridges / Rotterdam / Completed / 2012 / with Vista [Электронный ресурс] <https://olafgipser.com/033-slow-traffic-bridges/> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. англ. (дата обращения: 28.03.2019).

Для всех мостов, изготовленных компанией «ФайберКор Европа» по технологии «ИнфраКор»<sup>27</sup> характерен гибридный дизайн, соединяющий эстетику изящной и тонкой стеклопластиковой палубы, имеющей рациональные очертания, и металлических перил, сделанных, как правило, из тонких стальных профилей. Стеклопластик и металл совместно работают на создание образа конструктивной чистоты, лаконизма, деликатности и выражения базовых эстетических свойств каждого из материалов. Формируется гибридный дизайн, который, позволяет удачно вписывать современные сооружения в сложившийся городской ландшафт.

### **Направления дизайна современных композитных пешеходных мостов. Принятая классификация**

Спектр применения ФАП в мостостроении весьма широк. Применение новых материалов раскрывает целый гамму направлений по оптимизации существующих конструкций и предложению новых оригинальных архитектурных идей [20]. В ходе проведения исследования: сбора и анализа примеров использования современных композитов при строительстве пешеходных мостов была принята следующая классификация (определяющими параметрами послужили новизна технологии и конструкции и новизна дизайна):

1. применение композитных материалов в сочетании с традиционным дизайном;
2. применение композитных и традиционных материалов в сочетании с гибридным дизайном;
3. применение композитных материалов в сочетании с новым дизайном.

Первое направление связано с воплощением во внешнем облике сооружения традиционных эстетических принципов. При этом, как правило, привычные традиционные материалы заменяются новейшими композитами. Отличия сводятся к оптимизации ряда геометрических параметров какой-либо классической конструкции. Под традиционным дизайном в нашем исследовании понимается совокупность архитектурно-художественных качеств, характерная для классических мостов, спроектированных и построенных в докомпьютерную эру. По мнению доктора технических наук ведущего российского исследователя архитектуры мостов И.Г. Овчинникова и его коллег, именно появление компьютерных технологий сыграло главную роль в существенном расширении возможностей в области проектирования современных переправ. Благодаря современным программным средствам, в арсенал новых приёмов вошли средства архитектурной бионики и параметрики, стали применяться оболочковые конструкции, появились управляемые, кинематические и прочие новейшие типы сооружений, обладающие принципиально новым дизайном [21].

Примером реализации принципа соединения новых материалов с традиционным дизайном может служить пешеходный мост над скоростной железной дорогой, открытый в 2001 году в столице провинции Льейда в Каталонии. Объект был удостоен награды за инновационные технологии в 2005 году. На первый взгляд, этот пешеходный переход легко можно принять за металлический, но он выполнен целиком из стеклопластика. «Этот арочный пешеходный мост имеет пролёт 38 м, высоту 6,2 м и ширину пролётного строения 3 м. Мост сделан из стеклопластиковых профилей, полученных пултрузионным способом. Все узлы

---

<sup>27</sup> InfraCore (англ.) – См. FiberCore Europe. InfraCore Technology [Электронный ресурс] <https://www.fibercore-europe.com/en/fracore-technology/> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. англ. (дата обращения: 28.03.2019).

выполнены на болтах из нержавеющей стали. Общий вес моста составляет примерно 19 тонн. Он был изготовлен всего за три месяца и смонтирован с помощью крана всего за три часа» [22].



*Рисунок 12. Арочный стеклопластиковый пешеходный переход  
через железнодорожные пути. Льейда, Каталония, Испания. 2001 г.*

*Figure 12. Arch GFRP-footbridge across the railway. Lleida  
Pedestrian Bridge, Catalonia, Spain. 2001*

[https://pedelta.com/portfolio\\_page/lleida-gfrp-pedestrian-bridge/](https://pedelta.com/portfolio_page/lleida-gfrp-pedestrian-bridge/)

Вторая группа объединяет примеры, в которых локальное применение композитных материалов позволяет привнести характерные новые средства выразительности, в том числе – присущие предметному дизайну эпохи увлечения пластмассами. Под гибридным дизайном в данном исследовании понимается эстетика, основанная на соединении в единой конструкции традиционных и новых композитных материалов и использовании в общей композиции выразительных средств и особенностей каждого из них.

Пример такого решения – «ДНК-мост» в Энсхеде в Голландии, открытый 27 июля 2017 года. Проект велосипедного перехода с развязкой вело-движения в 2 уровнях над автомобильной трассой подготовлен компанией «АРУП». Переправа комбинированной конструкции собрана из стальных кососимметрично расположенных арок, очертаниями напоминающих спирали ДНК, и включённого в работу композитного пролётного строения из стеклопластика.

Эстетика этого моста является современной и реализует новые средства выразительности. Вместе с тем, применение композитных материалов и включение их в работу конструкции, фактически, никак не отражается на внешнем облике сооружения. Решение остаётся гибридным, что в должной степени соответствует комбинированному характеру конструкции объекта.

Для детального исследования наиболее актуальными представляются новейшие проекты, концепция которых явно выявляет характер механических, эстетических и иных свойств применяемых композитных материалов. Такие объекты в предложенной классификации отнесутся к третьей группе. Эти сооружения целиком (или почти целиком) выполнены из новейших композитов, а их облик характеризуется применением остросовременного дизайна, основанного на эстетике пластиковых изделий.



**Рисунок 13.** Велосипедный ДНК-мост. Энсхеде, Голландия. 2017 г.  
**Figure 13.** Bicycle DNK-bridge. Enschede, Netherlands. 2017

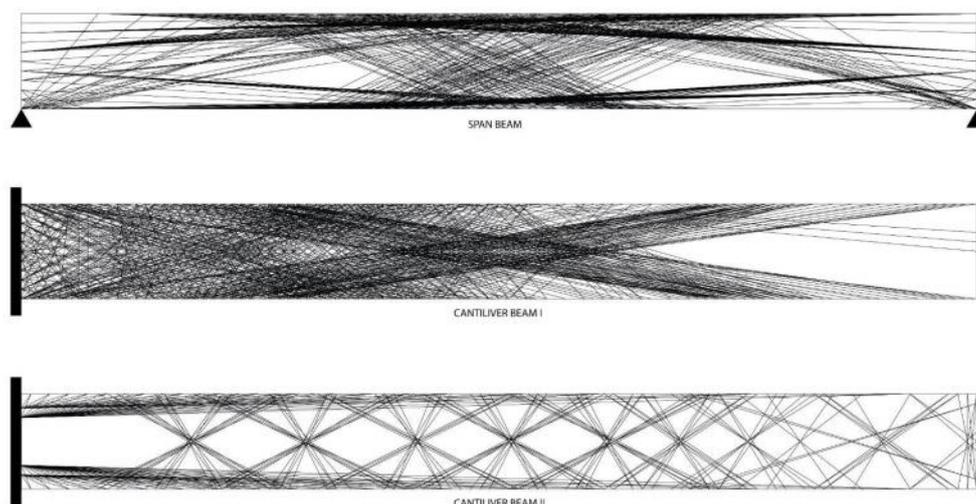
<https://www.arup.com/projects/dna-bridge>



