

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

2024, Том 11, № 4 / 2024, Vol. 11, Iss. 4 <https://t-s.today/issue-4-2024.html>

URL: <https://t-s.today/PDF/01SATS424.pdf>

DOI: 10.15862/01SATS424 (<https://doi.org/10.15862/01SATS424>)

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

УДК 624.21; 624.21.09; 624.21.016

Анализ устройств и способов объединения в совместную работу полимерно-композитных главных балок пролетного строения и плиты ездового полотна автодорожных мостов

¹Рыбаков С.В., ¹Пискунов А.А., ¹Ерофеев М.Н., ¹Мазур Е.В., ^{2,3}Луканкин С.А.

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

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

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

Автор, ответственный за переписку: Рыбаков Сергей Викторович, e-mail: rybakov.sv@bk.ru

Аннотация. Исследование посвящено анализу устройств и способов объединения в совместную работу полимерно-композитных главных балок пролетного строения и плиты ездового полотна автодорожных мостов. Рассмотрены вопросы применения полимерных композиционных материалов совместно с традиционными бетоном и сталью, обоснована перспективность развития гибридных пролетных строений.

В статье представлен обзор отечественных и зарубежных решений по объединению в совместную работу полимерно-композитных главных балок и плиты ездового полотна. В связи с относительной новизной применения полимерных композиционных материалов в мостостроении и отсутствии нормативной документации, первоначально рассмотрены конструктивно схожие сталежелезобетонные пролетные строения и существующие способы их объединения в совместную работу, а затем внимание уделено гибридным конструкциям пролетных строений, сочетающих стеклопластик и бетон.

На основе проведенного анализа сформулированы требования к конструкции объединения полимерно-композитных главных балок и плиты проезда. Особое внимание уделено специфическим факторам, влияющим на выбор перспективной конструкции, среди которых

выделены характер работы соединения, тип контакта, материал соединительного элемента, а также материалы плиты проезда и главных балок. Кроме того, рассмотрены конструктивные особенности и методы изготовления главных балок. Проведен анализ механизмов разрушения верхнего листа композитной балки, что позволит точнее учесть условия работы соединительных элементов и их влияние на физико-механические характеристики стеклопластиковых главных балок.

Для оценки достоверности аналитических предположений о перспективной конструкции объединения нужно выполнить расчет и математическое моделирование, провести оптимизацию конструкции и изготовить опытные модели для проведения натурного эксперимента, который установит соответствие полученных теоретических выводов реальной работе конструкции.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы; гибридные пролетные строения; упор пролетного строения; соединительное устройство; мосты из полимерно-композитных материалов; проблемы применения композитов; пролетное строение из полимерных композиционных материалов

Analysis of structure and methods for integrating polymer-composite main beams of span structures and the deck slab of road bridges

¹Sergey V. Rybakov, ¹Alexander A. Piskunov, ¹Mikhail N. Erofeev,
¹Evgeny V. Mazur, ^{2,3}Sergei A. Lukankin

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

Corresponding author: Sergey V. Rybakov, e-mail: rybakov.sv@bk.ru

Abstract. This study is dedicated to the analysis of structure and methods for integrating polymer-composite main beams of span structures with the deck slab of road bridges. The issues concerning the application of polymer composite materials alongside traditional concrete and steel are examined, and the potential for developing hybrid span structures is justified.

The article presents an overview of domestic and foreign solutions for the integration of polymer-composite main beams with the deck slab. Given the relative novelty of using polymer composite materials in bridge construction and the lack of regulatory documentation, structurally similar reinforced concrete span structures and existing methods for their integration into cooperative work are initially reviewed. Attention is then directed towards hybrid designs of span structures that combine fiberglass and concrete.

Based on the conducted analysis, requirements for the design of the integration between polymer-composite main beams and the deck slab are formulated. Special emphasis is placed on specific factors influencing the choice of a promising design, including the nature of joint

operation, type of contact, material of the connecting element, as well as the materials used for the deck slab and main beams. Furthermore, structural features and manufacturing methods of main beams are discussed. An analysis of failure mechanisms in the upper sheet of composite beams is conducted to better account for operating conditions of connecting elements and their impact on the physical-mechanical properties of fiberglass main beams.

To assess the validity of analytical assumptions regarding a promising integration design, it is necessary to perform calculations and mathematical modeling, conduct optimization of the design, and manufacture prototype models for field experiments that will establish the correspondence between theoretical conclusions and actual performance of the structure.

Keywords: polymer composite materials; connecting device; hybrid span structures; span structure stop; bridges made of polymer composite materials; problems of composite application; span structure made of polymer composite materials

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

В последние два десятилетия полимерные материалы, армированные волокнами, стали широко признанными в строительстве благодаря их характеристикам. Особый интерес вызывают стеклопластики и мостовые конструкции, изготовленные с использованием этого материала. Они получили распространение благодаря хорошему соотношению цены и характеристик, применяются при строительстве новых и ремонте существующих мостов в плитах проезда, балках и других элементах. Преимущества таких систем включают относительно малый вес, высокую долговечность, устойчивость к коррозии, скорость производства работ и простоту монтажа.

Несмотря на достоинства конструкций из стеклопластика, они, как правило, более дороги в изготовлении. Так как стеклопластик является линейно-упругим, часто при расчетах для снижения рисков разрушения применяются повышенные коэффициенты запаса прочности, что ведет к перерасходу материала. Кроме того, в отличие от мостов из традиционных материалов, таких как дерево, сталь, железобетон, мосты из ПКМ (полимерных композиционных материалов) при достижении предела прочности отдельных элементов имеют свойство хрупко разрушаться без заметных пластических деформаций. Это усложняет мониторинг и анализ напряженно-деформированного состояния конструкции, что, с одной стороны, повышает затраты на содержание, а с другой стороны, может повлечь тяжелые последствия в результате неожиданного разрушения. Также при проектировании соединений необходимо принимать во внимание низкую сопротивляемость стеклопластиков местным воздействиям.

Гибридные по материалу системы, состоящие из бетона, стеклопластика, стали, могут быть более прочными, безопасными и надежными в сравнении с полностью стеклопластиковыми конструкциями. Несмотря на то, что полностью исключить риск хрупкого разрушения нельзя, такое сочетание материалов должно способствовать развитию достаточного количества визуально наблюдаемых дефектов перед окончательным выходом конструкции из строя.

Экспериментальные и теоретические исследования [1–7] показывают, что сочетание стеклопластика и бетона позволяет добиться значительных улучшений конструктивных характеристик пролетных строений. Одним из перспективных решений в данном направлении является сочетание балки из полимерного композиционного материала и бетонной плиты ездового полотна. Таким образом реализуются ключевые достоинства этих материалов — бетон эффективно работает на сжатие, а использование

стеклопластика в качестве основного материала балки значительно снижает её вес и повышает коррозионную стойкость конструкции в целом. Однако, в процессе разработки гибридных по материалу мостовых конструкций инженеры сталкиваются с рядом трудностей:

- отсутствует нормативно-техническая база;
- необходимость учета при проектировании специфических особенностей полимерных композиционных материалов (ярко выраженная анизотропия свойств, пропорциональность упругой деформации напряжению вплоть до полного разрушения, различия механических и химических характеристик матрицы и наполнителя);
- необходимость учета особенностей соединения полимерно-композитных элементов (низкое сопротивление местному смятию, трудности механической обработки отверстий и др.).

Разрушение конструкций с применением полимерных композиционных материалов в основном происходит по границе соединения между элементами [8–10].

Таким образом, одним из приоритетных направлений развития гибридных пролетных строений является совершенствование конструкций объединения элементов в совместную работу.

В работе [11] приведены основные требования заказчиков и эксплуатирующих организаций к строительству новых мостов и эксплуатации/ремонту действующих сооружений (табл. 1). Указанные требования возможно удовлетворить сокращением работ, проводимых непосредственно на строительной площадке и сокращением времени строительства в целом. С учетом современных тенденций в мостостроении, стеклопластики являются перспективным решением для достижения этих целей.

С развитием технологий производства стеклопластика — пултрузии, инфузии и других стало возможным создание изделий сложных форм со все более высокими физико-механическими характеристиками.

Во второй половине XX века было построено достаточно большое количество мостов с применением ПКМ [9; 12], а опыт их эксплуатации показал, что они удовлетворительно выдерживают агрессивные условия внешней среды и продолжают эксплуатироваться по сей день [9].

Значительную часть элементов моста возможно спроектировать и изготовить в композитном исполнении, однако их использование в каждом конкретном случае должно определяться расчетным обоснованием.

