

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» / Russian Journal of Transport Engineering <https://t-s.today>

2024, Том 11, № 3 / 2024, Vol. 11, Iss. 3 <https://t-s.today/issue-3-2024.html>

URL: <https://t-s.today/PDF/09SATS324.pdf>

DOI: 10.15862/09SATS324 (<https://doi.org/10.15862/09SATS324>)

2.1.8. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей (технические науки)

УДК 624.21

Применение полимерных композитных материалов в пролетных строениях автодорожных мостов

¹Пискунов А.А., ^{2,3}Луканкин С.А., ¹Мазур Е.В.,
⁴Петропавловских О.К., ⁴Ибрагимова А.А., ¹Нюхина Н.С., ¹Рыбаков С.В.

¹ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», Москва, Россия

²ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский
технический университет имени А.Н. Туполева-КАИ», Казань, Россия

³ФГБОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», Казань, Россия

⁴ФГБОУ ВО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет», Казань, Россия

Автор, ответственный за переписку: Пискунов Александр Алексеевич, e-mail: a.piskunov52@mail.ru

Аннотация. Развитие мостостроительной отрасли тесно связано с материалами, используемыми для строительства искусственных сооружений. В настоящее время, наиболее распространены железобетонные, металлические и сталежелезобетонные пролетные строения мостов. Однако в условиях постоянного развития строительной отрасли, возникает необходимость более широкого использования современных строительных материалов, конструкций и поиска новых технических решений. Одним из таких направлений является применение полимерных композитных материалов.

В настоящее время в мире существует более 360 мостов из полимерных композитных материалов, 150 из которых — автодорожные, остальные — пешеходные.

Коллективом научно-производственного предприятия «АПАТЭК» запроектировано, построено и обкатано первое в мире балочное цельнокомпозитное железнодорожное пролетное строение, изготовленное по пултрузионной технологии.

Применение полимерных композитов в качестве материала пролетных строений автодорожных мостовых сооружений является перспективным направлением для исследований, проектирования и строительства с учетом использования положительных свойств композитных материалов, таких как высокая прочность и жесткость, сравнительно малый вес,

стойкость к химическим воздействиям, долговечность, отсутствие электропроводности, способность к направленному изменению физико-механических свойств, повышение вязкости разрушения, заданию жесткости, прочности и других свойств.

Пролетные строения мостов из полимерных композитных материалов подразделяются на гибридные и цельнокомпозитные. Технология производства мостовых конструкций из полимерных композитных материалов представлена двумя видами: вакуумной инфузией и пултрузией. Наиболее часто используемые композитные материалы в мостостроении — это углепластик и стеклопластик.

Отсутствие нормативно-технических требований и методической базы по проектированию, строительству и эксплуатации мостов с пролетными строениями из полимерных композитных материалов на автомобильных дорогах России требуют проведения исследований и их разработки или создания специальных технических условий в случае строительства опытно-экспериментальных объектов.

Ключевые слова: мост; мостовые сооружения; полимерные композитные материалы; гибридные пролетные строения; цельнокомпозитные пролетные строения автодорожных мостов; стеклопластик; углепластик

Application of polymer composite materials in road bridge superstructures

¹Alexander A. Piskunov, ^{2,3}Sergei A. Lukankin, ¹Evgeny V. Mazur,
⁴Olga K. Petropavlovskikh, ⁴Aniia A. Ibragimova, ¹Natalia S. Nyukhina,
¹Sergey V. Rybakov

¹Russian University of Transport, Moscow, Russia

²Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI, Kazan, Russia

³Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russia

⁴Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russia

Corresponding author: Alexander A. Piskunov, e-mail: a.piskunov52@mail.ru

Abstract. The development of the bridge construction industry is closely connected with the materials used for the engineering structures construction. At present, the most widespread are reinforced concrete, metal and steel reinforced concrete bridge superstructures. However, in the conditions of constant construction industry development, there is a need for wider use of modern construction materials, structures and search for new technical solutions. One of such directions is the application of polymer composite materials.

Nowadays there are more than 360 bridges from polymer composite materials in the world, 150 of which are motorway bridges and the rest are pedestrian bridges.

The team of the Research and Development enterprise «APATEK» has designed, built and tested the world's first all-composite railway beam superstructure made by pultruded technology.

The use of polymer composites as a material for road bridge superstructures is a promising direction for research, design and construction, taking into account the use of positive properties of composite materials, such as high strength and rigidity, relatively lightweight, resistance to chemical influences, durability, lack of

electrical conductivity, ability to directional change of physical and mechanical properties, increase of fracture toughness, stiffness, strength and other properties of composite materials.

Bridge superstructures made of polymer composite materials are subdivided into hybrid and all-composite. The production technology of bridge structures from polymer composite materials is represented by two types: vacuum infusion and pultrusion. The most frequently used composite materials in bridge construction are carbon fibre reinforced plastic and fibreglass reinforced plastic.

Absence of normative-technical requirements and methodical base for design, construction and operation of bridges with spans from polymer composite materials on highways of Russia require research and their development or creation of special technical conditions in case of experimental and development objects construction.

Keywords: bridge; bridge structures; polymer composite materials; hybrid superstructures; all-composite spans of motorway bridges; fibreglass; carbon fibre reinforced plastic

Данная статья доступна по лицензии Creative Commons "Attribution" («Атрибуция») 4.0 Всемирная

This article is available under the Creative Commons "Attribution" 4.0 Global License



Введение

Introduction

Применение полимерных композитных материалов в строительстве определено распоряжением¹ Правительства Российской Федерации № 1307-р от 24 июля 2013 г. и постановлением² Правительства Российской Федерации № 328 (ред. от 28.01.2021 № 66) от 15.04.2014 г.

Армированные волокнами полимерные композиты в настоящее время являются одними из наиболее широко используемых современных материалов, они находят свое применение в гражданской, автомобильной, аэрокосмической, морской, биомедицинской и других видах промышленного производства.

В строительной отрасли полимерные композитные материалы (далее — ПКМ) начали применяться с 1970 годов. В мостостроении полимерные композиты используются более 30 лет [1].

В области производства и применения ПКМ ведущее место занимают страны Европы и Северной Америки, а также ряд азиатских стран, таких как Китай, Япония, Южная Корея.

Российская Федерация находится в числе стран, которые в совокупности производят около 5 процентов от общего объема композитов [2].

Исследования применения ПКМ открывают новые возможности для создания прочных, легких и долговечных конструкций.

Использование композитных материалов в строительных конструкциях позволяет снизить расходы на содержание, улучшить технические характеристики и эксплуатационные свойства.

Эти преимущества позволяют ПКМ стать перспективной альтернативой традиционным строительным материалам в мостостроении (табл. 1, 2).

В таблице 1 приведено сравнение физико-механических характеристик стали, древесины и некоторых видов ПКМ, наиболее распространенных на отечественном рынке.

¹ Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности»: постановление Правительства Рос. Федерации от 15 апр. 2014 г. № 328 (ред. От 12 февр. 2022 г. № 161) // Официальный интернет-портал правовой информации. — URL: <http://www.pravo.gov.ru> (дата обращения: 28.12.23).

² Об утверждении плана мероприятий («дорожной карты») «Развитие отрасли производства композитных материалов»: распоряжение Правительства Рос. Федерации от 24 июля 2013 г. № 1307-р. // Официальный интернет-портал правовой информации. — URL: <http://www.pravo.gov.ru> (дата обращения: 28.12.23).

Анализируя данные из таблицы 1, необходимо отметить, что ПКМ обладают высокой прочностью на разрыв, модулем упругости и удельными показателями вдоль волокон армирования.

По этим показателям они близки к стали, а в некоторых случаях даже превосходят ее. Однако, когда речь идет о показателях поперек армирующих волокон, полимерные композитные материалы становятся близки к физико-механическим показателям древесины.

Таблица 1 / Table 1

Сравнение физико-механических характеристик конструкционных материалов
Comparison of physical and mechanical characteristics of construction materials

Материал <i>Material</i>	Плотность ρ , т/м ³ <i>Density ρ, t/m³</i>	Прочность при растяжении R , ГПа <i>Tensile strength R, GPa</i>	Модуль упругости при растяжении E_p , ГПа <i>Modulus of elasticity in tension E_r, GPa</i>	Коэффициент R/ρ , ГПа/т*м ⁻³ <i>Coefficient R/ρ, GPa/t*m⁻³</i>	Коэффициент E_p/ρ , ГПа/т*м ⁻³ <i>R/ρ coefficient, GPa/t*m⁻³</i>
Полимерные композиционные материалы / <i>Polymer composite materials</i>					
1. Стеклопластик: <i>1. Fibreglass reinforced plastic:</i>					
— вдоль армирующих волокон <i>— along reinforcing fibres</i>	1,9–2,1	1,6–2,1	56–70	1,0–1,19	29,5–33,3
— поперек армирующих волокон <i>— across reinforcing fibres</i>	1,9–2,1	0,05–0,1	8,5–20	0,026–0,048	4,47–9,52
2. Углепластик: <i>2. Carbon fibre-reinforced plastic:</i>					
— вдоль армирующих волокон <i>— along the reinforcing fibres</i>	1,5–1,7	1,0–1,5	120–180	0,667–0,882	80–105
— поперек армирующих волокон <i>— across reinforcing fibres</i>	1,5–1,7	0,04–0,1	9–25	0,027–0,059	6–14,7
Древесина / <i>Wood</i>					
3. Сосна: <i>3. Pine:</i>					
— вдоль волокон <i>— along the fibres</i>	0,5	0,104	10	0,208	20
— поперек волокон <i>— across the fibres</i>	0,5	0,005	4	0,01	8
Сталь / <i>Steel</i>					
4. Сталь 15ХСНД <i>4. 15XCHD steel</i>	7,85	0,49	205	0,062	26

Составлена автором / *Compiled by the author*

В таблице 2 представлено сравнение эксплуатационных расходов на мост в г. Адлер, согласно которому общая стоимость композитной конструкции моста с учетом эксплуатационных расходов в 3–4 раза дешевле, чем металлическая и железобетонная конструкции соответственно.