**Рисунок 14.** Фрагмент стеклопластикового корпуса яхты. Германия  
**Figure 14.** Yacht made from GFRP. Germany

<https://www.gkteso.de/en/applications/materials/glass-fiber-reinforced-plastic/>

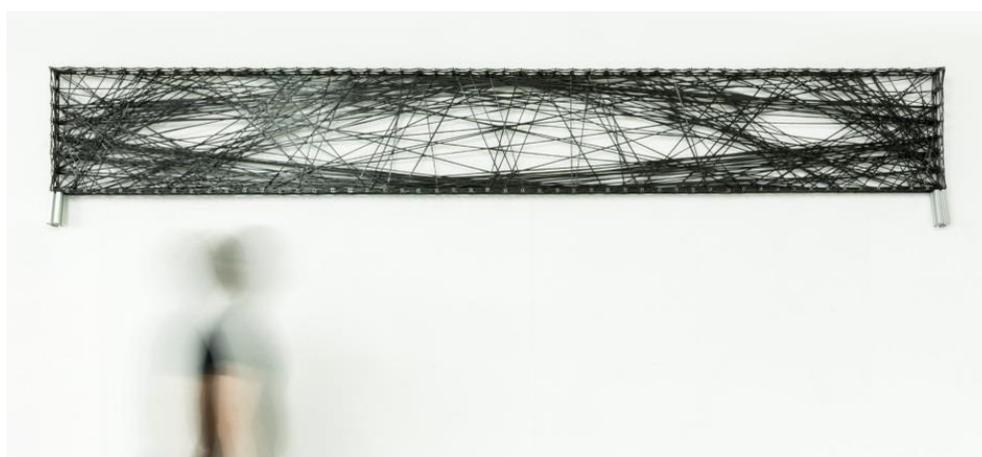
Использование формообразующих принципов, опробованных в кораблестроении и авиастроении, для изготовления современных мостов привносит в их дизайн элементы технической эстетики новейших моделей автомобилей, самолётов и яхт. Подобные приёмы могут позволить создать эффектный, респектабельный, технологичный и привлекательный архитектурный облик. Новейшие концепции корпусов яхт и морских судов основаны на технологических и эксплуатационных преимуществах углепластиков. «Основное преимущество конструкции из углепластика в сфере яхтинга заключается в значительно сниженном, по сравнению со сталью, весе, что означает более высокую скорость перемещения, большую дальность и значительно более эффективный расход топлива» [23]. В мостостроении, тем не менее, снижение веса конструкции не всегда является однозначно позитивным фактором. Пониженный собственный вес конструкции заметно влияет на колебания пролётного строения в процессе пешеходного движения. Данное обстоятельство негативным образом сказывается на комфорте пешеходов, привыкших к передвижению по более массивным и статичным железобетонным, металлическим и деревянным переходам [20].



**Рисунок 15.** Схемы балок, получаемых методом намотки композитных нитей с помощью трёхмерной печати: однопролётная балка, консольные балки. Лаборатория «ФибР». Штутгарт, Германия [6]

**Figure 15.** 3D-printed composite beams: span beam, cantilever beams. FibR Lab. Stuttgart, Germany [6]

Отдельного внимания заслуживает современная 3D-печать или аддитивная технология. Аддитивное производство подразумевает постепенное нанесение слоёв материала на основу, что в конечном итоге, позволяет последовательно формировать заданную поверхность. По словам белорусских исследователей, «трёхмерная печать может осуществляться с использованием различных материалов и разными способами, но в основе любого из них лежит принцип послойного создания (выращивания) твёрдого объекта» [24]. Таким образом, внешний облик типичного современного объекта, полученного с помощью 3D-принтера без дополнительной обработки, характеризуется выраженной послойной структурой поверхности. Второй немаловажной особенностью является наличие допусков, задающих точность соответствия материального образца исходной цифровой модели. Точность существенно зависит от применяемого оборудования и исходных параметров материала, из которого формируется готовый предмет [25].



**Рисунок 16.** Опытный образец однопролётной балки. Лаборатория «ФибР». Штутгарт. Германия [6]

**Figure 15.** 3D-printed composite experimental span beam prototype. FibR Lab. Stuttgart, Germany [6]

### Результаты и обсуждение

По словам Йориса Смитса<sup>28</sup>, сотрудника Факультета архитектуры и антропогенной среды в Технологическом университете Делфта<sup>29</sup>, «чтобы ответить на вопрос, что именно применение ФАП может привнести в архитектурный проект моста, необходимо сначала определить, как применение ФАП может влиять на внешний облик мостового сооружения, а также – каким именно формам и тектоническим особенностям FRP нужно отдать должное в контексте практического применения этого относительно нового в области проектирования мостов материала» [26]. По мнению исследователя, необходимо «определить путь, который позволит проектировщикам, архитекторам и инженерам выйти на новый уровень в проектировании мостов из FRP, – не использовать этот новый материал исключительно на основе прагматического инженерного обоснования, а начать воспринимать его как подлинный архитектурный вызов» [26].

И.Г. Овчинников и его коллеги, указывая на достоинства и недостатки современных композитных материалов отмечают, что на сегодняшний день «одно из направлений, где особенно эффективными могут оказаться полимерные композиционные материалы – строительство мостов, особенно малых» [16].

### Композитные материалы, традиционный дизайн Арочный мост Ойпорт в Голландии, 2014 г.



*Рисунок 17. Арочный мост из фиброармированного полиэстера. Ойпорт, Голландия. 2014 г.*

*Figure 17. Arch GFRP polyester bridge. Ooypoort, Netherlands. 2014*

<http://kyoryoenji.blogspot.com/2016/10/frp-ooypoort-footbridge-lc56m-2014.html>

Мост Ойпорт в Голландия с пролётом 56 м открылся в январе 2014 г. Переход соединяет две зоны природного заповедника<sup>30</sup> на берегах реки Вааль<sup>31</sup> и рассчитан на сезонное

<sup>28</sup> Joris Smits (голл.).

<sup>29</sup> Delft University of Technology (англ.).

<sup>30</sup> Nijmegen, Ooijpolder (голл.).

<sup>31</sup> Waal (голл.).

затопление паводковыми водами. Одним из критериев проектирования было то, что плавучие дома, расположенные в одном из притоков реки, должны иметь возможность проходить под мостом для технического обслуживания даже в случае высокого уровня воды. Объект изготовлен целиком из стеклопластика (фиброармированный полиэфир). Все композитные детали были произведены методом вакуумной инфузии полиэфирной смолы в неармированные стеклянные элементы. Мост изготовлен в виде трёх секций, которые впоследствии были соединены вместе – такое решение обосновано сравнительно большими размерами конструкции. Ступени изготавливались отдельно и впоследствии были прикреплены к палубе моста, чтобы образовать непрерывную арочную лестницу. Проект и расчёт конструкций с помощью метода конечных элементов осуществлён компанией «Лайтвейт Стракчерз»<sup>32</sup> (г. Делфт, Голландия). Архитектурную концепцию, как и в случае с малыми пешеходными мостиками для Роттердама, разработал Олаф Гипсер [27].