Таблица 1 / Table 1

**Требования к работам по обслуживанию
существующих и строительству новых мостов в порядке их приоритетности**

**Requirements for maintenance work on existing
bridges and construction of new bridges in order of priority**

Техническое обслуживание <i>Maintenance operations</i>	Новое строительство <i>New construction</i>
1. Сокращение времени закрытия движения <i>1. Reduction of traffic closure time</i> 2. Минимальное время проведения работ <i>2. Minimal time of works</i> 3. Низкие затраты на выполнение работ <i>3. Low cost of works</i> 4. Эффективность решений при продолжительной эксплуатации <i>4. Efficiency of solutions for long term operation</i> 5. Низкие затраты на содержание <i>5. Low maintenance costs</i>	1. Низкие затраты на строительство <i>1. Low construction costs</i> 2. Низкие затраты на содержание <i>2. Low maintenance costs</i> 3. Короткое время производства работ <i>3. Short execution of work times</i> 4. Минимизация времени закрытия движения <i>4. Minimisation of traffic closure times</i> 5. Минимизация затрат на весь жизненный цикл <i>5. Minimise life cycle costs</i> 6. Минимизация воздействий на окружающую среду <i>6. Minimisation of environmental impacts</i>

Источник [11] / Source [11]

Целью настоящего аналитического исследования является анализ существующих устройств и способов объединения в совместную работу полимерно-композитных главных балок пролетного строения и плиты ездового полотна автодорожного моста с последующим определением перспективных направлений развития данной области и разработкой конструкции объединения для передачи усилий сдвига и растяжения/сжатия между поверхностями границы раздела в гибридной конструкции пролетного строения моста.

Областью настоящего исследования является теоретический анализ, включающий литературный обзор отечественных и зарубежных научных статей, патентов, отчетов и нормативных документов в области ПКМ и гибридных конструкций.

Отечественные исследования

Domestic studies

Изучение, адаптация и совершенствование ранее апробированных типов конструкций является логичным подходом. Это позволяет основываться на существующем опыте и знаниях, однако необходимо учитывать новизну исследуемой области и существенные отличия характеристик стеклопластика от других традиционных для области строительства материалов. Прообразом гибридной по материалу конструкции пролетного строения можно считать сталежелезобетонные пролетные строения.

Исследованиями в области сталежелезобетонных пролетных строений и устройствами объединения в совместную работу стали и железобетона занимались Е.Е. Гибшман, Н.Н. Стрелецкий, В.А. Быстров, Н.Н. Бычковский и др. В трудах Карапетова Э.С., Атанова А.В., Лыковой А.В., Абашевой Л.П. [13; 14] систематизируются и анализируются существующие способы включения стали и железобетона в совместную работу.

Н.Н. Стрелецкий в [15] даёт определение термину «объединение» — это такое соединение железобетонных и стальных частей, которое обеспечивает совместность их работы, т. е. одинаковый или весьма близкий характер деформаций соседних волокон железобетона и стали.

Упор — выступающая деталь, укрепленная на стальном элементе, работающая наподобие шпонки и вызывающая в бетоне достаточно равномерные деформации смятия [15].

В работах [15–17] приводится деление упоров по:

- характеру работы — жесткие, гибкие, в виде перфорированной полосы;
- типу контакта объединения — сталь-сталь, сталь-бетон, клеевой контакт.

Отдельно стоит выделить способ объединения при помощи увеличения трения и сцепления между железобетоном и сталью путем поперечного обжатия объединяемых элементов и шва между ними. Недостатком такого решения является конструктивная сложность его реализации, а также быстрое нарушение сцепления при статических и динамических нагрузках, в связи с чем требуется проведение специальных мероприятий, направленных на недопущение нарушения сцепления до наступления предельного состояния объединительных деталей.

В случае конструкции упора из прокатных профилей он считается гибким при отсутствии укрепляющих ребер жесткости.

Гибкие упоры можно условно разделить по:

- восприятию отрывающих (возникающих при чистом сдвиге) и косых растягивающих (возникающих при сдвиге с изгибом) сил [18] — обычные гибкие упоры и анкеры;
- положению в пространстве — вертикальные, наклонные, комбинированные.

Исторически первыми появились объединительные элементы в виде арматурных спиралей. Применялись гибкие упоры из прокатных профилей — швеллеров, двутавров. С середины XX века в мире обширное распространение получили стерженьковые гибкие упоры, активно применяемые и по сей день (рис. 1). Такая конструкция работает и на сдвиг, и на растяжение.



Рисунок 1. Гибкие штыревые упоры и керамические кольца [16]

Figure 1. Flexible pin stops and ceramic rings [16]

Первые в СССР сталежелезобетонные пролетные строения имели жесткие упоры из металлических уголков, которые преобладали в отечественном мостостроении до начала 80-х годов XX в. В нормах¹ 1984 г. впервые приводились требования к конструированию и расчету гибких штыревых упоров. В 1997 г. А.В. Кручинкин, В.П. Егоров, В. Г. Решетников предложили конструкцию гребенчатого упора [19], которая рекомендована к применению в отраслевом дорожном методическом документе Росавтодора.²

На сегодняшний день в основном применяется два метода соединения железобетона и стали — гребенчатые упоры с наклонными прорезями и штыревые упоры [20]. Установлено, что лучшая работа шва обеспечивается при часто расставленных мелких упорах по сравнению с редко расположенными мощными упорами [15].

При объединении в совместную работу стальной балки и железобетонной плиты проезда основное внимание инженеров сконцентрировано на изучении поведения той части упора, которая находится в бетоне. Это связано с тем, что главные балки и упоры выполнены из стали, а способы объединения стальных элементов давно изучены, отработаны и весьма надежны. Дело обстоит иначе, если по одну из сторон от границы раздела сред вместо стали оказывается полимерный композиционный материал.

¹ СНиП 2.05.03-84*. Мосты и трубы. — М.: ГУП ЦПП, 2000.

² ОДМ 218.4.003-2009. Рекомендации по объединению металлических главных балок с монолитной железобетонной плитой посредством непрерывных гребенчатых упоров в сталежелезобетонных пролетных строениях мостов.

Подвижная нагрузка оказывает разное влияние на конструкции, выполненные из разных материалов, в связи с чем это должно быть учтено при проектировании. Для конструкций из ПКМ практически отсутствует нормативная документация [21], в связи с чем возникает необходимость в разработке специализированных технических условий и стандартов, а также проведение как теоретических, так и практических исследований в данной области.

В исследовании Иванова А.Н., Яшнова А.Н. [2] включение плиты в совместную работу с главными фермами осуществляется с помощью жестких упоров из металлического уголка. В результате установлено, что на жесткость гибридных по материалу конструкций большое влияние оказывает конструкция упоров, которая должна обеспечивать упругое включение плиты в работу главных ферм и исключить ее отлипание.

В изобретении № RU 2604539 C1 [22] гибридное пролетное строение состоит из предварительно напряженных балок из полимерного композиционного материала и железобетонной плиты проезда, включенной в совместную работу с балками посредством металлических упоров (рис. 2). Авторы не приводят детального описания конструкции объединения, но из чертежа можно предположить, что речь идет об одной из разновидностей гибких упоров. Монтаж осуществляется до отправки балок на место строительства.

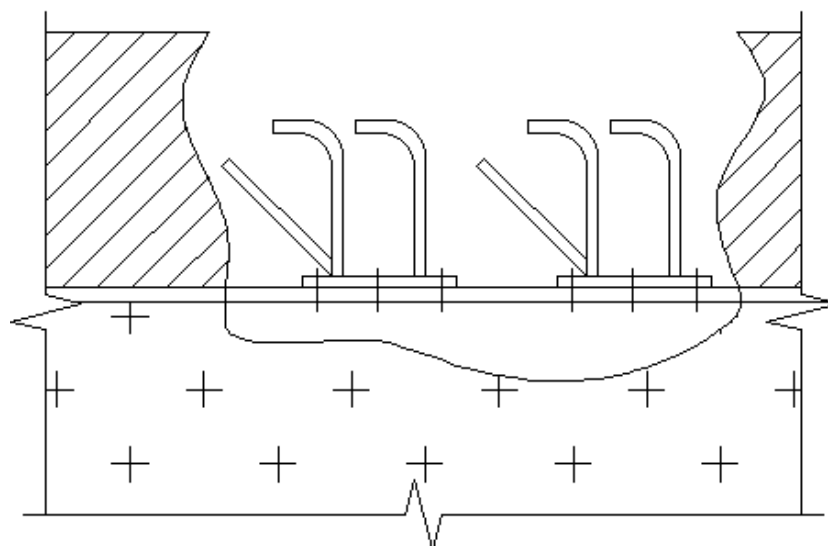


Рисунок 2. Узел объединения в совместную работу композитной балки пролетного строения и железобетонной плиты проезда [22]

Figure 2. Composite beam and reinforced concrete driveway slab joint [22]

В изобретении № RU 2794115 C1 [23] также включение в совместную работу осуществляется посредством упоров. Упоры выполняются из арматурных стержней, закрепленных на стальной пластине, прикрепленной к главной балке болтами (рис. 3).