Таблица 2 / Table 2

Сравнение эксплуатационных расходов на мост

Comparison of bridge operating costs

Тип конструкции Structure type	Масса конструкции, т Weight of the structure, tonnes				Стоимость конструкции, тыс. руб. Cost of structure, thousands rub.				Общая стоимость проекта, тыс. руб. Total cost of the project, thousands	Стоимость эксплуатационных затрат, тыс. руб. Operating costs, thousands rub.					Общая стоимость с учетом эксплуатационных затрат, тыс. руб. Total cost including operating costs, thousands rub.				
	опора pier	пролеты spans	сходы stair approach	общая general	опора pie	пролеты spans	сходы stair approach	общая general		5 лет 5 years	15 лет 15 years	30 лет 30 years	50 лет 50 years	70 лет 70 years	5 лет 5 years	15 лет 15 years	30 лет 30 years	50 лет 50 years	70 лет 70 years
Железобетон Reinforced concrete	94	128	123	345	3 280	3 769	664	7 623	18 123	285	8 578	27 759	81 967	139 738	18 408	26 700	54 881	100 090	157 861
Металл Metal	86	53	51	189	2 988	4 164	663	7 815	18 315	247	8 222	26 245	78 494	114 986	18 562	26 536	44 559	96 809	133 301
Композит Composite	44	20	25	83	1 800	5 650	6 300	13 750	24 250	0	601	2 528	8 706	15 098	24 250	24 850	26 777	32 956	39 348

Составлена автором на основе данных³ / Compiled by the author on the basis of data³

Изучение ПКМ началось в США с 40-х годов 20-го века [3]. В 50-х годах 20-го века велось активное исследование композитов в СССР [4–7].

В разные периоды времени исследованиями в области применения ПКМ в строительной отрасли занимались А.Ф. Бернацкий, С.А. Бокарев, А.А. Берлин, В.В. Васильев, Г.М. Гуняев, Р.Ш. Дистанов, Э.С. Зеленский, А.Н. Иванов, В.С. Казарновский, В.М. Картопольцев, А.А. Лебедев, С.Г. Лехницкий, Е.С. Михалдыкин, Ю.В. Немировский, А.А. Неровных, И.Г. Овчинников, И.И. Овчинников, В.Д. Протасов, Б.В. Пыринов, П.М. Саламахин, В.А. Слепец, Д.Н. Смердов, В.П. Устинов, В.А. Уткин, А.М. Фёдоров и Г.П. Черепанов и др.

Из результатов анализа научных работ и публикаций следует, что направление исследований в области применения ПКМ в мостостроении является актуальным и требует дальнейшего изучения.

³ Ушаков А.Е. Второй практический семинар «Применение углеволокнистых материалов в строительстве» [Электронный ресурс] // Композиционные материалы в конструкциях мостов. 2010. URL: http://www.atomeks.ru/old/mediafiles/u/files/Atomex10.12.2010/3_Ushakov.pdf.

О полимерных композитных материалах

About polymer composite materials

Существует большое число видов ПКМ, подробную классификацию которых изложил Д.М. Карпинос [8].

Композит представляет собой неоднородный сплошной материал, состоящий из двух или более компонентов, среди которых можно выделить армирующие элементы, обеспечивающие необходимые механические характеристики материала, и матрицу (связующее), обеспечивающую совместную работу армирующих элементов. Матрицей является компонент, обладающий непрерывностью по всему объему, а армирующим или усиливающим называют прерывный компонент, разделенный в объеме композиции.

Композитные материалы создаются из двух или более компонентов при сохранении индивидуальности каждого из них, поскольку являются гетерофазными системами. Можно выделить следующие характерные признаки композитных материалов:

- состав и форма компонентов материала определены заранее;
- компоненты присутствуют в количествах, обеспечивающих заданные свойства материала;
- материал является однородным в макромасштабе и неоднородным в микромасштабе (между компонентами существует явная граница раздела, и они различаются по свойствам).

В волокнистых композитах высокопрочные волокна воспринимают основные напряжения, возникающие в элементе при действии внешних нагрузок, а также обеспечивают жесткость и прочность элемента в направлении ориентации волокон. Заполняя межволоконное пространство, матрица, обеспечивает совместную работу отдельных волокон за счет собственной жесткости и взаимодействия, существующего на границе раздела «матрица — волокно». Таким образом, механические свойства композитных материалов определяются высокой прочностью армирующих волокон, жесткостью матрицы, прочностью связи на границе «матрица — волокно». Соотношения этих параметров характеризуют весь комплекс механических свойств материала и механизм его разрушения.

В настоящее время полимерные композиты получили широкое распространение в строительстве мостов [9; 10]. В промышленности используются волокна из углерода, стекла, арамида или базальта. Наиболее часто используемые композитные материалы в мостостроении — это углепластик и стеклопластик [11]. В работах [12–16] отмечается, что высокие результаты работы ПКМ в конструкциях достигаются при

использовании синтетических волокон, в [17; 18] подчеркивается, что хорошие результаты могут быть получены при использовании натуральных волокон, таких как лён, джут и др. Отдельное направление исследований находится в области разработки нанокompозитов, которые можно определить как многофазные твердые материалы, где хотя бы одна из фаз имеет средний размер в нанодиапазоне (до 100 нм), или структуры, имеющие повторяющиеся наноразмерные промежутки между различными фазами [19–21].

В качестве связующего материала применяются два основных класса связующих: термореактивные (отверждаются в результате химической реакции) и термопластичные (отверждаются при охлаждении). В строительстве большее распространение получили термореактивные связующие.

Термопласты, несмотря на их широкое распространение в повседневной жизни (полиэтилен, полипропилен), реже используются в качестве связующего для несущих конструкций из ПКМ. Важной особенностью термопластов является возможность их вторичной переработки.

В качестве термореактивных связующих в основном используются полиэфирные и эпоксидные смолы. Эпоксидные смолы, по сравнению с полиэфирными, прочнее, они более жесткие и хрупкие, но их стоимость выше в 2–4 раза.

Армирование волокнами позволяет использовать принципы проектирования и изготовления конструкций, основанные на том, что материал и изделие создаются одновременно в рамках одного и того же технологического процесса. В результате совмещения армирующих элементов и матрицы создается комплекс свойств композита, отражающий не только исходные характеристики его компонентов, но и дополнительные свойства, которыми слагаемые компоненты не обладают.

Свойства границы раздела, а именно адгезионное взаимодействие волокна и матрицы определяют уровень свойств композитов и их эксплуатационную надежность. Локальные напряжения в композите достигают максимальных значений вблизи или непосредственно на границе раздела, где чаще всего начинается разрушение материала. Граница раздела должна иметь определенные свойства, чтобы обеспечить эффективную передачу механической нагрузки от матрицы на волокно. Так, наличие границы раздела между армирующими элементами и матрицей существенно повышает трещиностойкость материала.

Для композитов характерно высокое сопротивление усталости, связанное с тем, что высокомодульные волокна, воспринимающие основную нагрузку, как хрупкие материалы не снижают своей несущей

способности при циклических нагрузках в отличие от пластически деформируемых материалов.

Современные композиты имеют не только широкий спектр физико-механических свойств, но и способны к их направленному изменению, такому как повышение вязкости разрушения, заданию жесткости, прочности и других свойств. Эти возможности расширяются при применении в композитах волокон различной природы и геометрии, то есть при создании гибридных композитов. Кроме того, для данных материалов характерно появление синергетического эффекта (согласованного совместного действия нескольких факторов в одном направлении). Причины синергетического эффекта в гибридных композитах связаны со статистической природой прочности волокон, специфической концентрацией напряжений при разрушении композита положительными начальными напряжениями, которые могут возникнуть в процессе изготовления изделий.

Преимущества использования полимерных композитных материалов в мостостроении

Advantages of using polymer composite materials in bridge construction

К преимуществам композитов по сравнению с традиционными строительными материалами относятся высокая прочность и жесткость, меньший вес при обеспечении равной прочности, стойкость к коррозии и химическим воздействиям, долговечность, низкие требования к техническому обслуживанию, сокращение сроков строительства и др.

Совершенствование прочностных, деформационных, теплофизических характеристик композитных материалов, дает возможность использовать их в конструкциях пролетных строений автодорожных мостов.

При проектировании пролетных строений мостов из ПКМ решается задача минимизации линейных размеров и массы конструкции при обеспечении заданных технических параметров и высокой надежности в требуемых условиях эксплуатации. Малый вес композитной конструкции позволяет использовать фундаменты меньшего размера, что снижает стоимость конструкции, а высокая долговечность, в долгосрочной перспективе предполагает снижение затрат на эксплуатационные расходы, ремонт и техническое обслуживание по сравнению с конструкциями из традиционных материалов.

Среди преимуществ композитов можно выделить возможность создания из них элементов конструкции с заранее заданными свойствами, наиболее полно соответствующими характеру и условиям работы пролетных строений мостов. Многообразие волокон и матричных

материалов, а также схем армирования, используемых при создании композитных конструкций, позволяет направленно регулировать прочность, жесткость, уровень рабочих температур эксплуатации и другие свойства путем подбора состава, изменения соотношения компонентов и макроструктуры композита [22].

Среди особенностей волокнистых полимерных композитных материалов можно выделить управляемую анизотропию механических свойств вдоль и поперёк волокон за счёт изменения углов укладки армирующих волокон. Подобное различие в свойствах дает возможность изменения жёсткости материала конструкции при его неизменной толщине в зависимости от углов армирования.