Дизайн переправы полностью строится на развитии привычного образа моста-арки. Высокий подъём пролёта подчёркивает силуэтность решения. Новая арка пешеходного перехода визуально перекликается с существующим по соседству крупным историческим автодорожным мостом. Это массивное сооружение со статными арками является одной из местных достопримечательностей.

Геометрические параметры сечений и рисунок перил подобраны таким образом, чтобы усилить цельность композиции объекта. Ступени, частично выступающие из плоскости палубы, – ещё одна примечательная деталь архитектуры данного моста – одновременно функциональная и эстетически выраженная. Открытые ступени без боковых тяг предотвращают загрязнение лестницы в сезон затопления и упрощают уборку поверхности<sup>33</sup>.

### Мост-провисающая лента в Испании, 2011 г.



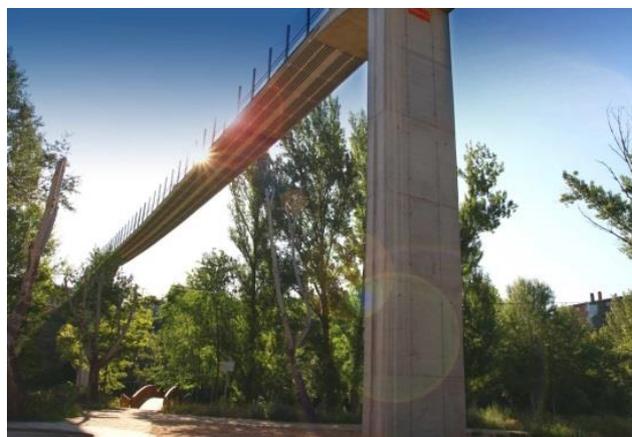
*Рисунок 18. Пешеходный мост через реку Хукар на нитях из углепластика. Куэнка, Испания*  
**Figure 18. Stressed CFRP-Ribbon Footbridge over Júcar River. Cuenca. Spain**

[http://www.ondiseno.com/noticia\\_en.php?id=5844](http://www.ondiseno.com/noticia_en.php?id=5844)

<sup>32</sup> Lightweight Structures BV (англ.).

<sup>33</sup> Dutch bridge among longest single-span composite bridges in the world [Электронный ресурс]  
<https://www.compositesworld.com/news/dutch-bridge-claims-to-be-largest-single-span-composite-bridge-in-the-world>  
(доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. англ. (дата обращения: 28.03.2019).

Мост через реку Хукар в испанской Куэнке с пролётным строением в виде провисающей ленты был открыт в 2011 г. Переправа устроена в три пролёта по 72 м. Для устройства прохожей части шириной 3 м, потребовалось установить 16 кабелей, изготовленных компанией «Фьючер Файберс»<sup>34</sup>. Тросы, выполненные из углепластика с эпоксидной оболочкой и имеющие 41 мм в диаметре, – сгруппированы в ленты по 4 кабеля. Каждый кабель собран из пучка по 8 нитей. Для достижения необходимой длины каждый трос пришлось собирать из 5 фрагментов по 43,7 м. Опорные пилоны из монолитного железобетона имеют высоту 21,6 м и 16,98 м.



(a)



(b)

**Рисунок 19.** Пешеходный мост через реку Хукар на нитях из углепластика. Куэнка, Испания: а) общий вид центрального пролёта моста с реки; б) кабель FutureFibers из углепластика с крепёжным узлом

**Figure 19.** Stressed CFRP-Ribbon Footbridge over Júcar River. Cuenca. Spain: а) bottom view from water level; б) CFRP-cable with connection unit by FutureFibers  
<http://hargaa.id/future-fibres.html>

Поверх нитей уложены бетонные плиты с размерами 3 x 3,5 м. Узлы и шарнирные втулки для крепления углепластиковых нитей изготовлены из нержавеющей стали по проекту компании «АКЦИОНА»<sup>35</sup> [28; 29]. Своеобразие и определённую оригинальность дизайну моста придаёт не только использование конструкции с провисающими лентами, но и устройство высоких сетчатых экранов. Тем не менее, внешний облик остаётся вполне традиционным: применение композитных материалов практически никак не отражается на эстетическом решении сооружения. Аналогичный дизайн мог бы быть реализован и в случае применения привычных для подобного типа переправ конструкций из стали.

### **Комбинированная конструкция: композитные и традиционные материалы, гибридный дизайн**

#### **Интерактивный мост в Хемнице, 2014 г.**

Интерактивный мост с пролётом около 32 м и 2,5-метровой прохожей частью, сделанной из сотовых модулей, представляет собой лёгкую конструкцию из несущих сегментов из стеклопластика в сочетании со стальной и композитной конструкцией. Объект – результат трёхлетнего совместного исследовательского проекта двух научно-производственных

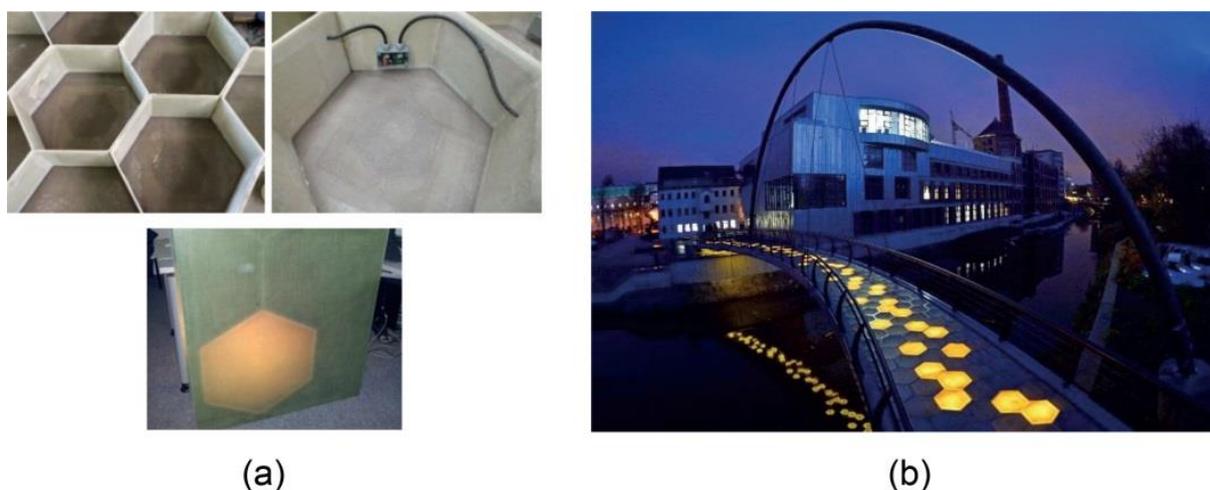
<sup>34</sup> Future Fibers (англ.).

<sup>35</sup> ACCIONA (исп.).