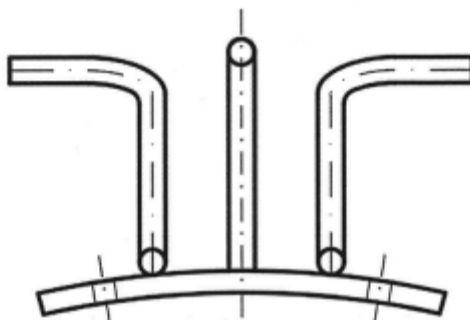


Рисунок 3. Конструкция упора [23]

Figure 3. Design of the stop [23]

Зарубежные исследования

Foreign studies

В работе Alnahhal W. & Aref A. [1] предложена конструкция гибридной системы из стеклопластика и бетона, состоящая из трапецевидных ячеек из стеклопластика, где в зону сжатия помещен тонкий слой бетона (рис. 4).

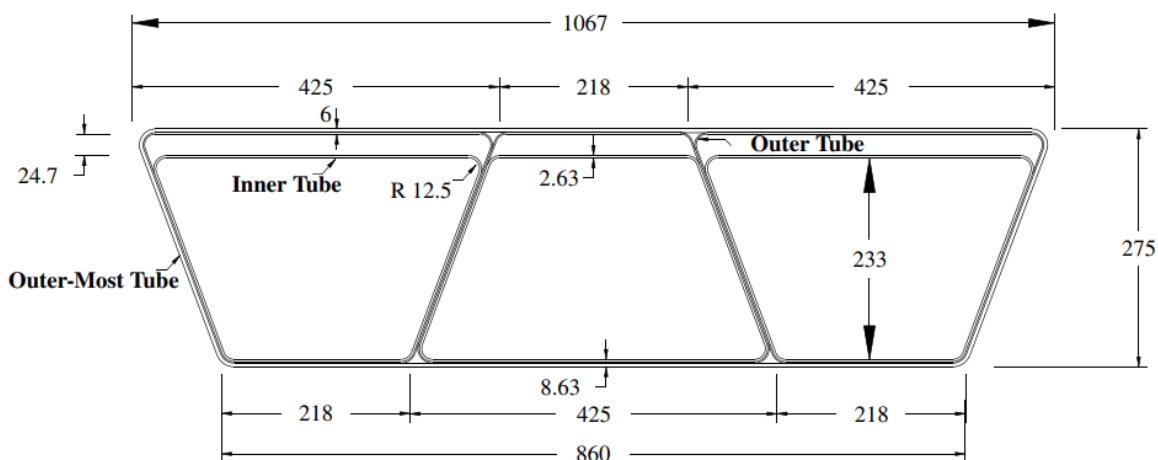


Рисунок 4. Поперечное сечение гибридного пролетного строения из стеклопластика и бетона [1]

Figure 4. Cross-section of a hybrid fibreglass and concrete span [1]

Экспериментально был разработан прототип пролетного строения, представляющий собой однопролетный однополосный мост длиной пролета 18,3 м. Результаты практического и численного экспериментов подтвердили соответствие конструкции требованиям AASHTO³ по жесткости и прочности.

³ AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (1998).

Выбор конструкции объединения в совместную работу

Selection of the integration design for cooperative work

Выбор типа соединения следует производить с учетом выбора наиболее оптимального режима работы каждого элемента. Основные требования, предъявляемые к конструкции:

Обеспечение достаточной прочности и жесткости для восприятия возникающих статических и динамических нагрузок, а также предотвращения излишних деформаций и прогибов.

Эффективное включение в совместную работу материалов по обе стороны от границы раздела сред. Соединение должно учитывать различные модули упругости и температурные коэффициенты расширения материалов.

Устойчивость к усталостным повреждениям, долговечность и коррозионная стойкость. Коррозионная стойкость имеет особое значение в контексте строительства мостов из ПКМ в связи с одним из их ключевых достоинств — устойчивости к воздействию агрессивных сред, следовательно, соединение должно также эффективно противостоять агрессивным воздействиям.

Простота монтажа и ремонтпригодность. Соединение должно быть спроектировано таким образом, чтобы облегчить процесс монтажа и сократить трудозатраты. Конструкция должна предусматривать возможность лёгкого доступа для проведения осмотров, технического обслуживания и ремонта.

Индустриальность. Все элементы соединения должны быть технологичными в производстве и не требовать применения сложного и дорогостоящего оборудования. Необходимо учитывать возможность стандартной серийной сборки и контроля качества на всех этапах производства.

Безопасность и надёжность. Соединение должно соответствовать действующим нормам и стандартам безопасности, обеспечивая надёжную эксплуатацию моста в течение всего срока службы. В конструкции должны быть предусмотрены меры, предотвращающие неожиданные отказы, например, длительно развивающиеся во времени визуально наблюдаемые дефекты.

Характер работы соединения. В последнее время наиболее часто встречающимся типом объединения в сталежелезобетонных пролетных строениях являются вертикальные гибкие штыревые упоры [16; 24]. В связи с повышенными деформативными характеристиками стеклопластика,

а также в виду распространенности данного решения в первом приближении предполагается принять аналогичную по принципу работы конструкцию верхней части упора. Это означает, что верхняя часть упора будет испытывать изгибающие, сдвигающие и отрывающие напряжения. Однако, современный опыт комплексного проектирования подобных конструкций для границы раздела «стеклопластик-бетон» пока недостаточен, поэтому изучение работы таких соединений является одной из перспективных областей для исследования.

Тип контакта объединения. Применительно к гибридным пролетным строениям к обозначенным ранее типам контактов по границе раздела сред добавляется контакт «бетон-стеклопластик». Адгезия по этому контакту незначительна [3], а значит, учитывать ее нет смысла. Однако, в определенных конструкциях возможно применение болтофрикционных соединений, при которых между накладками и пролетным строением могут возникать пары «сталь-стеклопластик», «сталь-бетон» или «стеклопластик-стеклопластик». Согласно экспериментальным исследованиям Иванова А.Н. [25] коэффициент трения по контакту «стеклопластик-сталь» составляет 0,376, по контакту «стеклопластик-стеклопластик» — 0,552. Таким образом, в контексте болтофрикционных соединений пара трения «стеклопластик-стеклопластик» при прочих равных будет работать более эффективно в сравнении с другими типами контактов при условии, что будут обеспечены аналогичные характеристики прочности ПКМ на сжатие поперек волокон.

Материал соединительного элемента. В связи с тем, что на границе раздела сред возникают сдвигающие, изгибающие и отрывающие усилия, при выборе материала в первом приближении принимается сталь, являющаяся традиционным выбором для соединительных элементов благодаря своей высокой прочности и жесткости.

Материал плиты проезда. Плита может изготавливаться из стали, стеклопластика, железобетона, сталефибробетона, полимербетона и др.

В рамках данного исследования предполагается, что плита проезда изготовлена из бетона с возможностью применения различных армирующих наполнителей, что не является определяющим для данного исследования, поскольку поведение вертикальных гибких стержневых упоров в бетоне сравнительно достаточно изучено [13; 18; 26].

Материал главных балок. Композит — сплошной неоднородный материал, состоящий из двух или более компонентов, среди которых выделяют армирующую и связующую составляющие. Согласно исследованию [27] применяются следующие основные связующие: фенолформальдегидные, аминокальдегидные, термореактивные эпоксидные, полиэфирные, кремнийорганические, фурановые, термореактивные

полиуретановые смолы; армирующие: стеклянный, углеродный, асбестовый, базальтовый, борный, металлический, органический, полимерный (например, резина) и другие наполнители.

Поскольку выбор материала главной балки при проектировании пролетного строения первостепенен, следует в первом приближении опираться на наиболее распространенные в мировой практике мостостроения решения. Благодаря своим механическим характеристикам и стоимости таким решением являются однонаправленно армированные стеклопластики [28].

Конструкция и способ изготовления главных балок. В целях соответствия требованиям нормативной документации⁴ принимается, что жесткость гибридного пролетного строения из ПКМ сопоставима с типовыми железобетонными балками [29].

Существуют следующие технологии изготовления композиционных материалов [30; 31]: контактное формование, вакуумная инфузия, пултрузия, напыление, прессование, намотка, метод RTM (Resin Transfer Moulding — метод инъекции ненасыщенной полиэфирной смолы в закрытую форму).

В мостостроении нашли применение пултрузия, инфузия и формование из препрегов. Инфузия решает проблему монтажных соединений отдельных элементов, однако основными её недостатками являются сложность ремонта и ограниченные размеры изделий, обусловленные производственными и транспортными факторами. Пултрузия позволяет производить длинномеры с постоянным сечением и высокой степенью автоматизации. Главными преимуществами этой технологии являются точность геометрических параметров, возможность изготовления больших объемов продукции, а также достижение высоких механических характеристик готового изделия. Пултрузия ограничена в производстве сложных по форме изделий и требует использования дополнительных соединительных элементов, что может сказаться на надежности конструкции.

В производственных условиях типичные толщины листа стеклопластикового профиля для балок составляют до 20 м [32]. С увеличением толщины возрастают технологические сложности, такие как неравномерная пропитка волокон смолой, увеличение времени отверждения и повышенная вероятность возникновения дефектов, поэтому если требуется более толстый профиль, обычно рассматриваются альтернативные технологии (например, инфузия).