Полимерные композиты превосходят традиционные конструкционные материалы по соотношению прочности к весу, что определяет использование композитов в переносных мостах, особенно в случае чрезвычайных ситуаций, временных военных мостов, где малый вес, простота транспортировки и быстрый монтаж в сочетании с высокой прочностью имеют особое значение. В работе Бирюкова О.Р. [11] приводится информация о том, что минимальное или полное отсутствие эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) мостов из полимерных композитных материалов способствует малой радиоэлектронной заметности, а значит и повышению живучести мостовых переходов на военноавтомобильных дорогах.

Согласно данным источников⁴ [23], стеклопластиковый композит обладает большей прочностью на разрыв по сравнению с конструкционными сталями, используемыми в мостах, а также в гражданском строительстве.

Полимерные композиты обладают высокой сейсмостойкостью, что расширяет возможности выбора конструкционного материала для строительства мостов в сейсмически активных районах.

Стеклопластиковые композиты обладают высокой усталостной прочностью, что позволяет использовать их в мостостроении. Композиты, используемые для усиления элементов мостов и их конструкций, также увеличивают долговечность как железобетонных, так и стальных конструкций.

Волокна и матричные материалы, из которых состоят ПКМ, являются неметаллическими материалами, устойчивыми к агрессивному воздействию окружающей среды. Стеклопластики устойчивы к воздействию

⁴ EN 1992-1-1; Eurocode 2: Design of Concrete Structures — Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings. British Standard Institution: London, UK, 2004.

агрессивных химических веществ, жидкостей, щелочей [24] и к циклам замораживания оттаивания.

Высокая электроизоляция является еще одним положительным свойством стеклопластиковых композитов. ПКМ не являются проводниками электричества и могут быть использованы для строительства конструкций, расположенных в зонах с повышенным риском поражения электрическим током, например, таких, как пешеходные мосты над железной дорогой и т. п. [12]. Кроме того, композиты отличаются высокой теплоизоляцией и обеспечивают значительно меньший градиент распределения тепла, чем металлы, такие как сталь и алюминий, что важно при учёте температурных перепадов, которые вызывают дополнительные внутренние усилия в конструкциях мостов зимой и летом [25].

Немаловажным фактором распространения ПКМ в промышленности является их способность работать при знакопеременных циклических нагрузках (высокие показатели динамической или усталостной прочности). Как правило, материалы с более высоким модулем упругости армирующих волокон и с более высоким их содержанием в композите (до определённых пределов) обладают и более высокой усталостной прочностью. Одна из причин такой зависимости в том, что у более высокомодульного материала меньшие деформации при одинаковом уровне напряжений, что снижает вероятность образования трещин в полимерной матрице.

С точки зрения эстетики, конструкции из полимерных материалов могут быть окрашены в различные цвета, иметь разнообразные текстуры и архитектурные формы, что позволяет им гармонично вписываться в окружающую среду.

Ограничения применения ПКМ в мостостроении

Limitations of polymer composite materials application in bridge construction

Несмотря на перечисленные преимущества полимерных композитов, существует ряд проблем, которые затрудняют их применение в пролетных строениях автодорожных мостовых конструкций.

Основным ограничением является высокая стоимость конструкций из полимерных композитных материалов — они дороже, чем традиционные материалы. Высокие затраты связаны как со стоимостью материала, так и с технологией производства конструкций из ПКМ. Технологии, используемые в промышленности, позволяют достичь относительно низких затрат на повторяющиеся элементы, которые производятся большими партиями (например, в авиационной промышленности). При производстве изделий для мостовых сооружений

обычно используются индивидуально разработанные элементы и конструкции, предназначенные для определенного проекта, что повышает их стоимость.

Стеклопластики и углепластики получили широкое применение в отечественном мостостроении за счет оптимального соотношения физико-механических характеристик материала, однако они обладают рядом недостатков, присущих композитам. Например, ярко выраженная анизотропия, которая может существенно снижаться при перекрестной укладке монослоев, что влияет на жесткость конструкции. К недостаткам относятся низкая сопротивляемость местным воздействиям и низкий модуль упругости, которые могут привести к деформациям. По сравнению с другими композитными материалами, углепластики обладают большей усталостной прочностью, большей чувствительностью к концентрации напряжений, меньшей трещиностойкостью и меньшей остаточной прочностью при наличии дефекта [26].

Поведение ПКМ под воздействием перепадов температур является серьезным ограничением, поскольку коэффициент теплового расширения композитов значительно отличается от коэффициента теплового расширения стали и бетона, что затрудняет их совместную работу. К недостаткам композитов относится их низкая стойкость к высоким температурам. Например, у композитов с полиэфирной матрицей, снижение прочности наблюдается уже при температуре 80°C.⁵ Повышение показателей пожаробезопасности ПКМ можно достичь путем разработки полимерных материалов пониженной горючести, применением замедлителей горения (антипиренов), модификации полимеров, синтеза малогорючих полимеров. В большинстве случаев способ снижает физико-механические характеристики материала и увеличивает их стоимость, при этом не приводит к обеспечению требуемых показателей огнестойкости. Значительного результата можно достичь путем применения огнезащитных покрытий, при условии обеспечения требуемой адгезии между материалами и долговечности, что подробно описано в работе [27].

Следует отметить, что на сегодняшний день не сформированы нормативно-технические требования, а также методическая база по проектированию, строительству и эксплуатации сооружений из полимерных композитных материалов при возведении пролетных строений автодорожных мостов. Так, стандарты, разработанные для проектирования и расчета пешеходных мостов из ПКМ нельзя применить к проектированию и расчету автодорожных мостов из ПКМ, что требует

⁵ Potyrała P.B. Use of Fibre Reinforced Polymer Composites in Bridge Construction. State of the Art in Hybrid and All-Composite Structures // Thesis. 2011. URL: https://www.researchgate.net/publication/277235380_Use_of_fibre_reinforced_polymeromposites_in_bridge_construction_State_of_the_art_in_hybrid_and_all-composite_structures (дата обращения: 14.04.2024).

дополнительного проведения лабораторных и натурных исследований и испытаний для разработки и внедрения проектов на автомобильных дорогах. Многие российские документы копируют зарубежные нормативные и методические материалы, предназначенные в основном для проектирования пешеходных мостов из ПКМ [28]. Отсутствуют отечественные монографии, справочные пособия по проектированию конструкций с применением ПКМ, а также учебники для подготовки специалистов по применению ПКМ в транспортном строительстве.

Технологии изготовления конструкций из ПКМ

Construction technologies of structures from polymer composite materials

Работоспособность полимерных композитных конструкций обеспечивается не только рациональным подходом к определению и сочетанию исходных компонентов, но и оптимальной технологией производства, создающей прочную связь между компонентами при сохранении первоначальных свойств.

Существующие технологии производства изделий из ПКМ, отличаются по методам начального и окончательного формообразования изделия в зависимости от применяемых материалов для матрицы и наполнителя. От выбора способа формования заготовки зависят как итоговые характеристики изделия, так и его себестоимость. Обзор и анализ технологий производства композитов приведен в статье Голубева Е.В. [29]. В работе рассмотрены основные способы производства изделий из полимерных композитных материалов, а также их влияние на характеристики этих материалов.

Анализ существующих технологий производства изделий из композитных материалов по технологичности, необходимому аппаратно-технологическому обеспечению и производительности позволил сделать заключение о наибольшей применимости в процессе изготовления пролетных строений автодорожных мостов путем применения следующих технологий — контактного формования, вакуумной инфузии, пултрузии.

Наиболее простым способом получения изделий из ПКМ по аппаратурно-технологическому оформлению является контактное формование в открытых формах. Эта технология применяется для изготовления крупногабаритных малонагруженных элементов сложной конфигурации и осуществляется в основном двумя методами — ручной укладкой и напылением. На рисунке 1 показана схема ручного контактного формования.

Преимуществами технологии контактного формования являются: относительно несложный процесс производства; сравнительно быстрый период организации производства и обучения персонала; возможность получения изделий сложной формы и больших размеров; относительно низкая стоимость оснастки, оборудования и инструментов; возможность изготовления формообразующей оснастки из любого жёсткого и прочного материала и установки в изделия закладных деталей, что обеспечивает стабильность формы.

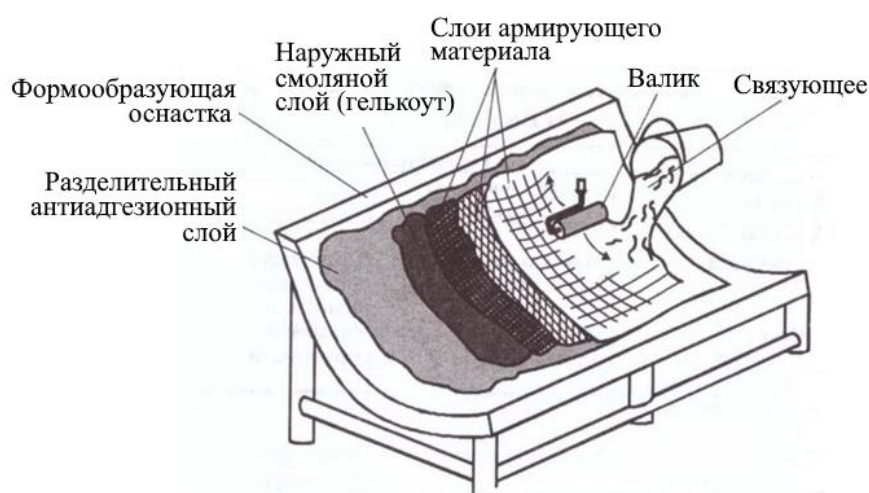


Рисунок 1. Схема ручного контактного формования (источник: <https://extxe.com/30142/tehnologija-izgotovlenija-izdelij-iz-polimernyh-kompozicionnyh-materialov-metodom-kontaktnogo-formovanija/>)

Figure 1. Manual contact moulding schematic design (Source: <https://extxe.com/30142/tehnologija-izgotovlenija-izdelij-iz-polimernyh-kompozicionnyh-materialov-metodom-kontaktnogo-formovanija/>)

В качестве недостатков технологии контактного формования необходимо отметить: большой объем ручного труда при подготовке смесей смол с отвердителем, раскрое армирующих материалов и при формовании; вредные условия труда; повышенный расход смол по сравнению с другими технологиями; поверхность изделий имеет декоративный вид лишь с одной стороны; качество изделий зависит от квалификации рабочих; трудность обеспечения стабильности физико-механических свойств в серии изделий; образование большого количества отходов в виде обрезков пластика и остатков смол.