компаний – «Файбер-Тек Групп» и «Ситлконцепт»<sup>36</sup>, расположенных в Хемнице, и строительной компании «Хентшке»<sup>37</sup> из Баутцена в сотрудничестве с кафедрой строительства лёгких конструкций и переработки пластмасс в Университете Хемница, а также – Саксонским научно-исследовательским институтом текстиля, дочерним институтом Технического Университета Хемница. Проект финансировался банком «САБ»<sup>38</sup>.

В ходе экспериментальных разработок были созданы лёгкие сотовые модули из композитных материалов, которые были впервые применены для несущих конструкций в мостовом сооружении. Проектирование объекта осуществлялось инженерным бюро «Шульце и Ранк»<sup>39</sup> в соответствии с проектом архитекторов и инженеров «Байер.Штайнер»<sup>40</sup>. Исследовательский проект по испытаниям сооружения финансировался из средств «Европейского социального фонда»<sup>41</sup> [30].

Мост построен в составе туристического маршрута в городе Хемниц и позволяет пешеходам переправиться через одноимённую реку в бывшем промышленном районе. Расположенная здесь бывшая красильная фабрика Хаазе относится к числу городских достопримечательностей. Стоявший долгое время заброшенным старинный завод в кирпичном стиле был отреставрирован и приспособлен для современного использования.



**Рисунок 20.** Пешеходный мост через реку Хемниц с интерактивной подсветкой пролётного строения. Хемниц, Германия: а) конструкция пластиковых модулей с датчиками; б) интерактивная светодиодная подсветка в вечернее время. 2014 г. [30]

**Figure 20.** Pedestrian bridge across Chemnitz River with interactive deck illumination. Chemnitz, Germany: a) deck cell-elements with scanners installed; b) Interactive LED-illumination at night. 2014 [30]

Комбинированная конструкция пешеходного моста состоит из несущей стальной арки, к которой подвешено криволинейное в плане пролётное строение. Оно, в свою очередь, выполнено из «сотовых» стеклопластиковых модулей. Прозрачные модули снабжены

<sup>36</sup> Fiber-Tech Group, Steelconcept (англ.).

<sup>37</sup> Hentschke (нем.).

<sup>38</sup> Sächsische Aufbaubank (SAB) (нем.).

<sup>39</sup> Schulze & Rank (нем.).

<sup>40</sup> Beier.Steiner (нем.).

<sup>41</sup> Technische Universität Chemnitz. Erste interaktive Wabenbrücke der Welt wurde eingeweiht [Электронный ресурс] <https://www.tu-chemnitz.de/tu/pressestelle/aktuell/6751> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. нем. (дата обращения: 28.03.2019).

светодиодными элементами, которые в вечернее время превращают сооружение в интерактивный световой аттракцион. В пролётное строение встроены датчики, которые изменяют сценарий подсветки моста. Сооружение реагирует на движение пешеходов, фиксируя светом линию хода каждого из проходящих по мосту людей.

### Пешеходный и велосипедный мост Симбио в Голландии, 2016 г.



*Рисунок 21. Пешеходный мост Симбио с пролётным строением на основе фиброармированного композита. Мидден-Делфланд, Голландия. 2016 г.*

*Figure 21. Pedestrian bridge with FRP-deck. Midden-Delfland, Netherlands. 2016*

<https://klagenfurt.gruene.at/alltagsradeln/>

Мост Симбио<sup>42</sup> с наибольшим пролётом 35 м открыт 17 ноября 2016 г. в Голландии. Переправа возведена для соединения Научного парка Технополис<sup>43</sup> в Делфте и рекреационной зоны<sup>44</sup> в общине Мидден-Делфланд удобным велосипедным и пешеходным маршрутом. Для соединения территорий потребовалось сооружение перехода через расположенную на южной границе Делфта водную преграду – Мельничный ручей Карритаат<sup>45</sup>, имеющий ширину около 35 м.

Архитектурная концепция сооружения была выбрана по конкурсу, проведённому Техническим Университетом Делфта<sup>46</sup>. Дизайн разработал выигравший конкурс студент Рафаил Гкаидатцис<sup>47</sup>.

Конструкция моста комбинированная и основана на соединении стальной несущей сквозной фермы и пролётного строения из ФАП. Выкрашенная в активный красный цвет конструкция символизирует взаимодействие между природой и современными технологиями.

Предложенный Гкаидатцисом архитектурно-художественный образ сооружения интуитивно атрибутируется как объект современного дизайна. Воплощённые в архитектуре моста привычные для мастеров компьютерного проектирования полигональные решётки выкрашены в активный красный цвет. Глядя на асимметричные и динамично построенные стержне-пластинчатые конструкции ферм моста, зритель безошибочно определяет, что объект

<sup>42</sup> Symbiobrug (Karitaatmolenslootbrug) (голл.).

<sup>43</sup> Thijssenweg (голл.).

<sup>44</sup> Akerdijkse Bos (голл.).

<sup>45</sup> Karitaatmolensloot (голл.).

<sup>46</sup> TU Delft (голл.).

<sup>47</sup> Rafail Gkaidatzis (англ.).

создан в цифровую эпоху и спроектирован с помощью параметрических методов цифрового дизайна. Этот эффект – несомненное достоинство проекта.



**Рисунок 22.** Пешеходный мост Симбио с пролётным строением на основе фиброармированного композита. Мидден-Делфланд, Голландия. 2016 г.  
**Figure 22.** Pedestrian bridge with FRP-deck. Midden-Delfland, Netherlands. 2016  
[https://farm9.staticflickr.com/8544/28088946110\\_e82daff2e8\\_b.jpg](https://farm9.staticflickr.com/8544/28088946110_e82daff2e8_b.jpg)

Одежды моста, имеющего веретенообразную форму в плане, и его развитые белоснежные борта ассоциируются с эстетикой современных пластмассовых изделий. Всё это в совокупности способствует формированию необычного гибридного дизайна сооружения [31].

### Композитные материалы, новый дизайн

Разводной «Мост Дракона» в Северном Уэльсе, Великобритания, 2013 г.



**Рисунок 23.** Разводной пешеходный «Мост Дракона» в Форид Харбор из стеклопластика и углепластика. Рил, Денбишир, Уэльс, Великобритания. 2013 г.  
**Figure 23.** Twin-bascule “Pont y Ddraig” drawbridge in Foryd Harbour made from GFRP and CFRP, Rhyl, Denbighshire, Wales, UK. 2013. UK

<https://www.dailypost.co.uk/news/north-wales-news/gallery/opening-new-pont-y-ddraig-6224675>

Мост с разводными пролётными строениями в местечке Рил в Северном Уэльсе открылся для пешеходного и велосипедного движения в 2013 г. Механизмы разводных пролётов переправы выполнены с применением гидравлических цилиндров<sup>48</sup> – они спроектированы и изготовлены компанией «Шепкот инжиниринг лимитед»<sup>49</sup>. Затраты на сооружение составили около 4,2 млн фунтов<sup>50</sup>.

«Мост Дракона»<sup>51</sup> является частью протяжённого велосипедного маршрута через северное побережье Уэльса. При проектировании было принято решение использовать материалы, позволяющие существенно снизить вес пролётных строений.