⁴ СП 35.13330.2011 «СНиП 2.05.03-84* Мосты и трубы».

Согласно п. 6.2.6 ОДМ 218.2.058-2019⁵ расчет конструкций из ПКМ производится с использованием следующего неравенства:

$$S\gamma_f \leq \frac{R_{cp}(1-2\nu)}{\gamma_m\gamma_c}, \quad (1)$$

где:

S — напряжения (деформации) в конструкции от воздействия нормативных нагрузок, МПа;

γ_f — коэффициент надежности по нагрузке;

R_{cp} — среднее значение сопротивления (деформации) ПКМ, МПа;

ν — коэффициент вариации;

γ_c — коэффициент надежности для технологии изготовления, определяется согласно таблице 2;

γ_m — обобщенный коэффициент надежности по материалу.

Таблица 2 / Table 2

**Значения коэффициента надежности γ_c
для различных технологий изготовления конструкций из ПКМ**
**Values of reliability coefficient γ_c for different
fabrication techniques of polymeric composite materials structures**

Способ производства <i>Fabrication method</i>	Значение коэффициента надежности γ_c <i>Value of reliability coefficient γ_c</i>	
	Для ПКМ постотвержденного <i>For post-cured polymeric composite materials</i>	Для ПКМ без постотверждения <i>For polymeric composite materials without post-curing</i>
Инфузия, в том числе вакуумная <i>Infusion, including vacuum</i>	1,2	1,4
Формование из препрега <i>Moulding from prepreg</i>	1,1	1,3
Пултрузия <i>Pultrusion</i>	1,1	1,3
Ручная выкладка <i>Hand lay-up</i>	1,4	1,7

Источник⁵ / Source⁵

Из выражения (1) следует, что технология изготовления учитывается при расчете конструктивных элементов через коэффициент γ_c . Согласно таблице 2 наименьшие значения данного коэффициента соответствуют пултрузии и формованию из препрега, что позволяет наиболее эффективно использовать свойства ПКМ.

Мосты всегда являются индивидуальными конструкциями, требующими высокой точности и надежности. Одним из главных преимуществ препрегов является возможность получения композитных

⁵ ОДМ 218.2.058-2019 Рекомендации по применению композиционных материалов в конструкциях мостовых сооружений и пешеходных мостов.

материалов с точно контролируемым соотношением волокна и смолы, что обеспечивает однородность структуры и высокие физико-механические свойства готового изделия, в том числе и при толщинах пакетов свыше 25 мм (при использовании семипрегов) [33]. Кроме того, применение метода формования из препрегов открывает возможность подготовки отверстий для крепежных элементов на стадии изготовления главных балок до полного отверждения, таким образом получая надежные и бездефектные соединения с точным соблюдением геометрических параметров без проведения дополнительной механической обработки.

Одной из ключевых проблем при изготовлении методом формования из препрегов крупногабаритных элементов, таких как главные балки мостов, является сложность ручной выкладки, которая требует большого количества трудозатрат и приводит к повышению вероятности ошибок из-за человеческого фактора. Автоматизация процесса является перспективным направлением развития данной технологии [34; 35]. Благодаря высокой скорости и точности автоматизированной выкладки препрегов можно добиться снижения времени на производственный цикл и, соответственно, повысить общую эффективность метода.

На основании сказанного наиболее целесообразным к рассмотрению вариантом представляется стеклопластиковая формованная из препрегов балка с верхним листом толщиной до 20 мм. Такой выбор позволяет эффективно использовать преимущества ПКМ, избегая при этом технологических сложностей, связанных с увеличением толщины профиля.

Соединение элемента объединения с главной балкой. Мостовые сооружения отнесены к классу ответственных сооружений, что определяет их расчетный срок службы не менее 50 лет⁶ и обязывает применять исключительно проверенные и надежные технологии.

Среди различных типов соединений в мостостроении распространение получили только клеевые, болтовые и клееболтовые [25].

Клеевые соединения имеют несколько существенных недостатков, среди которых сравнительно низкая выносливость под действием динамических нагрузок, низкая ремонтпригодность, сложность монтажа и значительное влияние человеческого фактора на прочность соединения, что не соответствует требованиям, предъявляемым к конструкции.

Болтовые соединения обладают высокой надежностью под действием динамических нагрузок, просты в монтаже, методы осуществления контроля качества таких соединений известны и надежны, что позволяет выполнять их со стабильным качеством. К недостаткам

⁶ ГОСТ 27751-2014 Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения.

относится возникновение концентраторов напряжений в области просверленных отверстий, вероятность появления коррозии и связанной с этим потребности в регулярном техническом обслуживании, а также увеличение веса конструкции.

Клееболтовые соединения объединяют достоинства клеевых и болтовых соединений. Они более устойчивы к вибрациям, менее подвержены коррозии, обладают более высокой прочностью, сводят к минимуму концентрацию напряжений в зоне соединения болта с отверстием за счет лучшего распределения напряжений между соединяемыми элементами. Преимущество комбинированных соединений также заключается в использовании усилия зажима, создаваемого системой болт / гайка / шайба, которая необходимо для процесса отверждения клея во время монтажа. Вместе с тем данные соединения еще более сложны в монтаже, их ремонт более трудоемок, а качество исполнения зависит от точности соблюдения технологии монтажа и подготовки поверхностей.

Поскольку стеклопластиковые материалы анизотропны, концентрация напряжений в круглом отверстии может быть в 8 раз больше среднего напряжения, по сравнению с 3-кратным средним напряжением для изотропных материалов, таких как сталь [17].

Болтовое соединение сжимает соединяемые элементы, а стеклопластик обладает сравнительно низкой несущей способностью на сжатие поперек волокон (табл. 3). Кроме этого, при сверлении отверстий в композитном материале разрушаются армирующие волокна, что негативно влияет на прочность балки.

Таблица 3 / Table 3

**Значения сопротивлений стеклопластика
различных марок при сжатии поперек волокон**

Resistance values of fibreglass of different grades in compression across the fibres

Вид напряженного состояния Type of stress state		Значения сопротивлений, Мпа / Resistance values, MPa			
		Среднее, R_N Average, R_N	Нормативное, $\bar{R}$ Normative, $\bar{R}$	Расчетное Calculated	
СППС-240 Construction profiled pultrusion glass-fibre reinforced plastic-240					
Сжатие Compression	Продольное / longitudinal	220	179,0	R_1^c	97,5
	Поперечное / transverse	70	55,3	R_2^c	34,9
СППС-340 Construction profiled pultrusion glass-fibre reinforced plastic-340					
Сжатие Compression	Продольное / longitudinal	280	227,8	R_1^c	124,1
	Поперечное / transverse	100	79.0	R_2^c	49.8

Источник⁷ / *Source*⁷

⁷ СТО «39790001.03-2007 «Дороги автомобильные общего пользования, Пешеходные мосты и путепроводы. Конструкции дорожно-строительные из композиционных материалов. Технические требования».

Чтобы дать ответ на вопрос, как снизить влияние отрицательных эффектов, необходимо рассмотреть механизмы и виды разрушения стеклопластика. В данной работе рассматривается конструкция разрезного пролетного строения, а значит в верхнем поясе главной балки учитывается только влияние одноосных сжимающих напряжений.

В болтовом соединении, где соединяемые элементы выполнены из стеклопластика, режимы разрушения аналогичны болтовым соединениям из стали, однако, поскольку в композитах не происходит податливости, механизмы разрушения композитов и металлов полностью отличаются друг от друга [36].

Выход из строя болтового соединения даже в стеклопластике не является внезапным, и это одно из преимуществ использования такого соединения. Кроме того, композитные соединения, подвергающиеся сжатию, менее чувствительны к геометрии соединения и, как правило, прочнее, чем соединения, подвергающиеся растягивающим нагрузкам [8], что соответствует характеру работы объединения плиты проезда и главной балки.

Принимая во внимание совокупность всех указанных факторов, в первом приближении рационально принять болтовой тип соединения, как наиболее простой и надежный. При этом необходимо учесть и снизить негативные воздействия на материал композитной балки.

Анализ механизмов разрушения верхнего листа композитной балки

Analysis of failure mechanisms of the top plate of a composite beam

Несмотря на то, что формально сжатие от растяжения отличается только знаком приложенной нагрузки, поведение материала будет принципиально другим. При растяжении волокна самоориентируются вдоль нагрузки, тогда как при сжатии материал, напротив, стремится «уйти» из-под нагрузки.

Выделяют следующие виды разрушения при сжатии (рис. 6) [37]:

1. Смятие по торцу.
2. Потеря устойчивости.
3. Расслоение или расщепление с выщелкиванием слоев.
4. «Бочкообразование», или расслоение по середине.
5. Образование полосы сдвига (кинка).