Одной из наиболее перспективных и быстроразвивающихся технологий изготовления изделий из ПКМ можно назвать вакуумную инфузию. Это разновидность безавтоклавной трансферной технологии, однако, она предполагает применение более дешевой оснастки открытого типа и более простого оборудования благодаря применению подачи связующего с помощью вакуума, вместо создания избыточного давления.

В данном методе для пропитки связующим предварительно уложенного в оснастку сухого наполнителя, используется только разрежение, создаваемое в полости оснастки. Под действием перепада давления между полостью оснастки и источником связующего, последнее движется от источника к точке присоединения вакуумного насоса, пропитывая наполнитель (рис. 2).

С использованием технологии вакуумной инфузии возможно изготавливать крупногабаритные композитные конструкции (корпуса кораблей, лопасти ветряных установок, мостовые конструкции и др.). Технология вакуумной инфузии обеспечивает изготовление мостовой конструкции за один технологический этап, тем самым минимизировав работы по сборке, а также позволяет снять ограничения в области дизайна мостовых сооружений.

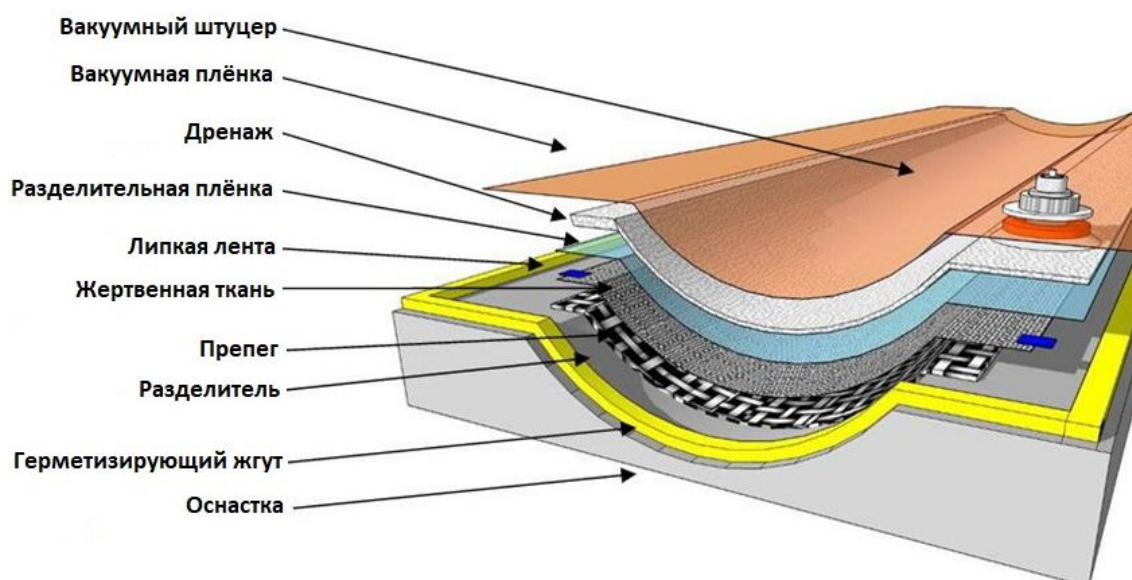


Рисунок 2. Схема изготовления детали из композитного материала методом вакуумной инфузии (источник: <https://vakuumtest.ru/vakuumnaya-formovka/>)

Figure 2. Schematic of composite part manufacturing by vacuum infusion (source: <https://vakuumtest.ru/vakuumnaya-formovka/>)

Технологический процесс вакуумной инфузии достаточно прост и экологичен. Можно отметить ряд преимуществ и недостатков вакуумной инфузии по сравнению с технологией выкладки. Преимущества метода включают: значительное снижение выделения вредных веществ; меньший расход смолы; неограниченное время подготовки и укладки армирующих тканей; снижение количества отходов; улучшение соотношения армирующего материала и смолы, вследствие чего получается более жесткое, прочное и легкое изделие; за счёт снижения доли смолы в ламинате, достигается снижение температуры экзотермического пика, в результате чего поверхность изделия меньше подвержена деформации.

Среди недостатков следует выделить высокую трудоемкость при производстве работ, повышенные требования к квалификации работников, ограничение по выбору наполнителей, сложность расчета равномерной подачи смолы, ввиду отсутствия единой методики, необходимость в пробных пропитках, поскольку деталь легко испортить.

Пултрузия — процесс производства профильных изделий с постоянным поперечным сечением из одноосно-ориентированных пластиков непрерывным способом. Схема технологического процесса производства изделия пултрузией приведена на рисунке 3.



Рисунок 3. Схема изготовления детали из композитного материала методом пултрузии (источник: <https://www.strongwell.com/about/the-pultrusion-process/>)

Figure 3. Schematic of composite material part manufacturing by pultrusion method (source: <https://www.strongwell.com/about/the-pultrusion-process/>)

Суть пултрузионной технологии заключается в том, что непрерывный стеклоровинг или нетканая, нитепрошивная лента протягивается через ванну с термореактивным полимерным связующим, затем поступает через фолдеры в обогреваемую формующую фильеру, отображающую геометрическую форму поперечного сечения изделия. В фильере связующее за короткий промежуток времени твердеет не столько за счёт тепла извне, сколько за счёт тепла, выделяющегося в процессе реакции отверждения связующего, обеспечивающего равномерный прогрев пакета-заготовки в объёме.

Высокие затраты компенсируются рядом преимуществ, характерных для этого процесса — строгим контролем натяжения и ориентации волокон, поддержанием постоянного содержания волокна в композите.

Преимущества технологии заключаются в автоматизации процесса, стабильности свойств изготавливаемых изделий, улучшении соотношения армирующего материала и смолы в результате чего получается более жесткое, прочное и легкое изделие, высокой производительности

процесса, возможности производства профилей неограниченной длины, уменьшении отходов материала за счет непрерывного процесса (в условиях крупной серии приближается к 99,5 %).

Недостатки метода: высокая стоимость оборудования и его энергоёмкость; большие затраты на формообразующие фильеры; ограничение по конструкции изделия.

Опыт применения полимерных композитных материалов в мостостроении

Experience of polymer composite materials application in bridge construction

Сооружение пролетных строений мостов из полимерных композитных материалов делятся на две группы в зависимости от использования композитов — гибридные (совместное использование композитов с другими материалами) и цельнокомпозитные (все элементы несущих конструкций, кроме опор, выполнены из композитов).

В работе Р.В. Potyrała⁵ представлены теоретические исследования, по результатам которых известно более 360 мостов из полимерных композитных материалов, 150 из которых — автомобильные, остальные — пешеходные. Среди 360 мостов — 53 с цельнокомпозитными пролетными строениями. История развития мостостроения с применением полимерных композитных материалов представлена в статье J. Qureshi [30].

В 1978 году в США в штате Вирджиния был построен первый мост, плита проезжей части которого выполнена из полимерного композитного материала.⁶ Длина моста составляет 4,9 м, а ширина 2,1 м.

В 1982 году в Китае был построен первый мост с цельнокомпозитным пролетным строением из стеклопластика — Miyun Bridge.⁶ Это балочный автомобильный мост, пролетное строение которого состоит из шести балок коробчатого сечения. Полная длина пролетного строения — 21 м, ширина — 9,8 м.

В 1990 году в Великобритании был построен пешеходный цельнокомпозитный мост — Aberfeldy Golf Course Bridge, длиной 112,8 метра и шириной 2,1 метра (рис. 4). Этот мост по-прежнему держит рекорд среди мостов из ПКМ по длине пролета, которая составляет 63 метра.⁷

⁶ Potyrała, P.B. Use of fibre-reinforced polymers in bridge construction. State of the art in hybrid and all-composite structures. / P.B. Potyrała. — URL: <http://upcommons.upc.edu/pfc/handle/2099.1/12353> (дата обращения: 04.01.24).

⁷ Sheno, R.A. Advanced polymer composites for structural applications in construction / R.A. Sheno, S.J. Moy, L.C. Hollaway — Southampton: Southampton University, 2002. — URL: <https://doi.org/10.1680/apcfsaic.31227.0001> (дата обращения: 04.01.24).



*Рисунок 4. Общий вид моста через поле для гольфа в Аберфелди
(источник: <https://www.flickr.com/photos/126268375@N08/35734470094>,
изображение Мюррея Макбея)*

Figure 4. General view of the bridge over the golf course at Aberfeldy (source: <https://www.flickr.com/photos/126268375@N08/35734470094>, image by Murray McBay)

В 2001 году в испанском городе Льеда был построен цельнокомпозитный пешеходный мост. Пролетное строение моста выполнено из стеклопластика в виде арки с затяжкой (рис. 5).

Высота моста — 6,2 м, ширина — 6 м, полная длина — 38 м, что является самой большой длиной для арочной конструкции пролетного строения из ПКМ.⁸

Во Франкфурте был построен Friedberg Bridge — однопролетный балочный мост, размеры которого составляют 27 м в длину и 5 м в ширину (рис. 6).

Пролетное строение представляет собой две стальные двутавровые балки с проезжей частью из стеклопластика, выполненной по типу ячеек.⁶ Пример расчета такой плиты представлен в работе L. Canning [32]. Объединение плиты проезжей части со стальными балками выполнено за счет клеевого соединения, что позволило увеличить жесткость конструкции.