Важную роль сыграл здесь запрос местных властей на рациональное использование электроэнергии. «Чтобы обеспечить доступ к причалам выше по течению от моста, новый пешеходный и велосипедный переход должен разводиться несколько раз в день, при этом совет графства Денбигшир был заинтересован в минимизации использования энергии. Использование литых конструкционных композиционных материалов ФАП для пролётных строений легло в основу проектной концепции, что и позволило максимально снизить вес, сократить время подъёма и снизить энергопотребление. Это также позволило придать пролётам моста скульптурную форму, что создаёт впечатляющий визуальный эффект при разведении пролётов моста. Помимо основных достоинств таких как: прочность, сокращение времени работы разводного механизма, сравнительная экономия электроэнергии – данное решение характеризуется долговечностью – согласно проекту срок эксплуатации 100 лет – и низкими эксплуатационными расходами»<sup>52</sup>.



**Рисунок 24.** Разводной пешеходный «Мост Дракона» в Форид Харбор из стеклопластика и углепластика. Рил, Денбигшир, Уэльс, Великобритания. 2013 г. [32]  
**Figure 24.** Twin-bascul “Pont y Ddraig” drawbridge in Foryd Harbour made from GFRP and CFRP, Rhyl, Denbighshire, Wales, UK. 2013 [32]

<sup>48</sup> Цилиндры 200 мм bore x 140 мм rod x 2,700 мм.

<sup>49</sup> Shepcote Engineering, LTD (англ.).

<sup>50</sup> Shepcote Engineering. Foryd Harbour Bridge Project. Hydraulic cylinders for a new £4.2 m bridge [Электронный ресурс] <http://www.shepcote-eng.com/foryd-harbour-bridge.html> (доступ свободный) Загл. с экрана. Яз. англ. (дата обращения: 28.03.2019).

<sup>51</sup> Pont y Ddraig, Bridge of the Dragon (вал., англ.).

<sup>52</sup> Materials Today. A landmark composite bridge for north wales [Электронный ресурс] <https://www.materialstoday.com/composite-applications/features/a-landmark-composite-bridge-for-north-wales/> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. англ. (дата обращения: 28.03.2019).

Композитная конструкция выполнена на основе многослойной матрицы из разнонаправленных армирующих стекловолокон «Корселл М»<sup>53</sup> и однонаправленного армирующего углеволокна «Гурит»<sup>54</sup>. Связующее компаунд – система на основе полимерной эпоксидной смолы «Ампрег эпокси»<sup>55</sup>. Габариты каждого из разводных пролётных строений – 10 (макс.) x 36 м. Центральный пилон, установленный на опоре, расположенной в воде, соединяется с разводными пролётами с помощью подъёмных кабелей [32; 33].

Мост спроектирован компанией «Гиффорд»<sup>56</sup>, входящей в транснациональную корпорацию «Рамболь»<sup>57, 58</sup>. Архитектурная концепция построена на применении традиционных узнаваемых форм, характерных для дизайна судов маломерного флота. В облике сооружения угадываются черты, характерные для белоснежных криволинейных обтекаемых корпусов яхт с тонкими стройными мачтами и растянутыми канатами снастей.

### Парковый мост в Шанхае, изготовленный на 3D-принтере, Китай, 2019 г.



© 视觉中国

**Рисунок 25.** Парковый пешеходный мостик из стекловолокна и акрилонитрил-стирол-акрилата, напечатанный на 3D-принтере. Шанхай, Китай. 2019 г.  
**Figure 24.** A 3D-printed park footbridge made of GFRP and ASA. Shanghai, China. 2019  
<http://chinaplus.cri.cn/photo/china/18/20190112/234804.html>

<sup>53</sup> Corecell M (GFRP) (англ.).

<sup>54</sup> Gurit UK (CFRP) (англ.).

<sup>55</sup> Ampreg Epoxy resin (англ.).

<sup>56</sup> Gifford (англ.).

<sup>57</sup> Ramboll (датск.)

<sup>58</sup> The Happy Pontist. A blog from the UK about bridges and bridge design. Foryd Harbour Bridge – an update (16 may 2013) [Электронный ресурс] <http://happyontist.blogspot.com/2013/05/foryd-harbour-bridge-update.html> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. англ. (дата обращения: 28.03.2019).

Небольшой пешеходный мостик с цельнокомпозитным пролётным строением открылся 11 января 2019 года в Китае – в парке в центре города Шанхая<sup>59</sup>.

«Мост имеет вес 5800 кг, из которых 12,5 % – стекловолокно, которое придает жёсткость и ударную вязкость материалу для 3D-печати акрилонитрил-стирол-акрилату, разработанному «Полимейкер»<sup>60</sup>. Мост был напечатан всего за 30 дней. <...> Пешеходный мост может выдержать нагрузку в 13 метрических тонн, что соответствует 4 чел. / кв. м, и ожидается, что мост будет служить переправой в парке в течение 30 лет. Добавление стеклянных волокон <...> также снижает коэффициент теплового расширения. Специалистам компании «Коин роботик»<sup>61</sup> пришлось установить четыре промышленных тепловых пушки для нагрева уже нанесенных слоёв и увеличения их адгезии к последующим слоям, что позволило устранить коробление и дало возможность внутренней кристаллической структуре прорасти сквозь слои и формировать единую конструкцию»<sup>62</sup>.



**Рисунок 26.** Акрилонитрил-стирол-акрилат перед разогревом и подачей на печатающее устройство. Готовые слои материала  
**Figure 26.** ASA before delivery to printing device. Printed layers  
<https://polymaker.com/3d-printed-bridge/>



**Рисунок 27.** Пешеходный мостик из стекловолокна и акрилонитрил-стирол-акрилата, напечатанный на 3D-принтере. Шанхай, Китай  
**Figure 27.** 3D-printed GFRP/ASA-footbridge Shanghai, China  
<https://polymaker.com/3d-printed-bridge/>

<sup>59</sup> China Plus. 3D-printed bridge opens in Shanghai park [Электронный ресурс] <http://chinaplus.cri.cn/photo/china/18/20190112/234804.html> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. англ. (дата обращения: 28.03.2019).

<sup>60</sup> Polymaker (англ.).

<sup>61</sup> Coin Robotic (англ.).

<sup>62</sup> Polymaker. 3D Printed Bridge & The Potential of Large Scale 3D Printing [Электронный ресурс] <https://polymaker.com/3d-printed-bridge/> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. англ. (дата обращения: 29.03.2019).

Для достижения предусмотренного проектом качества формы потребовалось после завершения печати отшлифовать наружные поверхности получившегося изделия. После обрезки характерных для послойных объектов аддитивного производства выступов слоёв полимерного материала и итоговой шлифовки, пролётное строение стало гладким и глянцевым, на криволинейных поверхностях появились рефлекссы, блики и отражения.

Такие визуальные эффекты прекрасно подчёркивают эстетику полимерного печатного изделия. Процесс подготовки к началу производства работ, включавший проектирование, лабораторные эксперименты и расчёты занял около полутора лет [32].