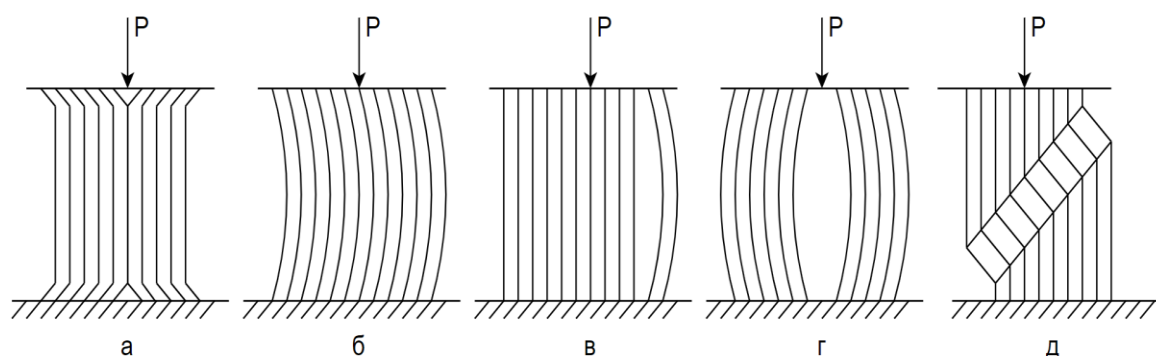


Рисунок 6. Возможные механизмы разрушения: а — смятие;
б — потеря устойчивости; в — выщелкивание слоев; г — расслоение; д — кинк [37]

Figure 6. Possible failure mechanisms: a — buckling;
b — loss of stability; c — ply leaching; d — delamination; e — kink [37]

Наиболее часто при сжатии наблюдаются потеря устойчивости по форме кинка (рис. 6 д) и растрескивание связующего с потерей устойчивости каждого отдельного армирующего слоя (рис. 6 б, г) [38].

Существуют различные приемы для недопущения преждевременной потери несущей способности по указанным механизмам, о которых целесообразно вести речь после анализа вероятности наступления каждого из них применительно к рассматриваемой конструкции соединения.

На вероятность срабатывания того или иного из механизмов отказа влияют несколько факторов [36]:

1. Геометрические параметры: ширина, расстояние между отверстиями, толщина, диаметр отверстия и т. д.
2. Материалы: тип матрицы и волокна, содержание наполнителей и объем, фракция, обработка поверхности волокна и т. д.
3. Параметры крепежа: тип, размер крепежного элемента, размер отверстия, прилагаемый крутящий момент затягивания.
4. Конструктивные параметры: тип соединения, направление нагрузки, скорость нагружения, статическая и динамическая нагрузки и т. д.
5. Факторы длительного воздействия и окружающей среды: ползучесть и разрыв при ползучести, влажность, температурные циклы, химические воздействия и коррозия под напряжением и т. д.

Болтовое соединение неизбежно подразумевает наличие отверстий в соединяемых элементах. Отверстие — это ослабление сечения, в связи с этим требуется корректно оценить их влияние на несущую способность композитной балки, а также предложить конструкцию объединения и технологию его выполнения, минимизирующую выявленные негативные эффекты.

Таблица 4 / Table 4

Обрабатываемость композиционных материалов различными методами

Machinability of composite materials by different methods

Вид формообразования <i>Type of moulding</i>	Достоинства <i>Advantages</i>	Недостатки <i>Disadvantages</i>
Механическая обработка <i>Mechanical processing</i>	— Высокая точность — Низкая шероховатость (не для всех материалов) — Высокая технологичность — Наличие богатой исторической базы практического применения — <i>High precision</i> — <i>Low roughness (not for all materials)</i> — <i>High manufacturability</i> — <i>Availability of a rich historical base of practical application</i>	— Низкая стойкость режущего инструмента — Повышенная температура в зоне контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью — <i>Low resistance of cutting tools</i> — <i>Increased temperature in the contact zone of the tool with the machined surface</i>
Лазерная обработка <i>Laser treatment</i>	— Высокая точность — Отсутствие деформаций — Отсутствие габаритных ограничений для деталей или заготовок — <i>High accuracy</i> — <i>No deformations</i> — <i>No dimensional limitations for parts or workpieces</i>	— Повышенная температура в зоне реза — Выделение нежелательных газов — Оплавление краев резания — Низкая производительность — Высокая энергозатратность — <i>Increased temperature in the cutting zone</i> — <i>Release of undesirable gases</i> — <i>Melting of cutting edges</i> — <i>Low productivity</i> — <i>High energy consumption</i>
Ультразвуковая обработка <i>Ultrasonic machining</i>	— Высокая точность — Низкая шероховатость — Отсутствие или минимальное расслоение материала — <i>High precision</i> — <i>Low roughness</i> — <i>No or minimal material delamination</i>	— Низкие производительность и стойкость режущего инструмента — <i>Low productivity and durability of cutting tools</i>
Ультратруйные технологии <i>Ultrajet technology</i>	— Высокая точность — Отсутствие габаритных ограничений для деталей или заготовок — Высокая эффективность — Низкая энергозатратность — Отсутствие термического воздействия в зоне реза (максимальная температура может достигать 70) — <i>High precision</i> — <i>No dimensional limitations for parts or workpieces</i> — <i>High efficiency</i> — <i>Low energy consumption</i> — <i>No thermal effects in the cutting zone (maximum temperature can reach 70)</i>	— Низкая производительность — Ограничения по толщине обрабатываемого материала — <i>Low productivity</i> — <i>Limitations on the thickness of the material to be machined</i>
Метод прокалывания полутвердого композиционного материала <i>Piercing method of semi-cured composite material</i>	— Сохранение структуры композиционного материала — Увеличение прочностных свойств в зоне формируемого отверстия — <i>Preservation of composite material structure</i> — <i>Increase of strength properties in the area of the hole to be formed</i>	— Отсутствие разработок для внедрения в крупно-масштабное производство — Малоизученность физических процессов — <i>Lack of developments for implementation in large-scale production</i> — <i>Poorly studied physical processes</i>

Источник [41] / Source [41]

В отличие от традиционных материалов композиты обладают внутренним армированием, обеспеченным ровингами, нитями, тканями или другими наполнителями в его составе, что приводит к резкому снижению прочностных свойств в зоне механической обработки [39; 40].

Первоначально композиционные материалы были дороги и дефицитны, потому применялись и разрабатывались в основном для нужд военной авиации и ракетно-космической отрасли, а затем стали распространяться в другие сферы, в том числе и в строительство. В связи с этим целесообразно обратить внимание на методы выполнения отверстий, используемые в авиации и ракетостроении. Выделяют следующие способы формообразования отверстий в композиционных материалах (табл. 4) [41].

Также в некоторых случаях возможно применение специальных оправок в процессе изготовления изделия, что позволяет получить на выходе уже отформованное отверстие без нарушения структуры внутреннего армирования композиционного материала.

Наиболее распространенным методом формообразования в мостостроении на текущий момент является механическая обработка, а именно — сверление. Сверление отвержденного композиционного материала может вызывать следующие дефекты — наличие заусенцев, перерезание нитей заполнителя, растрескивание связующей матрицы, расслоение на отдельные слои и т. д. [40]. В настоящее время существуют способы снижения части указанных дефектов отверстий путем применения особых сверл [42], однако не устраняющих их всех.

Альтернативный вариант сверлению — прокалывание неотвержденного полимерного композиционного материала [43; 44]. Достоинством данного метода является то, что нити не разрезаются, а раздвигаются, а также происходит их локальное уплотнение в зоне отверстия [45]. Согласно исследованию [46], испытания на смятие стенки отверстия показали, что при формовании таких отверстий прочность на 61 % выше у отформованных образцов, чем у просверленных.

Таким образом, применение нового способа формования отверстий при помощи прокалывания может способствовать разработке эффективной конструкции объединения, однако требует проведения теоретических и экспериментальных исследований применительно к области мостостроения.

Заключение

Conclusion

По итогам проведенной работы получены следующие результаты:

1. Сформулированы требования к свойствам конструкции объединения в целом, а также к свойствам отдельных её элементов;
2. Сформировано предложение по типу соединения, материалу и его конструктиву;
3. Выделены перспективные направления совершенствования физико-механических характеристик конструкции объединения стеклопластиков с бетоном в мостостроении.