⁸ The international handbook of FRP composites in civil engineering / Edited by Manoochehr Zoghi. — CRC Press, 2013. — 706 p.



Рисунок 5. Общий вид пешеходного моста Льеда [31]

Figure 5. General view of the Lied pedestrian bridge [31]



Рисунок 6. Установка пролетного строения Фридбергского моста (источник: <https://www.itke.uni-stuttgart.de/research/built-projects/road-bridge-with-frp-decks/>, изображение Яна Книпперса)

Figure 6. Installation of the Friedberg Bridge superstructure (source: <https://www.itke.uni-stuttgart.de/research/built-projects/road-bridge-with-frp-decks/>, image by Ian Knippers)

В 2004 и 2007 гг. в Испании были построены два моста, главные балки которых выполнены из углепластика, а плита проезжей части — из железобетона. Пролетное строение первого моста состоит из трех неразрезных балок общей длиной 46 м, изготовленных методом намотки. Пролетное строение второго моста представлено в виде четырех разрезных U-образных балок общей длиной 34 м, изготовленных методом проклеивания препрегов [33].

Т. Keller [34] предложил два основных направления использования композитных материалов при проектировании мостовых конструкций в виде замены традиционного материала на новый и адаптации конструкции к используемому полимерному композиту.

Примером адаптации является построенный в Швейцарии мост Pontresina, выполненный в виде двухпролетной стеклопластиковой фермы (рис. 7, 8).

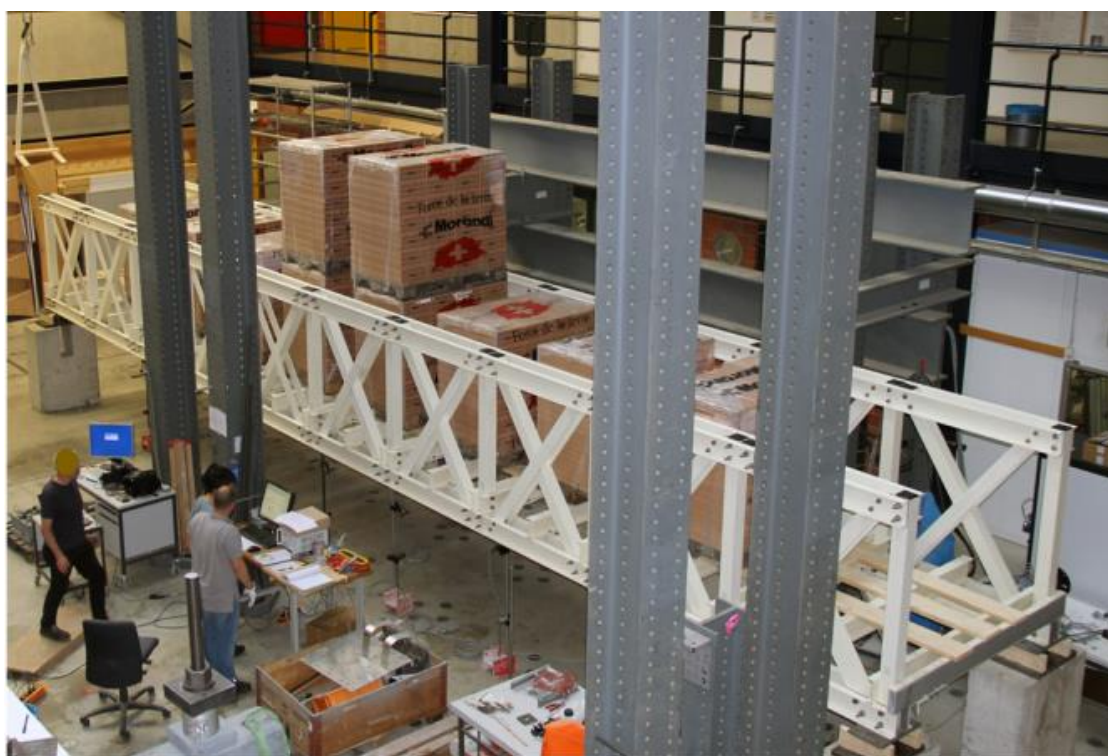


Рисунок 7. Мост Понтрезина: полная загрузка 10 кирпичными поддонами на соединенном пролете в 2014 г. (изображение Николаоса А. Теодору)

Figure 7. Pontresina Bridge: full load of 10 brick pallets on the connected span in 2014 (Image by Nikolaos A. Theodorou)

Выбор концепции адаптации позволил компенсировать анизотропию материала. За счет использования на разных пролетных строениях болтовых и клеевых соединений, удалось увеличить жесткость конструкции, о чем свидетельствуют результаты исследований, проведенных научным коллективом Швейцарского технологического института.⁶



Рисунок 8. Мост Понтрезина, 1997 г. (изображение Томаса Келлера)

Figure 8. Pontresina Bridge, 1997 (image by Thomas Keller)



Рисунок 9. Пешеходный моста в районе платформы Чертаново [37]

Figure 9. Pedestrian bridge in the area of the Chertanovo railway station [37]

Идея замены подразумевает, что при расчете конструкции не учитываются характеристики полимерных композитов. В результате чего применение полимерных композитов для малых пролетов может быть ограничено. Это связано с отсутствием компенсации низких значений модуля упругости материала, которые приводят к большим деформациям нагруженных конструкций и ранним появлениям трещин [35]. Примером положительного применения простой замены традиционного материала композитным является построенный в Уэльсе двухпролетный мост длиной 68 м. Для создания пролетных строений этого моста был использован метод вакуумной инфузии с применением стекловолокна, углеволокна и базальтового волокна [36].

В 2004 г. в России в г. Москва был построен первый цельнокомпозитный мост рядом с остановочной платформой Чертаново [37]. Схема моста — $13,2 + 15,0 + 13,2$ м, ширина пролетного строения составляет 3 м (рис. 9). Пролетное строение моста представляет собой две главные фермы с нисходящими раскосами. Для обеспечения устойчивости по бокам установлены дополнительные подкосы.

Перечислим автодорожные мосты, выполненные с применением гибридных по материалу пролетных строений.



Рисунок 10. Укладка углепластиковых труб при строительстве автодорожного арочного моста через ручей Соловей (источник: <https://strana-rosatom.ru/2017/08/07/doroga-zavtrashnego-dnya/>, изображение Сергея Юрьева)

Figure 10. Laying of carbon fibre-reinforced plastic pipes during construction of a road arch bridge over the Solovey Creek (source: <https://strana-rosatom.ru/2017/08/07/doroga-zavtrashnego-dnya/>, image by Sergey Yuriev)

Автодорожный арочный мост из ПКМ впервые в России был построен в районном поселении Языково Ульяновской области через ручей Соловей [39]. Пролетное строение состоит из углепластиковых арочных элементов постоянного круглого сечения с бетонным

сердечником и профнастила, выполненного из стеклопластика. Арочные элементы устанавливались на ранее возведенный фундамент, затем заполнялись бетоном. Поверху над трубами укладывали профнастил, наносили слой торкретбетона и засыпали грунт, после чего устраивали дорожное покрытие. Постоянную и временную нагрузку воспринимают арочные элементы из углепластика, изготовленные методом вакуумной инфузии. Мост запроектирован под две полосы движения и способен выдержать до 100 т нагрузки (рис. 10).



Рисунок 11. Мост через реку Пашенка [38]

Figure 11. Bridge over the Pashenka River [38]



Рисунок 12. Первый в мире железнодорожный мост из полимерных композитных материалов⁹ (источник: <https://soyuzmash.ru/docs/kom/122080/Ushakov.pdf>)

Figure 12. The world's first railway bridge made of polymer composite materials⁹ (source: <https://soyuzmash.ru/docs/kom/122080/Ushakov.pdf>)

⁹ Ушаков А.Е. Заседание Комитета по транспортному машиностроению Союза машиностроителей России на тему «Роль композитов в транспортном машиностроении» [Электронный ресурс] // Техничко-экономическая оценка эффективности внедрения полимерных композиционных материалов в изделиях железнодорожной и автодорожной инфраструктуры, транспортного машиностроения с учетом стоимости их владения. 2023. URL: <https://soyuzmash.ru/docs/kom/122080/Ushakov.pdf>.

Совместное использование стеклопластика и бетона применено при строительстве однопролетного автодорожного моста через реку Пашенка в Новосибирской области [38] (рис. 11). Балки пролетного строения моста изготовлены методом пултрузии, стенки балок представлены в виде многораскосной фермы Тауна. Совместная работа пролетного строения с железобетонной плитой обеспечивается с помощью упоров.

Кроме пешеходных и автодорожных пролетных строений необходимо отметить, что научно-производственное предприятие «АпАТЭК» разработало первое в мире балочное цельнокомпозитное железнодорожное пролетное строение (рис. 12) расчетной длиной 11,5 м под нагрузку С14.

Основываясь на опыте применения композитных материалов в сфере мостостроения, можно сделать вывод, что ведется постоянный поиск новых конструктивных решений с учетом особенностей полимерных композитных материалов.

Заключение

Conclusion

1. Анализ состояния вопроса показывает, что конструктивный поиск возможности применения полимерных композитов в пролётных строениях автодорожных мостовых сооружений является перспективной и малоизученной областью исследования.

2. Физико-механические характеристики полимерных композитных материалов стеклопластика и углепластика не уступают, а в некоторых случаях и превосходят характеристики традиционных материалов. Свойства полимерных композитных материалов зависят от свойств его составляющих, а также способа производства композита.

3. Несмотря на многолетний опыт строительства композитных мостов, существует ряд проблем, ограничивающих развитие применения композитных конструкций, что требует разработки специальных мероприятий.