Абстрактная скульптурная форма и глянцевитая поверхность – два приёма выразительности, при помощи которых формируется архитектурное решение этого современного объекта. Геометрия нового моста максимально контрастирует с естественной природной средой парка, в котором он располагается. Эффект демонстративной антропогенности, выраженный в эстетике переправы, возникает благодаря совместной работе нескольких факторов. Среди них – остроумное применение новаторского полимерного материала, уникальность технологии изготовления объекта и полная свобода геометрии лёгкой динамичной современной формы.

### Заключение и выводы

В ходе данного исследования решены следующие задачи и сделаны следующие выводы:

1. В статье представлен краткий обзор истории применения пластиковых и композитных материалов в дизайне и строительстве. Наиболее перспективными, в том числе с архитектурно-художественной точки зрения, сегодня являются самые передовые технологии, применяющиеся в строительстве современных цельнокомпозитных моноблочных и сборных изделий и сооружений из фиброармированных композитов. Самые интересные из этих объектов сегодня выполняются по технологии трёхмерной печати. В ходе исследования выявлены основные особенности, характерные для архитектуры современных пешеходных мостов из ФАП. Приведены примеры современных объектов такого типа.

2. В соответствии с последними исследованиями и разработками, ФАП могут применяться в различных областях мостостроения. Одно из наиболее актуальных направлений – возведение малых пешеходных и велосипедных мостов, в том числе – с цельнокомпозитными пролётными строениями. В статье предложена архитектурная классификация современных пешеходных мостов, построенных с применением композитных полимерных материалов по параметрам новизны в используемых материалах и дизайне.

- a. новые композитные материалы + традиционный дизайн;
- b. новые композитные и традиционные материалы + гибридный дизайн;
- c. новые композитные материалы + новый дизайн.

3. Проведён краткий обзор реализованных объектов (шесть объектов за десять лет) – по два примера для каждой из групп, предложенных в классификации. В последние годы было воплощено довольно много объектов, в конструкции которых применяются ФАП. Тем не менее, лишь малая часть из них на сегодняшний день представляет существенный интерес с точки зрения архитектуры и дизайна.

4. Проектирование и возведение пешеходных мостов из композитных полимерных материалов является одним из перспективных направлений в современном мостостроении. Опыт европейских городов – прежде всего, Роттердама, – наглядно демонстрирует

эффективность замены старых металлических и деревянных малых городских мостиков новыми – с пролётными строениями из ФАП.

5. Наиболее перспективными для дальнейшего исследования, совершенствования и внедрения в производство в области применения ФАП для строительства пешеходных мостов являются технологии трёхмерной печати и параметрического проектирования. Эти технологии позволяют придать пешеходным мостам из композитных пластиков эффектный современный внешний облик, выражающий механические и эстетические свойства композитных полимеров в соединении с возможностями современного дизайна, основанного на трёхмерном компьютерном проектировании.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ушаков А.Е., Кленин Ю.Г., Сорина Т.Г., Хайретдинов А.Х., Сафонов А.А. Мостовые конструкции из композитов // Композиты и наноструктуры. – 2009. – №3 (3). – С. 25–37.
2. Аверченко Г.А., Квитко А.В. Развитие композитов в мостостроении // Научные исследования: от теории к практике. – 2016. – № 4–2 (10). – С. 10–16.
3. Meier U. Proposal for a carbon fibre reinforced composite bridge across the Strait of Gibraltar at its narrowest site // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Management and Engineering Manufacture. – 1987. – 201(22) June 1987. – P. 73–78.
4. Михайлова А.С. Использование композитного материала – пластик в современном дизайне // Вестник Казанского технологического университета. – 2015. – №17. Т. 18. – С. 159–162.
5. Муртазина С.А. Области применения полимерных материалов в современном дизайне // Вестник Казанского технологического университета. – 2010. – №10. – С. 146–150.
6. Щербакова И. Как и почему пластик вошёл в моду? И как носить модные вещи из пластика и выжить [Электронный ресурс] // Интернет-журнал L'Officiel (12.06.2018) – URL: <https://www.lofficielrussia.ru/moda/kak-i-pochemu-plastik-voshel-v-modu> (дата обращения: 28.03.19).
7. Барт Р. Мифологии – М.: Академический Проект, 2010.
8. Dörstelmann M. Aus der Wissenschaft Robotische in die Praxis. Robotische Herstellungsverfahren in Bauwesen // Guest professorship for Emerging Technologies (04/2017–10/2017), Arena 2036, 18.08.2018 – Technical University of Munich, 2018.
9. С.Б. Языева, П.Б. Кулинич Экологический аспект в дизайне изделий из полимеров // Инженерный вестник Дона. – 2012. № 2 (20). – С. 570–573.
10. Васильева Н.Г. Биоразлагаемые полимеры // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – №22. Т. 16. – С. 156–157.
11. Gkaidatzis R. Bio-based FRP Structures: A pedestrian Bridge in Schiphol Logistics Park: master thesis. Delft, 2014.
12. Volmer X. Creating architecture with CFRP. Introducing carbon fibre composite as structural material: master thesis. – Delft, 2015. – P. 1–19.

13. Gineersnow. The World's First Modular Glass-Fibre Reinforced Plastic Bridge [Электронный ресурс] <https://gineersnow.com/engineering/civil/worlds-first-modular-glass-fibre-reinforced-plastic-bridge> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. англ. (дата обращения: 28.03.2019).
14. Хрюкин А.А., Смолина М.В., Оценка напряженно-деформированного состояния пролётных строений моста, усиленного композитными материалами // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. Наука и образования. – 2016. – №4. – С. 100–105.
15. ГК «Рускомполит» «Стеклолит». Цельнокомпозитное пролетное строение для надземных пешеходных переходов «МОБИСТЕК» [Электронный ресурс] <http://steklonit.com/ru/produktsiya/kompozitnye-materialy/zelno-kompozitnie-proletnie-stroeniya-mobistek> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус. (дата обращения: 28.03.2019).
16. Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Мандрик-Котов Б.Б., Михалдыкин Е.С. Проблемы применения полимерных композиционных материалов в транспортном строительстве [Электронный ресурс] // Интернет-журнал «Науковедение» 2016 Том 8, №6 (ноябрь–декабрь 2016) <http://naukovedenie.ru/PDF/89TVN616.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. (дата обращения: 28.03.2019).
17. ГК «Рускомполит». Цельнокомпозитные пролетные строения для мостовых сооружений [Электронный ресурс] <http://www.ruscomposit.com/catalog/elementy-obustroystva/tselnokompozitnye-proletnye-stroeniya-dlya-mostovykh-sooruzheniy/> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус. (дата обращения: 28.03.2019).
18. Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Ильченко Е.Д., Михалдыкин Е.С. Систематизация и анализ нормативно технической документации по применению полимерных композиционных материалов в транспортном строительстве. Часть 1 [Электронный ресурс] // Интернет-журнал «Науковедение» 2017 Том 9, №1 (январь–февраль 2017) <http://naukovedenie.ru/PDF/32TVN117.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. (дата обращения: 28.03.2019).
19. Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Ильченко Е.Д., Михалдыкин Е.С. Систематизация и анализ нормативно технической документации по применению полимерных композиционных материалов в транспортном строительстве. Часть 2 [Электронный ресурс] // Интернет-журнал «Науковедение» 2017 Том 9, №1 (январь–февраль 2017) <http://naukovedenie.ru/PDF/45TVN117.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. (дата обращения: 28.03.2019).
20. Sonnenschein R., Gajdosova K., Holly I. FRP Composites and Their Using in the Construction of Bridges. World Multidisciplinary Civil Engineering-Architecture-Urban Planning Symposium 2016, WMCAUS 2016 // Procedia Engineering – 2016. 161 (2016). P. 477–482.
21. Овчинников И.Г., Овчинников И.И., Караханян А.Б. Пешеходные мосты современности: тенденции проектирования. Часть 1. Использование бионического подхода [Электронный ресурс] // Интернет-журнал «Науковедение» 2015 Том 7 №2 (март–апрель 2015) <https://naukovedenie.ru/PDF/81TVN215.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/81TVN215. (дата обращения: 28.03.2019).