Для подтверждения выдвинутых аналитических предположений необходимо проведение дальнейших научно-экспериментальных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Alnahhal, W.** Structural performance of hybrid fiber reinforced polymer-concrete bridge superstructure systems / W. Alnahhal, A. Aref. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2007.09.002> // Composite Structures. — 2008. — Т 84. — № 4. — С. 319–336. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263822307002176>. (дата обращения: 27.09.2024).
2. **Иванов, А.Н.** Экспериментальные исследования пролетного строения из полимерного композиционного материала / А.Н. Иванов, А.Н. Яшнов // Вестник Тихоокеанского государственного университета. — 2014. — № 4. — С. 61–70. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22786689>. — EDN TEQRFD. (дата обращения: 27.09.2024).
3. **Correia, J.** Flexural behaviour of GFRP-concrete hybrid beams with interconnection slip / J. Correia, F. Branco, J. Gomes Ferreira. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2005.06.003> // Composite Structures. — 2007. — Т 77. — № 1. — С. 66–78. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263822305001546>. (дата обращения: 27.09.2024).
4. **Li, Y.-F.** Case study of first all-GFRP pedestrian bridge in Taiwan / Y.-F. Li, S. Badjie, W. Chen, Y.-T. Chiu. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2014.05.001> // Case Studies in Construction Materials. — 2014. — Т 1. — С. 83–95. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509514000138>. (дата обращения: 27.09.2024).
5. **Santos Neto, A.B.D.S.** Composite concrete/GFRP slabs for footbridge deck systems / A.B.D.S. Santos Neto, H.L. La Rovere. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2010.02.005> // Composite Structures. — 2010. — Т 92. — № 10. — С. 2554–2564. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263822310000644>. (дата обращения: 27.09.2024).
6. **White, S.C.** arcoBridge — Low cost FRP Bridges for mainstream applications / S. C. White, N. Price, N. Rajamanie [и др.]. — DOI <https://doi.org/10.2749/222137815818358943> // Structural Engineering: Providing Solutions to Global Challenges, Geneva, Switzerland, September 2015. — 2015. — С. 1566–1574. — URL: <https://structurae.net/en/literature/conference-paper/arcobridge-low-cost-frp-bridges-for-mainstream-applications>. (дата обращения: 27.09.2024).
7. **Collings, T.A.** Experimentally determined strength of mechanically fastened joints / T.A. Collings // Joining Fibre-Reinforced Plastics / Дордрехт: Springer, 1987. — С. 9–63. — URL: <https://link.springer.com/book/9781851660193>. (дата обращения: 27.09.2024).
8. **Mosallam, A.S.** Design Guide for FRP Composite Connections / A. S. Mosallam. — American Society of Civil Engineers, 2011. — 624 с. — URL: https://books.google.ru/books?id=-M-Yz0FXCeAC&redir_esc=y (дата обращения: 27.09.2024).
9. **Keller, T.** Overview of Fibre-Reinforced Polymers in Bridge Construction / T. Keller. — DOI <https://doi.org/10.2749/101686602777965595> // Structural Engineering International. — 2002. — Т 12. — № 2. — С. 66–70. — URL: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.2749/101686602777965595>. (дата обращения: 27.09.2024).

10. **Воробей, В.В.** Соединения конструкций из композиционных материалов / В.В. Воробей, О.С. Сироткин. — Ленинград: Машиностроение, 1985. — 168 с. — URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01008782261> (дата обращения: 27.09.2024).
11. **Mara, V.** Bridge decks of fibre reinforced polymer (FRP): A sustainable solution / V. Mara, R. Haghani, P. Harryson. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.036> // Construction and Building Materials. — 2014. — Т 50. — С. 190–199. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061813008763>. (дата обращения: 27.09.2024).
12. **Пискунов, А.А.** Применение полимерных композитных материалов в пролетных строениях автодорожных мостов / А.А. Пискунов, С.А. Луканкин, Е.В. Мазур [и др.]. — DOI <https://doi.org/10.15862/09SATS324> // Транспортные сооружения. — 2024. — Т 11. — № 3. — С. 09SATS324. — URL: <https://t-s.today/09SATS324.html>. (дата обращения: 27.09.2024).
13. **Карапетов, Э.С.** Анализ существующих способов включения стали и железобетона в совместную работу / Э.С. Карапетов, А.В. Атанов // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2018. — Т 15. — № 4. — С. 592–604. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37156209>. — EDN ZAMGLR. (дата обращения: 27.09.2024).
14. **Лыкова, А.В.** Анализ способов объединения бетона и стали в сталежелезобетонных мостах / А.В. Лыкова, Л.П. Абашева // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. — 2016. — Т 2. — С. 86–91. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27515041>. — EDN XECXGB. (дата обращения: 27.09.2024).
15. **Стрелецкий, Н.Н.** Сталежелезобетонные мосты / Н.Н. Стрелецкий. — Москва: Транспорт, 1965. — 376 с. — URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01008450369> (дата обращения: 27.09.2024).
16. **Корнеев, М.М.** Сталежелезобетонные мосты. Теоретическое и практическое пособие по проектированию / М.М. Корнеев. — СПб.: ФГБОУ ВПО ПГУПС, 2015. — 400 с.
17. **Гибшман, Е.Е.** Мосты со стальными балками, объединенными с железобетонной плитой / Е.Е. Гибшман. — Москва: Дориздат, 1952. — 87 с. — URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01005778674> (дата обращения: 27.09.2024).
18. **Ростовых, Г.Н.** Совершенствование методики расчёта гибких упоров в конструкциях сталежелезобетонных мостов / Г.Н. Ростовых // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2007. — № 3. — С. 79–87. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=11913797>. — EDN KASLPP. (дата обращения: 27.09.2024).
19. Патент № 2110639 С1 Российская Федерация, МПК E01D 12/00. Стыковое соединение монолитной железобетонной плиты и стальной балки сталежелезобетонного пролетного строения моста: № 97108669/03: заявл. 02.06.1997: опубл. 10.05.1998 / А.В. Кручинкин, В.П. Егоров, В.Г. Решетников; заявитель Научно-исследовательский центр "Мосты" Открытого акционерного общества "Научно-исследовательский институт транспортного строительства", Государственное предприятие Институт "Союздорпроект". — EDN ZRCQCT.
20. **Шишов, М.А.** Особенности расчета и проектирования шва объединения железобетонной плиты со стальной конструкцией в сталежелезобетонных пролетных строениях автодорожных мостов / М.А. Шишов, А.А. Галимзянов // Транспортное строительство. — 2016. — № 3. — С. 3–6. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27450957>. — EDN XCSLGJ. (дата обращения: 27.09.2024).
21. **Ерофеев, М.Н.** Анализ нормативно-технической и справочной документации по проектированию и строительству мостов с пролетными строениями из полимерных композитных материалов / М.Н. Ерофеев, С.В. Рыбаков, А.А. Ибрагимова [и др.]. — DOI <https://doi.org/10.15862/07SATS124> // Транспортные сооружения. — 2024. — Т 11. — № 1. — С. 07SATS124. — URL: <https://t-s.today/07SATS124.html>. — EDN UGKUDS. (дата обращения: 27.09.2024).
22. Патент № 2604539 С1 Российская Федерация, МПК E01D 2/00. гибридное пролетное строение с предварительно напряженными балками из полимерного композиционного материала и железобетонной плитой поверху: № 2015130755/03: заявл. 26.07.2015: опубл. 10.12.2016 / Б.В. Пыринов, А.А. Щелконогов, Ю.К. Шушакова, Е.А. Шелепова; заявитель Государственное казенное учреждение Новосибирской области "Территориальное управление автомобильных дорог Новосибирской области". — EDN ZEZBGP.

23. Патент № 2794115 С1 Российская Федерация, МПК E01D 2/00. Гибридное пролетное строение моста: № 2022114927: заявл. 01.06.2022: опубл. 11.04.2023 / А.Н. Иванов, И.В. Недобежкин, С.В. Пиняжин, В.В. Саушкин; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный университет путей сообщения", Общество с ограниченной ответственностью "ЭЛЕКТРОМАШ". — EDN HYRXT0.
24. **Shariati, A.** Various types of shear connectors in composite structures: A review / A. Shariati, H. Sulong, M. Suhatri, M. Shariati. — DOI <https://doi.org/10.5897/IJPSX11.004> // International Journal of Physical Sciences. — 2012. — Т 7. — С. 2876–2890. — URL: https://www.researchgate.net/publication/237062152_Various_types_of_shear_connectors_in_composite_structures_A_review. (дата обращения: 02.10.2024).
25. **Иванов, А.Н.** Перспективы применения болтофрикционных соединений элементов из полимерных фиброармированных композитов / А.Н. Иванов // Известия высших учебных заведений. Строительство. — 2013. — № 10. — С. 104–109. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21371023>. — EDN RZRKF. (дата обращения: 02.10.2024).
26. **Козак, Н.В.** Экспериментальное исследование режима работы гибких штыревых упоров сталежелезобетонного пролётного строения существующего автодорожного моста / Н.В. Козак. — DOI <https://doi.org/10.15862/07SATS122> // Транспортные сооружения. — 2022. — Т 9. — № 1. — С. 07SATS122. — URL: <https://t-s.today/07SATS122.html>. (дата обращения: 02.10.2024).
27. Современные полимерные композиционные материалы и их применение / А.С. Колосова, М.К. Сокольская, И.А. Виткалова [и др.] // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. — 2018. — № 5-1. — С. 245–256. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35086128>. — EDN XQGALR. (дата обращения: 02.10.2024).
28. Перспективы применения современных композиционных материалов в мостостроении / А.Н. Яшнов, А.Н. Иванов, А.П. Суляев, А.В. Диль // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. — 2012. — Т 3. — С. 339–345. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18875161>. — EDN PXBEJH. (дата обращения: 02.10.2024).
29. **Иванов, А.Н.** Опыт применения композиционных материалов в мостостроении / А.Н. Иванов, А.В. Мартынов // Символ науки: международный научный журнал. — 2015. — № 6. — С. 43–46. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23802504>. — EDN SAUJGH. (дата обращения: 02.10.2024).
30. **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://elibrary.ru/item.asp?id=45792676>. — EDN OWPNCI. (дата обращения: 02.10.2024).
31. **Донецкий, К.И.** Методы инфузии для изготовления полимерных композиционных материалов (обзор). Часть 1 / К.И. Донецкий, М.Н. Усачева, А.В. Хрульков. — DOI <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2022-0-6-58-67> // Труды ВИАМ. — 2022. — № 6. — С. 58–67. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49159887>. — EDN BDATWN. (дата обращения: 02.10.2024).
32. **Попов, С.Н.** Перспективы расширения возможностей применения пултрузионных стеклопластиков в строительстве в северных климатических условиях / С.Н. Попов, А.Е. Ушаков, Ю.Г. Кленин. — DOI <https://doi.org/10.24412/cl-37255-2024-1-225-227> // Физико-технические проблемы добычи, транспорта и переработки органического сырья в условиях холодного климата: Сборник трудов III Всероссийской конференции, посвященной 25-летию Института проблем нефти и газа СО РАН, Якутск, 10–13 сентября 2024 года / Киров: Межрегиональный центр инновационных технологий в образовании, 2024. — С. 225–227. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=69141424>. — EDN NDCRF. (дата обращения: 02.10.2024).
33. Особенности изготовления ПКМ методом вакуумного формования препрега / М.М. Григорьев, Д.И. Коган, Ю.А. Гусев, Я.М. Гуревич // Авиационные материалы и технологии. — 2014. — № 3. — С. 67–71. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21875166>. — EDN SKSBDJ. (дата обращения: 02.10.2024).
34. **Тимошков, П.Н.** Оборудование и материалы для технологии автоматизированной выкладки препрегов / П.Н. Тимошков. — DOI <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2016-0-2-35-39> // Авиационные материалы и технологии. — 2016. — № 2. — С. 35–39. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25940605>. — EDN VVRCTT. (дата обращения: 02.10.2024).