4. Для внедрения в практику проектирования и строительства пролетных строений автодорожных мостов из полимерных композитных материалов требуется дальнейшее проведение теоретических и экспериментальных исследований, с целью дальнейшего изучения свойств материалов, узлов и балок пролетного строения, разработка нормативных требований к проектированию, строительству и эксплуатации мостов из цельнокомпозитных пролетных строений.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Иванов, А.Н.** Проблемы применения полимерных композиционных материалов в несущих конструкциях железнодорожных мостов / А.Н. Иванов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. — 2020. — № 3. — С. 29–37. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44109353>. — EDN NMZLHC. (дата обращения: 29.03.2024).
2. **Иванов, А.Н.** Полимерные композиты в мостостроении / А.Н. Иванов, А.Н. Яшнов. // Политранспортные системы: Материалы VIII Международной научно-технической конференции в рамках года науки Россия — ЕС "Научные проблемы реализации транспортных проектов в Сибири и на Дальнем Востоке", Новосибирск, 20–21 ноября 2014 года / Новосибирск: Сибирский государственный университет путей сообщения, 2015. — С. 115–120. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23712409>. — EDN TYXJHN. (дата обращения: 29.03.2024).
3. Композиционные материалы: [в 8 т.]. Т. 3: Применение композиционных материалов в технике / М. Мартин, Н.Дж. Майер, Л.Дж. Корб и др.; ред. Б. Нотон; пер. Б.Р. Горобец и др.; под ред. С.Е. Салибекова. — ред. Л. Браутман, Р. Крок. — Москва: Машиностроение, 1978. — 510 с. — URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01007598890>. (дата обращения: 29.03.2024).
4. **Королев, В.И.** Слоистые анизотропные пластинки и оболочки из армированных пластмасс / В.И. Королев. — Москва: Машиностроение, 1965. — 272 с. — URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01006241337>. (дата обращения: 29.03.2024).
5. **Лехницкий С.Г.** Анизотропные пластинки. — 2-е изд., перераб. и доп. / С. Г. Лехницкий. — Москва: Гостехиздат, 1957. — 463 с. — URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01006332495>. (дата обращения: 29.03.2024).
6. Стеклопластики / Сост. Группой авторов: Пер. с англ. / Под ред. Ф. Моргана; Под ред. канд. техн. наук Я.Д. Аврасина. — Москва: Изд-во иностр. лит., 1961. — 481 с. — URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01008448732>. (дата обращения: 29.03.2024).
7. **Сорочишин, А.Г.** Стеклопластики: Производство и применение. 2-е изд., перераб. и доп. / А.Г. Сорочишин. — Москва: Стройиздат, 1964. — URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01008433315>. (дата обращения: 29.03.2024).
8. Композиционные материалы: Справочник / Л.Р. Вишняков, Т.В. Грудина, В.Х. Кадыров и др. — Под ред. Д.М. Карпиноса. — Киев: Наук. думка, 1985. — 592 с. — URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001289045>. (дата обращения: 29.03.2024).
9. Numerical modeling of composite reinforcement with concrete / Т.А. Zinnurov, А.А. Piskunov, L.G. Safiyulina [и др.]. — DOI <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1158/4/042046> // Journal of Physics: Conference Series. — 2019. — Т 1158. — № 4. — С. 42046. — URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1158/4/042046>. — EDN HPUQJK. (дата обращения: 29.03.2024).
10. Численное моделирование сцепления композитной арматуры с бетоном / Т.А. Зиннуров, А.А. Пискунов, Л.Г. Сафиюлина [и др.]. — DOI <https://doi.org/10.15862/11TVN415> // Интернет-журнал Науковедение. — 2015. — Т 7. — № 4. — С. 11TVN415. — URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/11TVN415.pdf>. — EDN UMATSP. (дата обращения: 30.03.2024).
11. **Бирюков, О.Р.** Преимущества и недостатки применения полимерных композитных материалов в конструкциях военных автодорожных разборных мостов / О.Р. Бирюков, В.А. Стройков // Вестник Военной академии материально-технического обеспечения им. генерала армии А.В. Хрулева. — 2018. — № 1. — С. 65–69. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37189602>. — EDN UQUCRQ. (дата обращения: 30.03.2024).
12. **Rahman, R.** Tensile properties of natural and synthetic fiber-reinforced polymer composites / R. Rahman, S.Z.F.S. Putra. — DOI <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102292-4.00005-9> // Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites / Woodhead Publishing, 2019. — С. 81–102. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780081022924000059>. (дата обращения: 30.03.2024).
13. Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites / Под ред. Jawaid M., Thariq M., Saba N. — Woodhead Publishing, 2018. — URL: <https://shop.elsevier.com/books/mechanical-and-physical-testing-of-biocomposites-fibre-reinforced-composites-and-hybrid-composites/jawaid/978-0-08-102292-4> (дата обращения: 30.03.2024).

14. **Rajak, D.K.** Recent progress of reinforcement materials: a comprehensive overview of composite materials / D.K. Rajak, D.D. Pagar, R. Kumar, C.I. Pruncu. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.09.068> // Journal of Materials Research and Technology. — 2019. — Т 8. — № 6. — С. 6354–6374. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785419312086>. (дата обращения: 30.03.2024).
15. **Ghalia, M.A.** Compressive and fracture toughness of natural and synthetic fiber-reinforced polymer / M.A. Ghalia, A. Abdelrasoul. — DOI <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102292-4.00007-2> // Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites / Woodhead Publishing, 2019. — С. 123–140. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780081022924000072>. (дата обращения: 30.03.2024).
16. **Abdellaoui, H.** Mechanical behavior of carbon/natural fiber-based hybrid composites / H. Abdellaoui, M. Raji, H. Essabir, R. Bouhfid, A. Qaiss el kacem. — DOI <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102292-4.00006-0> // Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites / Woodhead Publishing, 2019. — С. 103–122. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780081022924000060>. (дата обращения: 30.03.2024).
17. **Mohammed, L.** A Review on Natural Fiber Reinforced Polymer Composite and Its Applications / L. Mohammed, M.N.M. Ansari, G. Pua, M. Jawaidd, M.S. Islam. — DOI <https://doi.org/10.1155/2015/243947> // International Journal of Polymer Science. — 2015. — Т 2015. — № 1. — С. 243947. — URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2015/243947>. (дата обращения: 30.03.2024).
18. **Arun Kumar, D.T.** Tensile and Impact Properties of Jute/Glass and Jute/Carbon Fiber Reinforced Polypropylene / D.T. Arun Kumar, Prasad V. Kaushik, P.S. Raghavendra Rao // Journal of Polymer & Composites. — 2016. — Т 4. — № 3. — С. 35–39. — URL: <https://engineeringjournals.stmjournals.in/index.php/JoPC/article/view/1745>. (дата обращения: 30.03.2024).
19. **Aziz, T.** Adhesive properties of poly (methyl silsesquioxanes)/bio-based epoxy nanocomposites / T. Aziz, H. Fan, F. Haq [и др.]. — DOI <https://doi.org/10.1007/s13726-020-00849-x> // Iranian Polymer Journal. — 2020. — Т 29. — № 10. — С. 911–918. — URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13726-020-00849-x>. (дата обращения: 30.03.2024).
20. **Jamil, M.I.** Slippery Photothermal Trap for Outstanding Deicing Surfaces / M.I. Jamil, Q. Wang, A. Ali [и др.]. — DOI <https://doi.org/10.1007/s42235-021-0046-7> // Journal of Bionic Engineering. — 2021. — Т 18. — № 3. — С. 548–558. — URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42235-021-0046-7>. (дата обращения: 30.03.2024).
21. **Ahmed, N.** Nano-engineering and micromolecular science of polysilsesquioxane materials and their emerging applications / N. Ahmed, H. Fan, P. Dubois [и др.]. — DOI <https://doi.org/10.1039/C9TA04575A> // Journal of Materials Chemistry A. — 2019. — Т 7. — № 38. — С. 21577–21604. — URL: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2019/ta/c9ta04575a>. (дата обращения: 30.03.2024).
22. **Воробей, В.В.** Контроль качества изготовления и технология ремонта композитных конструкций / В.В. Воробей, В.Б. Маркин; Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова. — Барнаул: Научно-исследовательский центр "Системы управления", 2006. — 190 с. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22658217>. — EDN TBVOSV. (дата обращения: 14.04.2024).
23. **Abbood, I.S.** Properties evaluation of fiber reinforced polymers and their constituent materials used in structures — A review / I.S. Abbood, S. aldeen Odaa, K.F. Hasan, M.A. Jasim. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.636> // Materials Today: Proceedings. — 2021. — Т 43. — С. 1003–1008. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320357618>. (дата обращения: 14.04.2024).
24. **Sonnenschein, R.** FRP Composites and their Using in the Construction of Bridges / R. Sonnenschein, K. Gajdosova, I. Holly. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.665> // Procedia Engineering. — 2016. — Т 161. — С. 477–482. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816328946>. (дата обращения: 14.04.2024).
25. **Kossakowski, P.G.** Fiber-Reinforced Polymer Composites in the Construction of Bridges: Opportunities, Problems and Challenges / P.G. Kossakowski, W. Wciślik. — DOI <https://doi.org/10.3390/fib10040037> // Fibers. — 2022. — Т 10. — № 4. — С. 37. — URL: <https://www.mdpi.com/2079-6439/10/4/37>. (дата обращения: 30.03.2024).