22. Pyrzowski L., Miśkiewicz M., Modern GFRP Composite Footbridges // “Environmental Engineering” 10th International Conference, Vilnius Gediminas Technical University Lithuania, 27–28 April 2017 – Vilnius, 2017 – P. 1–8.
23. Moran yacht & ship. Carbon fiber yacht construction. Is it the future? [Электронный ресурс] <https://www.moranyachts.com/news/carbon-fiber-yacht-construction-is-it-the-future/> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. англ. (дата обращения: 28.03.2019).
24. Савицкий В.В., Голубев А.Н., Быковский Д.И. Исследование влияния параметров 3D-печати на размерную точность изделий // Вестник Витебского государственного технологического университета. – 2018. – №2 (35). – С. 52–61.
25. Елистратова А.А., Коршакевич И.С., Тихоненко Д.В. Технологии 3D-печати: преимущества и недостатки // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2015. – Т. 1. № 11. – С. 557–559.
26. Smits J. Fiber-Reinforced Polymer Bridge Design in the Netherlands: Architectural Challenges toward Innovative, Sustainable, and Durable Bridges // Engineering. The official journal of the Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press – 2016. – №2 (2016) – P. 518–527.
27. JEC group. Opening of composite pedestrian bridge "Ooypoort" in Nijmegen, the Netherlands [Электронный ресурс] <http://www.jeccomposites.com/knowledge/international-composites-news/opening-composite-pedestrian-bridge-ooypoort-nijmegen> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. англ. (дата обращения: 28.03.2019).
28. Rodríguez López B. Puentes de plástico. Primeras experiencias con materiales compuestos basados en polímeros como alternativa al hormigón // I+D+i. – 2012. – Febrero 2012. – P. 32–37.
29. Liu Y., Zwingmann B., Schlaich M. Carbon Fiber Reinforced Polymer for Cable Structures A Review // Polymers 2015, 7(10), 2078–2099 [Электронный ресурс] <https://www.mdpi.com/2073-4360/7/10/1501/htm> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. англ. DOI:10.3390/polym7101501 (дата обращения: 28.03.2019).
30. Ehrlich A., Röhrkohl M., Rudolph E., Krübel S. Textilbasierter leichtbau in Sachsen. Ergebnisbroschüre 2015 – Chemnitz: Technische Universität Chemnitz, 2016. – ISBN 978-3944640-74-7.
31. Delft en Schiedam (IODS). Symbiobrug (voorheen Karitaatmolenslootbrug) [Электронный ресурс] <http://www.iods.nl/projecten/recreatieve-routestructuur/symbiobrug-voorheen-karitaatmolenslootbrug> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. голл. (дата обращения: 28.03.2019).
32. ГК «Альфа Арс Метизы». Пешеходный мост гавани Форид [Электронный ресурс] <http://www.alfa-industry.ru/news/104/3844/> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус. (дата обращения: 28.03.2019).
33. Boissonneault T. 15-meter-long 3D printed footbridge opens in Shanghai // 3D Printing Media Network. January 16, 2019 <https://www.3dprintingmedia.network/3d-printed-footbridge-shanghai/> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. англ. (дата обращения: 28.03.2019).

**Strugach Alexander Gennadjevich**

LLC «SAB», Saint-Petersburg, Russia  
E-mail: r-9@bk.ru

**Trifonov Andrey Gennadjevich**

LLC «SAB», Saint-Petersburg, Russia  
E-mail: triffon@mail.ru

## Architecture of contemporary pedestrian bridges made of fiber-reinforced composite materials

**Abstract.** Composite materials are often used in the construction industry nowadays. Including such industries as construction of bridges – unique structures. Today it is possible to produce from FRP not only separate bridge parts and single structural elements, but also entire span structures and one-piece composite bridges made as a monoblock element.

The architecture of contemporary footbridges built with the use of fiber reinforced composite plastics in recent decades is being studied and analyzed in the article. The case-study examines the history of plastic composites as structural materials and the trends and evolution of the design of plastic products. The paper proposes a classification of modern pedestrian bridges made of fiber reinforced composites (based on a combination of innovation in the use of materials and in the design).

The following three classes are distinguished: composite materials + traditional design; composite and traditional materials + hybrid design; composite materials + new design.

The most recent examples of objects belonging to each of the three groups identified in the classification were reviewed and analyzed in course of the study (including contemporary Russian examples of composite pedestrian bridges).

Particular attention is paid to the most advanced technologies, such as 3D-printing of composite bridges, as well as a number of other contemporary experimental production methods. The experience of scientists and manufacturers from Germany, Spain, Great Britain, China and other regions of the world has been studied.

Further research and application of modern fiber-reinforced composites in combination with the latest production technologies of 3D-printing and computer parametric design can contribute to the development of modern bridge construction, which would be helpful for expanding the typology of structures and improving the design of new structures.

**Keywords:** bridge construction; pedestrian bridge; architecture; composite materials; composites; plastics; 3D-printing; construction

### REFERENCES

1. Ushakov A.E., Klenin Yu.G., Sorina T.G., Khayretdinov A.KH., Safonov A.A. (2009). Bridge structures made of composites. *Composites and nanostructures*, 3(3), pp. 25–37 (in Russian).
2. Averchenko G.A., Kvitko A.V. (2016). The development of composites in bridge building. *Research: from theory to practice*, 4–2(10), pp. 10–16 (in Russian).
3. Meier U. (1987). Proposal for a carbon fibre reinforced composite bridge across the Strait of Gibraltar at its narrowest site. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Management and Engineering Manufacture*, 201(22), pp. 73–78.
4. Mikhaylova A.S. (2015). The use of composite material plastic in modern design. *Bulletin of Kazan Technological University*, 17(18), pp. 159–162 (in Russian).