35. Роботизированная выкладка препрега как альтернатива технологиям ATL и AFP (обзор) / П.Н. Тимошков, В.А. Гончаров, Л.Н. Григорьева [и др.]. — DOI <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2021-0-3-87-98> // Труды ВИАМ. — 2021. — № 3. — С. 87–98. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44858039>. — EDN AUBANG. (дата обращения: 02.10.2024).
36. Kretsis, G. The strength of bolted joints in glass fibre/epoxy laminates / G. Kretsis, F.L. Matthews. — DOI [https://doi.org/10.1016/0010-4361\(85\)90615-9](https://doi.org/10.1016/0010-4361(85)90615-9) // Composites. — 1985. — Т 16. — № 2. — С. 92–102. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0010436185906159>. (дата обращения: 02.10.2024).
37. Полилов, А.Н. Биомеханика прочности волокнистых композитов / А.Н. Полилов, Н.А. Татусь. — Москва: Физматлит, 2018. — 326 с. — URL: <https://www.labirint.ru/books/634651/> (дата обращения: 02.10.2024).
38. Еремичев, А.Н. Анализ механизмов разрушения композиционных материалов при сжатии вдоль направления армирования / А.Н. Еремичев // Вестник Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана. Серия Машиностроение. — 2011. — № S1. — С. 69–73. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17070127>. — EDN OJOERL. (дата обращения: 02.10.2024).
39. Антипов, В.В. Перспективы развития алюминиевых, магниевых и титановых сплавов для изделий авиационно-космической техники / В.В. Антипов. — DOI <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2017-0-S-186-194> // Авиационные материалы и технологии. — 2017. — № S. — С. 186–194. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29329884>. — EDN YRVMAP. (дата обращения: 02.10.2024).
40. Раскутин, А.Е. Технологические особенности механообработки композиционных материалов при изготовлении деталей конструкций (обзор) / А.Е. Раскутин, А.В. Хрульков, Р.И. Гириш. — DOI <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2016-0-9-12-12> // Труды ВИАМ. — 2022. — № 9. — С. 12. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49576021>. — EDN WKEVYD. (дата обращения: 02.10.2024).
41. Хохлов, Ю.Н. Литературный обзор способов получения отверстий в композиционных материалах / Ю.Н. Хохлов, М.В. Ключников, М.А. Прохорова. — DOI <https://doi.org/10.18698/2541-8009-2021-1-664> // Политехнический молодежный журнал. — 2016. — № 1. — С. 1. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26604516>. — EDN DDAARL. (дата обращения: 02.10.2024).
42. Демиденко, Е.И. Технологическое обеспечение бездефектного сверления отверстий в изделиях из полимерных композиционных материалов / Е.И. Демиденко, В.И. Свищев. — DOI <https://doi.org/10.15593/2224-9877/2022.3.05> // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. — 2022. — Т 24. — № 3. — С. 40–48. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49576021>. — EDN OZHGKA. (дата обращения: 02.10.2024).
43. Патент № RU 2013 102 509 А Российская Федерация, МПК В26F 1/02. Способ изготовления отверстия в компоненте, состоящем из композитного материала: № 2013102509/02: заявл. 18.01.2013; опубл. 27.07.2014 / Диль О., Хумперт Р., Лембах А. Сова К.; заявитель ПРОФИЛЬ ФЕРБИНДУНГСТЕХНИК ГМБХ КО. КГ (DE).
44. Авторское свидетельство № 1599219 А1 СССР, МПК В29С 43/20, В29L 9/00. Способ изготовления отверстий в изделиях из композиционных материалов: № 4437567: заявл. 06.06.1988; опубл. 15.10.1990 / В.И. Колганов, Е.П. Либерт, В. М. Сахоненко; заявитель ПРЕДПРИЯТИЕ П/Я А-7632. — EDN OFYQCH.
45. Федотов, Д.А. Исследование прочности отверстий полученных методом прокола / Д.А. Федотов, К.Г. Скворцов // Труды МАИ. — 2018. — № 98. — С. 6. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32761946>. — EDN YVGDTF. (дата обращения: 02.10.2024).
46. Комков, М.А. Моделирование процесса формования отверстий в композитных конструкциях методом прокалывания неотвержденного полимерно-волокнутого материала / М.А. Комков, А.В. Колганов // Вестник Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана. Серия Машиностроение. — 2007. — № 3. — С. 33–47. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=9597361>. — EDN ICAMUR. (дата обращения: 02.10.2024).

Сведения об авторах:

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

Пискунов Александр Алексеевич — доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», Москва, Россия, e-mail: a.piskunov52@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5444-8415>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=807388

Ерофеев Михаил Николаевич — доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», Москва, Россия, e-mail: kventr@list.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1048-3574>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=836604

WoS: <https://www.webofscience.com/wos/author/rid/Q-4553-2017>

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=6701806693>

Мазур Евгений Витальевич — кандидат технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», Москва, Россия, e-mail: genha345@mail.ru

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1161926

Луканкин Сергей Анатольевич — доктор физико-математических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева-КАИ», Казань, Россия, ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», Казань, Россия, e-mail: lukankin.sergej@yandex.ru

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=10110

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=6507580592>

Статья получена: 14.10.2024. Принята к публикации: 26.11.2024. Опубликовано онлайн: 27.12.2024.

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

REFERENCES

1. Alnahhal W., Aref A. Structural performance of hybrid fiber reinforced polymer-concrete bridge superstructure systems. *Composite Structures*. 2008;84(4): 319–336. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2007.09.002>.
2. Ivanov A.N., Yashnov A.N. Experimental Research of The Superstructure from The Polymer Composite Materials. *Bulletin of Pacific National University*. 2014;(4): 61–70. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22786689> (accessed 27th September 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
3. Correia J., Branco F., Gomes Ferreira J. Flexural behaviour of GFRP–concrete hybrid beams with interconnection slip. *Composite Structures*. 2007;77(1): 66–78. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2005.06.003>.
4. Li Y.-F., Badjie S., Chen W., Chiu Y.-T. Case study of first all-GFRP pedestrian bridge in Taiwan. *Case Studies in Construction Materials*. 2014;1: 83–95. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2014.05.001>.
5. Santos Neto A.B.D.S., La Rovere H.L. Composite concrete/GFRP slabs for footbridge deck systems. *Composite Structures*. 2010;92(10): 2554–2564. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2010.02.005>.
6. White S.C., Price N., Rajamanie N., et al. arcoBridge — Low cost FRP Bridges for mainstream applications. *Structural Engineering: Providing Solutions to Global Challenges, Geneva, Switzerland, September 2015*. 2015: 1566–1574. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.2749/222137815818358943>.
7. Collings T.A. Experimentally determined strength of mechanically fastened joints. In: *Joining Fibre-Reinforced Plastics*. Dordrecht: Springer; 1987. p. 9–63. Available at: <https://link.springer.com/book/9781851660193> (accessed 27th September 2024). (In Eng.).
8. Mosallam A.S. Design Guide for FRP Composite Connections. American Society of Civil Engineers; 2011. Available at: https://books.google.ru/books?id=-M-Yz0FXCeAC&redir_esc=y (accessed 27th September 2024). (In Eng.).
9. Keller T. Overview of Fibre-Reinforced Polymers in Bridge Construction. *Structural Engineering International*. 2002;12(2): 66–70. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.2749/10168660277965595>.
10. Vorobey V.V., Sirotkin O.S. [Connections of structures made of composite materials]. Leningrad: Mashinostroyeniye; 1985. Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01008782261> (accessed 27th September 2024). (In Russ.).