26. **Петропавловских, О.К.** Усиление автомобильных мостов углеволокном / О.К. Петропавловских, А.А. Ахметов // Техника и технология транспорта. — 2023. — № 1. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50427865>. — EDN BPVBWK. (дата обращения: 14.04.2024).
27. Огнезащита конструкций из полимерных композитов и оценка ее эффективности / А.Н. Гаращенко, А.В. Суханов, Н.А. Гаращенко [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. — 2009. — Т 18. — № 5. — С. 15–24. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12792250>. — EDN KTYGMD. (дата обращения: 14.04.2024).
28. **Овчинников, И.И.** Систематизация и анализ нормативно технической документации по применению полимерных композиционных материалов в транспортном строительстве. Часть 1 / И.И. Овчинников, И.Г. Овчинников, Е.Д. Ильченко, Е.С. Михалдыкин // Интернет-журнал Науковедение. — 2017. — Т 9. — № 1. — С. 32TVN117. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29105099>. — EDN YMXOUV. (дата обращения: 14.04.2024).
29. **Голубев, Е.В.** Обзор и анализ технологий производства композитов / Е.В. Голубев, В.В. Романов // Цифровая наука. — 2021. — № 4-3. — С. 12–16. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45792676>. — EDN OWPNCI. (дата обращения: 14.04.2024).
30. **Qureshi, J.** A Review of Fibre Reinforced Polymer Bridges / J. Qureshi. — DOI <https://doi.org/10.3390/fib11050040> // Fibers. — 2023. — Т 11. — № 5. — С. 40. — URL: <https://www.mdpi.com/2079-6439/11/5/40>. (дата обращения: 14.04.2024).
31. **Smits, J.** Fiber-Reinforced Polymer Bridge Design in the Netherlands: Architectural Challenges toward Innovative, Sustainable, and Durable Bridges / J. Smits. — DOI <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2016.04.004> // Engineering. — 2016. — Т 2. — № 4. — С. 518–527. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095809917300887>. (дата обращения: 20.07.2024).
32. **Canning, L.** No AccessProgress of advanced composites for civil infrastructure / L. Canning, J. Hodgson, R. Karuna, S. Luke, P. Brown. — DOI <https://doi.org/10.1680/stbu.2007.160.6.307> // Structures and Buildings. — 2007. — Т 160. — № 6. — С. 307–315. — URL: <https://www.icvirtuallibrary.com/doi/10.1680/stbu.2007.160.6.307>. (дата обращения: 14.04.2024).
33. **de Diego Villalón, A.** Utilización de materiales compuestos en la construcción de nuevos puentes [Использование композиционных материалов при строительстве новых мостов] / de Diego Villalón A., Gutiérrez Jiménez, J.P. Arteaga Iriarte A., López Hombrados C. // II Jornadas de Investigación en Construcción (Instituto de Ciencias de la Construcción "Eduardo Torroja", Madrid, 22–24 mayo 2008): Actas de las Jornadas. Н. 1. Materiales: Compuestos [II Конференция по исследованиям в строительстве (Институт строительных наук «Эдуардо Торроха», Мадрид, 22–24 мая 2008 г.): Протокол конференции. Н. 1. Материалы: Композитный] / Мадрид: Compuestos, 2008. — С. 1583–1592. — URL: <https://digital.csic.es/handle/10261/6313>. (дата обращения: 19.02.2024). — (На исп. яз.).
34. **Keller, T.** Use of fibre reinforced polymers in bridge construction / T. Keller. — Цюрих: International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE), 2003. — 131 с. — URL: <https://structurae.net/en/literature/book/use-of-fibre-reinforced-polymers-in-bridge-construction#abstract> (дата обращения: 30.03.2024).
35. **Зиннуров, Т.А.** Метод изготовления предварительно напряженных конструкций с композитным армированием и композитным фибробетоном / Т.А. Зиннуров, А.А. Пискунов, О.К. Петропавловских [и др.]. — DOI <https://doi.org/10.15862/05TS217> // Транспортные сооружения. — 2017. — Т 4. — № 2. — С. 05TS217. — URL: <https://t-s.today/05TS217.html>. — EDN ZEKYSD. (дата обращения: 12.04.2024).
36. **Marginson, A.P.** Foryd Harbour Pedestrian and Cycling Bridge / A.P. Marginson. // Footbridge 2014 — Past, Present & Future, London, 16–18 July 2014 / Лондон: Hemming Information Services, 2014. — URL: <https://structurae.net/en/literature/conference-paper/foryd-harbour-pedestrian-and-cycling-bridge>. (дата обращения: 14.04.2024).
37. Мостовые конструкции из композитов / А.Е. Ушаков, Ю.Г. Кленин, Т.Г. Сорина [и др.] // Композиты и наноструктуры. — 2009. — № 3. — С. 25–37. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15171215>. — EDN MTZUGR. (дата обращения: 14.04.2024).
38. **Бейвель, А.С.** Полимерные композиты в транспортном строительстве и мостостроении / А.С. Бейвель, С.Ю. Ветохин, А.В. Гералтовский, В.Н. Полиновский // Вестник химической промышленности. — 2018. — URL: <http://vestkhimprom.ru/posts/polimernye-kompozity-v-transportnom-stroitelstve-i-mostostroenii>. (дата обращения: 14.04.2024).

39. Технологии и основные этапы строительства первого в России арочного моста из композиционных материалов / С.И. Мишкин, А.Е. Раскутин, А.А. Евдокимов, И.Н. Гуляев. — DOI <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2017-0-6-5-5> // Труды ВИАМ. — 2017. — № 6. — С. 42–51. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29319818>. — EDN YRPTDB. (дата обращения: 30.03.2024).
40. **Пыринов, Б.В.** Строительство первого в России автодорожного моста с применением полимерного композиционного материала / Б.В. Пыринов // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. — 2014. — № 12. — С. 24–28. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22806662>. — EDN TFCARB. (дата обращения: 14.04.2024).

Сведения об авторах:

Пискунов Александр Алексеевич — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Мосты и тоннели», ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», Москва, Россия, e-mail: a.piskunov52@mail.ru
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=807388

Луканкин Сергей Анатольевич — доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры «Прочности конструкций», ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева-КАИ», Казань, Россия, профессор кафедры «Теоретической механики», ФГБОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», Казань, Россия, e-mail: lukanin.sergej@yandex.ru
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=10110
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=6507580592>

Мазур Евгений Витальевич — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Мосты и тоннели», ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», Москва, Россия, e-mail: genha345@mail.ru
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1161926

Петропавловских Ольга Константиновна — старший преподаватель кафедры «Автомобильные дороги, мосты и тоннели», ФГБОУ ВО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет», Казань, Россия, e-mail: olga_konst@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3022-8271>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=718574
WoS: <https://www.webofscience.com/wos/author/rid/K-6171-2018>
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=58699224100>
ResearchGate: <https://www.researchgate.net/scientific-contributions/Olga-Petropavlovskikh-2196669498>

Ибрагимова Ания Айратовна — аспирант, ФГБОУ ВО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет», Казань, Россия, e-mail: anuya13@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1875-8771>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1172486
WoS: <https://www.webofscience.com/wos/author/rid/KAM-4675-2024>
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=58700190000>
ResearchGate: <https://www.researchgate.net/scientific-contributions/Aniia-Ibragimova-2196665512>

Нюхина Наталия Сергеевна — аспирант, ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», Москва, Россия, e-mail: natali.nns2001@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-4465-9379>

Рыбаков Сергей Викторович — аспирант, ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», Москва, Россия, e-mail: rybakov.sv@bk.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-0810-7994>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1178306

Статья получена: 11.06.2024. Принята к публикации: 27.09.2024. Опубликовано онлайн: 11.10.2024.

Работа выполнена в рамках выполнения гранта Министерства науки и высшего образования № 075-15-2024-559, АРКТИКА

REFERENCES

1. Ivanov A.N. Problems of the Use of Polymer Composite Materials in The Supporting Structures of Railway Bridges. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2020;(3): 29–37. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44109353> (accessed 29th March 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
2. Ivanov A.N., Yashnov A.N. [Polymer composites in bridge construction]. In: [Polytransport systems: Proceedings of the VIII International scientific and technical conference within the framework of the Russia-EU Year of Science "Scientific problems of implementing transport projects in Siberia and the Far East", Novosibirsk, November 20–21, 2014]. Novosibirsk: Siberian Transport University; 2015. p. 115–120. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23712409> (accessed 29th March 2024). (In Russ.).
3. Brautman L., Krok R. eds. Composite materials. Volume 3: Engineering application of composites. New York: Academic Press; 1974. Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01007598890> (accessed 29th March 2024). (In Russ.).
4. Korolev V.I. [Layered anisotropic plates and shells made of reinforced plastics]. Moscow: Mashinostroyeniye; 1965. Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01006241337> (accessed 29th March 2024). (In Russ.).
5. Lekhnitskiy S.G. Anisotropic plates. — 2nd edition, revised and enlarged. Moscow: Gostekhizdat; 1957. Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01006332495> (accessed 29th March 2024). (In Russ.).
6. Morgan P. ed. Glass reinforced plastics. London: Iliffe; 1957. Available at: <https://archive.org/details/glassreinforcedp00morg> (accessed 29th March 2024). (In Eng.).
7. Sorochishin A.G. [Glass-reinforced plastics: Production and application. 2nd edition, revised and enlarged]. Moscow: Stroyizdat; 1964. Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01008433315> (accessed 29th March 2024). (In Russ.).
8. Vishnyakov L.R., Grudina T.V., Kadyrov V.Kh. et al., Karpinos D.M. ed. [Composite Materials: Handbook]. Kyiv: Naukova dumka; 1985. Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001289045> (accessed 29th March 2024). (In Russ.).
9. Zinnurov A., Piskunov A.A., Safiyulina L.G. et al. Numerical modeling of composite reinforcement with concrete. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019;1158(4): 42046. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1158/4/042046>.
10. Zinnurov A., Piskunov A.A., Safiyulina L.G. et al. Numerical modeling of bond composite reinforcement and concrete. *Naukovedenie*. 2015;7(4): 11TVN415. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15862/11TVN415>.
11. Biriukov O.R., Stroikov V.A. Advantages and Disadvantages of Application of Polymer Composite Materials in The Design of Military Panel Bridge. *Herald of Military Educational Institution of Logistics Named After General of The Army A.V. Khrulyov*. 2018;(1): 65–69. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37189602> (accessed 30th March 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
12. Rahman R., Putra S.Z.F.S. Tensile properties of natural and synthetic fiber-reinforced polymer composites. In: *Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites*. Woodhead Publishing; 2019. p. 81–102. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780081022924000059> (accessed 30th March 2024). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102292-4.00005-9>.
13. Jawaid M., Thariq M., Saba N. eds. Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites. Woodhead Publishing; 2018. Available at: <https://shop.elsevier.com/books/mechanical-and-physical-testing-of-biocomposites-fibre-reinforced-composites-and-hybrid-composites/jawaid/978-0-08-102292-4> (accessed 30th March 2024). (In Eng.).
14. Rajak D.K., Pagar D.D., Kumar R., Pruncu C.I. Recent progress of reinforcement materials: a comprehensive overview of composite materials. *Journal of Materials Research and Technology*. 2019;8(6): 6354–6374. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.09.068>.
15. Ghalia M.A., Abdelrasoul A. Compressive and fracture toughness of natural and synthetic fiber-reinforced polymer. In: *Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites*. Woodhead Publishing; 2019. p. 123–140. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780081022924000072> (accessed 30th March 2024). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102292-4.00007-2>.