5. Murtazina S.A. (2010). Application areas of polymeric materials in modern design // *Bulletin of Kazan Technological University*, 10, pp. 146–150 (in Russian).
6. Shcherbakova I. (2019). How and why did plastic come into fashion? And how to wear fashionable plastic things and survive. *Internet magazine L'Officiel*, [online]. Available at: <https://www.lofficielrussia.ru/moda/kak-i-pochemu-plastik-voshel-v-modu> (in Russian) [Accessed 28.03.2019].
7. Bart R. (2010). *Mifologii. [Mythology.]* Moscow: Academic Project.
8. Dörstelmann M. (2018). *Aus der Wissenschaft Robotische in die Praxis. Robotische Herstellungsverfahren in Bauwesen. Guest professorship for Emerging Technologies (04/2017–10/2017)*. Technical University of Munich [Accessed 18.08.2018].
9. Yazyeva S.B., Kulinich P.B. (2012). Ecological aspect in the design of products from polymers. *Dona Engineering Bulletin*, 2(20), pp. 570–573 (in Russian).
10. Vasil'eva N.G. (2013). Biodegradable polymers. *Bulletin of Kazan Technological University*, 22(16), pp. 156–157 (in Russian).
11. Gkaidatzis R. (2014). *Bio-based FRP Structures: A pedestrian Bridge in Schiphol Logistics Park: master thesis*. Delft.
12. Volmer X. (2015). *Creating architecture with CFRC. Introducing carbon fibre composite as structural material: master thesis*. Delft, pp. 1–19.
13. Gineersnow. (n.d.). *The World's First Modular Glass-Fibre Reinforced Plastic Bridge*. [online] Available at: <https://gineersnow.com/engineering/civil/worlds-first-modular-glass-fibre-reinforced-plastic-bridge> [Accessed 28.03.2019].
14. Khryukin A.A., Smolina M.V. (2016). Assessment of the stress-strain state of the bridge span structures reinforced with composite materials. *Natural resources of the Arctic and Subarctic. Science and Education*, 4, pp. 100–105 (in Russian).
15. GC "Ruskompozit" "Steklonit". (n.d.). *All-composite superstructure for elevated pedestrian crossings "MOBISTEK"*. [online] Available at: <http://steklonit.com/ru/produksiya/kompozitnye-materialy/zelno-kompozitnie-proletnie-stroeniya-mobistek> [Accessed 28.03.2019].
16. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Mandrik-Kotov B.B., Mikhaldykin E.S. (2019). Problems of application of polymeric composite materials in transport construction. *Naukovedenie*, [online] 6(8). Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/89TVN616.pdf> (in Russian) [Accessed 28.03.2019].
17. GC "Ruskompozit" (n.d.). *Full-span spans for bridge structures*. [online] Available at: <http://www.ruskompozit.com/catalog/elementy-obustroystva/tselnokompozitnye-proletnye-stroeniya-dlya-mostovykh-sooruzheniy/> [Accessed 28.03.2019].
18. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Ilchenko E.D., Mikhaldykin E.S. (2017). Systematization and analysis of normative and technical documentation on the use of polymer composites in transport construction. Part 1. *Naukovedenie*, [online] 1(7). Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/32TVN117.pdf> (in Russian) [Accessed 28.03.2019].
19. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Ilchenko E.D., Mikhaldykin E.S. (2017). Systematization and analysis of normative and technical documentation on the use of polymer composites in transport construction. Part 2. *Naukovedenie*, [online] 1(7). Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/45TVN117.pdf> (in Russian) [Accessed 28.03.2019].
20. Sonnenschein R., Gajdosova K., Holly I. (2016). FRP Composites and Their Using in the Construction of Bridges. *World Multidisciplinary Civil Engineering-Architecture-*

- Urban Planning Symposium 2016, WMCAUS 2016. *Procedia Engineering*, 161, pp. 477–482.
21. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Karakhanyan A.B. (2015). Pedestrian Bridges: modern trends design. Part 1. Using the bionic approach. *Naukovedenie*, [online] 2(7). Available at: <https://naukovedenie.ru/PDF/81TVN215.pdf> (in Russian) DOI: 10.15862/81TVN215 [Accessed 28.03.2019].
  22. Pyrzowski L., Miškiewicz M. (2017). *Modern GFRP Composite Footbridges*. Lithuania: Vilnius Gediminas Technical University, pp. 1–8.
  23. Moran yacht & ship (n.d.). *Carbon fiber yacht construction. Is it the future?* [online] Available at: <https://www.moranyachts.com/news/carbon-fiber-yacht-construction-is-it-the-future/> [Accessed 28.03.2019].
  24. Savitskiy V.V., Golubev A.N., Bykovskiy D.I. (2018). Study of the influence of 3D printing parameters on dimensional accuracy of products. *Vestnik of Vitebsk State Technological University*, 2(35), pp. 52–61 (in Russian)
  25. Elistratova A.A., Korshakevich I.S., Tikhonenko D.V. (2015). 3D printing technologies: advantages and disadvantages. *Actual problems of aviation and cosmonautics*, 11(1), pp. 557–559 (in Russian).
  26. Smits J. (2016). Fiber-Reinforced Polymer Bridge Design in the Netherlands: Architectural Challenges toward Innovative, Sustainable, and Durable Bridges. *Engineering. The official journal of the Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press*, 2, pp. 518–527.
  27. JEC group (n.d.). *Opening of composite pedestrian bridge "Ooypoort" in Nijmegen, the Netherlands*. [online] Available at: <http://www.jeccomposites.com/knowledge/international-composites-news/opening-composite-pedestrian-bridge-ooypoort-nijmegen> [Accessed 28.03.2019].
  28. Rodríguez López B. (2012). Plastic bridges First experiences with composite materials based on polymers as an alternative to concrete. *I+D+i*, pp. 32–37.
  29. Liu Y., Zwingmann B., Schlaich M. (2015). Carbon Fiber Reinforced Polymer for Cable Structures A Review. *Polymers*, [online] 7(10). Available at: <https://www.mdpi.com/2073-4360/7/10/1501/htm> (in Russian). DOI: 10.3390/polym7101501.
  30. Ehrlich A., Röhrkohl M., Rudolph E., Krübel S. (2016). *Textilbasierter leichtbau in Sachsen. Ergebnisbroschüre 2015*. Chemnitz: Technische Universität Chemnitz. ISBN 978-3944640-74-7.
  31. Delft en Schiedam (IODS). (n.d.). *Symbiobrug (formerly Karitaatmolenslootbrug)*. [online] Available at: <http://www.iods.nl/projecten/recreatieve-routestructuur/symbiobrug-voorheen-karitaatmolenslootbrug> [Accessed 28.03.2019].
  32. Alfa Ars Metizy. (n.d.). *Forid Harbor Pedestrian Bridge*. [online] Available at: <http://www.alfa-industry.ru/news/104/3844/> [Accessed 28.03.2019].
  33. Boissonneault T. (2019). 15-meter-long 3D printed footbridge opens in Shanghai. *3D Printing Media Network*, [online] 16. Available at: <https://www.3dprintingmedia.network/3d-printed-footbridge-shanghai/> (in Russian) [Accessed 28.03.2019].