16. Abdellaoui H., Raji M., Essabir H., Bouhfid R., Qaiss A. el kacem Mechanical behavior of carbon/natural fiber-based hybrid composites. In: *Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites*. Woodhead Publishing; 2019. p. 103–122. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780081022924000060> (accessed 30th March 2024). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102292-4.00006-0>.
17. Mohammed L., Ansari M.N.M., Pua G., Jawaid M., Islam M.S. A Review on Natural Fiber Reinforced Polymer Composite and Its Applications. *International Journal of Polymer Science*. 2015;2015(1): 243947. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1155/2015/243947>.
18. Arun Kumar D.T., Kaushik V. Prasad, Raghavendra Rao P.S. Tensile and Impact Properties of Jute/Glass and Jute/Carbon Fiber Reinforced Polypropylene. *Journal of Polymer & Composites*. 2016;4(3): 35–39. Available at: <https://engineeringjournals.stmjournals.in/index.php/JoPC/article/view/1745> (accessed 30th March 2024). (In Eng.).
19. Aziz T., Fan H., Haq F. et al. Adhesive properties of poly (methyl silsesquioxanes) / bio-based epoxy nanocomposites. *Iranian Polymer Journal*. 2020;29(10): 911–918. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s13726-020-00849-x>.
20. Jamil M.I., Wang Q., Ali A. et al. Slippery Photothermal Trap for Outstanding Deicing Surfaces. *Journal of Bionic Engineering*. 2021;18(3): 548–558. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s42235-021-0046-7>.
21. Ahmed N., Fan H., Dubois P. et al. Nano-engineering and micromolecular science of polysilsesquioxane materials and their emerging applications. *Journal of Materials Chemistry A*. 2019;7(38): 21577–21604. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1039/C9TA04575A>.
22. Vorobey V.V., Markin V.B. [Quality control of manufacturing and repair technology of composite structures]. Barnaul: Research Center "Control Systems"; 2006. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22658217> (accessed 14th April 2024). (In Russ.).
23. Abbood I.S., Odaa S. aldeen, Hasan K.F., Jasim M.A. Properties evaluation of fiber reinforced polymers and their constituent materials used in structures — A review. *Materials Today: Proceedings*. 2021;43: 1003–1008. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.636>.
24. Sonnenschein R., Gajdosova K., Holly I. FRP Composites and their Using in the Construction of Bridges. *Procedia Engineering*. 2016;161: 477–482. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.665>.
25. Kossakowski P.G., Wciślik W. Fiber-Reinforced Polymer Composites in the Construction of Bridges: Opportunities, Problems and Challenges. *Fibers*. 2022;10(4): 37. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3390/fib10040037>.
26. Petropavlovskikh O.K., Akhmetov A.A. Reinforcement of Road Bridges with Carbon Fiber. *Technique and Technology of Transport: a scientific Internet journal*. 2023;(1). Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50427865> (accessed 14th April 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
27. Garashchenko A.N., Sukhanov A.V., Garashchenko N.A. et al. [Fire protection of structures made of polymer composites and assessment of its effectiveness]. *Fire and Explosion Safety*. 2009;18(5): 15–24. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12792250> (accessed 14th April 2024). (In Russ.).
28. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Ilchenko E.D., Mikhaldykin E.S. Systematization and Analysis of Normative and Technical Documentation on The Use of Polymer Composites in Transport Construction. Part 1. *Naukovedenie*. 2017;9(1): 32TVN117. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29105099> (accessed 14th April 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
29. Golubev E.V., Romanov V.V. Review and Analysis of Composite Production Technologies. *Tsifrovaya nauka*. 2021;(4-3): 12–16. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45792676> (accessed 14th April 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
30. Qureshi J. A Review of Fibre Reinforced Polymer Bridges. *Fibers*. 2023;11(5): 40. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3390/fib11050040>.
31. Smits J. Fiber-Reinforced Polymer Bridge Design in the Netherlands: Architectural Challenges toward Innovative, Sustainable, and Durable Bridges. *Engineering*. 2016;2(4): 518–527. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2016.04.004>.
32. Canning L., Hodgson J., Karuna R., Luke S., Brown P. No Access Progress of advanced composites for civil infrastructure. *Structures and Buildings*. 2007;160(6): 307–315. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1680/stbu.2007.160.6.307>.

33. de Diego Villalón A., Gutiérrez Jiménez, J.P. Arteaga Iriarte A., López Hombrados C. Utilización de materiales compuestos en la construcción de nuevos puentes [Use of composite materials in the construction of new bridges]. In: *II Jornadas de Investigación en Construcción (Instituto de Ciencias de la Construcción "Eduardo Torroja", Madrid, 22–24 mayo 2008): Actas de las Jornadas. H. 1. Materiales: Compuestos [II Conference on Research in Construction (Institute of Construction Sciences "Eduardo Torroja", Madrid, 22–24 May 2008): Conference proceedings. H. 1. Materials: Composites]*. Madrid: Compuestos; 2008. p. 1583–1592. Available at: <https://digital.csic.es/handle/10261/6313> (accessed 19th February 2024). (In Spanish.).
34. Keller T. Use of fibre reinforced polymers in bridge construction. Zurich: International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE); 2003. Available at: <https://structurae.net/en/literature/book/use-of-fibre-reinforced-polymers-in-bridge-construction#abstract> (accessed 30th March 2024). (In Eng.).
35. Zinnurov T.A., Piskunov A.A., Petropavlovskikh O.K., Yarullin R.R., Umarov B.S., Volter A.R. Method for manufacturing prestressed structures with composite reinforcement and composite fiber-reinforced concrete. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2017;4(2): 05TS217. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15862/05TS217>.
36. Marginson A.P. Foryd Harbour Pedestrian and Cycling Bridge. In: *Footbridge 2014 — Past, Present & Future, London, 16–18 July 2014*. London: Hemming Information Services; 2014. Available at: <https://structurae.net/en/literature/conference-paper/foryd-harbour-pedestrian-and-cycling-bridge> (accessed 14th April 2024). (In Eng.).
37. Ushakov A.E., Klenin Yu.G., Sorina T.G. et al. [Composite bridge structures]. *Composites and Nanostructures*. 2009;(3): 25–37. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15171215> (accessed 14th April 2024). (In Russ.).
38. Beyvel' A.S., Vetokhin S.Yu., Gerasimovskiy A.V., Polinovskiy V.N. [Polymer composites in transport construction and bridge building]. *Vestnik khimicheskoy promyshlennosti = Bulletin of the Chemical Industry*. 2018. Available at: <http://vestkhimprom.ru/posts/polimernye-kompozity-v-transportnom-stroitelstve-i-mostostroenii> (accessed 14th April 2024). (In Russ.).
39. Mishkin S.I., Raskutin A.E., Evdokimov A.A., Gulyaev I.N. Technologies and the Main Stages of Construction of The Arch Bridge First in Russia from Composite Materials. *Proceedings of VIAM*. 2017;(6): 42–51. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2017-0-6-5-5>.
40. Pyrinov B.V. The Construction of First Road Bridge with The Use of Polymer Composite Material in Russia. *Construction materials, equipment, technologies of the 21st century*. 2014;(12): 24–28. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22806662> (accessed 14th April 2024). (In Russ., abstract in Eng.).

Information about the authors:

Alexander A. Piskunov — Russian University of Transport, Moscow, Russia, e-mail: a.piskunov52@mail.ru
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=807388

Sergei A. Lukankin — Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI, Kazan, Russia, Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russia, e-mail: lukankin.sergej@yandex.ru
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=10110
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=6507580592>

Evgeny V. Mazur — Russian University of Transport, Moscow, Russia, e-mail: genha345@mail.ru
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1161926

Olga K. Petropavlovskikh — Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russia, e-mail: olga_konst@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3022-8271>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=718574
WoS: <https://www.webofscience.com/wos/author/rid/K-6171-2018>
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=58699224100>
ResearchGate: <https://www.researchgate.net/scientific-contributions/Olga-Petropavlovskikh-2196669498>

Aniia A. Ibragimova — Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russia, e-mail: aniia13@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1875-8771>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1172486
WoS: <https://www.webofscience.com/wos/author/rid/KAM-4675-2024>
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=58700190000>
ResearchGate: <https://www.researchgate.net/scientific-contributions/Aniia-Ibragimova-2196665512>

Natalia S. Nyukhina — Russian University of Transport, Moscow, Russia, e-mail: natali.nns2001@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-4465-9379>

Sergey V. Rybakov — Russian University of Transport, Moscow, Russia, e-mail: rybakov.sv@bk.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-0810-7994>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1178306

Submitted: 11th June 2024. Revised: 27th September 2024. Published online: 11th October 2024.

*The work was carried out within the framework of the grant of the Ministry of Science and Higher Education
No. 075-15-2024-559, ARKTIKA*