11. Mara V., Haghani R., Harryson P. Bridge decks of fibre reinforced polymer (FRP): A sustainable solution. *Construction and Building Materials*. 2014;50: 190–199. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.036>.
12. Piskunov A.A., Lukankin S.A., Mazur E.V., Petropavlovskikh O.K., Ibragimova A.A., Nyukhina N.S., Rybakov S.V. Application of polymer composite materials in road bridge superstructures. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2024;11(3): 09SATS324. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15862/09SATS324>.
13. Karapetov E.S., Atanov A.A. Analysis of Existing Methods of Incorporation of Steel and Reinforced Concrete in Combined Action. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2018;15(4): 592–604. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37156209> (accessed 27th September 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
14. Lykova A.V., Abasheva L.P. Analysis of Ways to Combine Concrete and Steel in Steel-Concrete Composite Bridges. *Modern technologies in construction. Theory and practice*. 2016;2: 86–91. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27515041> (accessed 27th September 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
15. Streletskiy N.N. [Steel-reinforced concrete bridges]. Moscow: Transport; 1965. Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01008450369> (accessed 27th September 2024). (In Russ.).
16. Korneyev M.M. Stalezhelezobetonnyye mosty. Teoreticheskoye i prakticheskoye posobiye po proyektirovaniyu [Steel-reinforced concrete bridges. Theoretical and practical design manual]. St. Petersburg: Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University; 2015. (In Russ.).
17. Gibshman E.E. [Bridges with steel beams combined with a reinforced concrete slab]. Moscow: Dorizdat; 1952. Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01005778674> (accessed 27th September 2024). (In Russ.).
18. Rostovyykh G.N. Improvement of methods of calculation of flexible studs in steel iron concrete bridge structures. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2007;(3): 79–87. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=11913797> (accessed 27th September 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
19. Kruchinkin A.V., Egorov V.P., Reshetnikov V.G. *Butt Joint of Monolithic Reinforced Concrete Slab and Steel Girder of Steel-Reinforced Concrete Bridge Span Structure*. RU 2110639 C1 (Patent) 1998. (accessed 27th September 2024).
20. Shishov M.A., Galimzyanov A.A. Some Peculiarities in The Calculation of Joint Association of a Reinforced Concrete Slab with a Steel Structure of Composite Spans in The Highway Bridge Designing. *Transport construction*. 2016;(3): 3–6. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27450957> (accessed 27th September 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
21. Erofeev M.N., Rybakov S.V., Ibragimova A.A., Ovchinnikov I.G., Lukankin S.A., Ovchinnikov I.I., Piskunov A.A., Mazur E.V. Analysis of normative-technical and reference documentation on design and construction of bridges with superstructures made of polymer composite materials. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2024;11(1): 07SATS124. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15862/07SATS124>.
22. Pyrinov B.V., Shchelkonogov A.A., Shushakova Ju.K., Shelepova E.A. *Hybrid Span Structure with Prestressed Beams from Polymer Composite Material and Reinforced Concrete Slab from Above*. RU 2604539 C1 (Patent) 2016. (accessed 27th September 2024).
23. Ivanov A.N., Nedobezhkin I.V., Pinyazhin S.V., Saushkin V.V. *Hybrid Bridge Span*. RU 2794115 C1 (Patent) 2023. (accessed 27th September 2024).
24. A. Shariati, H. Sulong, M. Suhatri, M. Shariati Various types of shear connectors in composite structures: A review. *International Journal of Physical Sciences*. 2012;7: 2876–2890. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.5897/IJPSX11.004>.
25. Ivanov A.N. About The Problems of Connection Elements of Polymer Fibre Reinforced Composites. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2013;(10): 104–109. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21371023> (accessed 2nd October 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
26. Kozak N.V. Operating regime investigational study of steel-reinforced concrete superstructure flexible pin stops of the existing road bridge. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2022;9(1): 07SATS122. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15862/07SATS122>.
27. Kolosova A.S., Sokolskaya M.K., Vitkalova I.A., Torlova A.S., Pikalov E.S. Modern Polymer Composite Materials and Their Application. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2018;(5-1): 245–256. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35086128> (accessed 2nd October 2024). (In Russ., abstract in Eng.).

28. Yashnov A.N., Ivanov A.N., Sulyayev A.P., Dil' A.V. Prospects for the application of modern composite materials in bridge construction. *Modernization and scientific research in the transport complex*. 2012;3: 339–345. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18875161> (accessed 2nd October 2024). (In Russ.).
29. Ivanov A.N., Martynov A.V. Experience of using composite materials in bridge construction. *Symbol of Science: International Scientific Journal*. 2015;(6): 43–46. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23802504> (accessed 2nd October 2024). (In Russ.).
30. Golubev E.V., Romanov V.V. Review and Analysis of Composite Production Technologies. *Tsifrovaya nauka*. 2021;(4-3): 12–16. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=45792676> (accessed 2nd October 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
31. Donetskiy K.I., Usacheva M.N., Khrulkov A.V. Infusion methods for the manufacture of polymer composite materials (review). Part 1. *Trudy VIAM*. 2022;(6): 58–67. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2022-0-6-58-67>.
32. Popov S.N., Ushakov A.E., Klenin Yu.G. [Prospects for expanding the possibilities of using pultruded fiberglass in construction in northern climates]. In: *[Physical and technical problems of extraction, transport and processing of organic raw materials in cold climate conditions: Proceedings of the III All-Russian Conference dedicated to the 25th anniversary of the Institute of Oil and Gas Problems SB RAS, Yakutsk, September 10–13, 2024]*. Kirov: Interregional Center for Innovative Technologies in Education; 2024. p. 225–227. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=69141424> (accessed 2nd October 2024). (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.24412/cl-37255-2024-1-225-227>.
33. Grigoriev M.M., Kogan D.I., Gusev Y.A., Gurevich Y.M. Features of Producing Composites by Vacuum Molding of Prepreg. *Aviacionnye Materialy and Tehnologii*. 2014;(3): 67–71. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21875166> (accessed 2nd October 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
34. Timoshkov P.N. Equipment and Materials for The Technology of Automated Calculations Prepregs. *Aviation Materials and Technologies*. 2016;(2): 35–39. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2016-0-2-35-39>.
35. Timoshkov P.N., Goncharov V.A., Grigoreva L.N., Usacheva M.N., Khrulkov A.V. Robotic Laying Out of Prepregs as An Alternative to Technology to ATL And AFP (Review). *Trudy VIAM*. 2021;(3): 87–98. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2021-0-3-87-98>.
36. Kretsos G., Matthews F.L. The strength of bolted joints in glass fibre/epoxy laminates. *Composites*. 1985;16(2): 92–102. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/0010-4361\(85\)90615-9](https://doi.org/10.1016/0010-4361(85)90615-9).
37. Polilov A.N., Tatus' N.A. [Biomechanics of strength of fiber composites]. Moscow: Fizmatlit; 2018. Available at: <https://www.labirint.ru/books/634651/> (accessed 2nd October 2024). (In Russ.).
38. Yermichev A.N. Analysis of Mechanisms of Composite Material Destruction Under Compression Along Reinforcement Direction. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*. 2011;(S1): 69–73. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17070127> (accessed 2nd October 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
39. Antipov V.V. Prospects for Development of Aluminium, Magnesium and Titanium Alloys for Aerospace Engineering. *Aviation Materials and Technologies*. 2017;(S): 186–194. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2017-0-S-186-194>.
40. Raskutin A.E., Khrulkov A.V., Girsh R.I. Technological Features of Composite Materials Machining in Manufacturing Details of Structures (Review). *Trudy VIAM*. 2022;(9): 12. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2016-0-9-12-12>.
41. Khokhlov Yu.N., Klyushnikov M.V., Prokhorova M.A. Literature review of methods for obtaining holes in composite materials. *Politechnical Student Journal*. 2016;(1): 1. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.18698/2541-8009-2021-1-664>.
42. Demidenko E.I., Svirschev V.I. Technological Support for Defect-Free Drilling of Holes in Products Made of Polymer Composite Materials. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*. 2022;24(3): 40–48. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15593/2224-9877/2022.3.05>.
43. Dil' O., Khumpert R., Lembakh A., Sova K. *Method of making an opening in a component consisting of a composite material*. RU 2013 102 509 A (Patent) 2014. (accessed 2nd October 2024).
44. Kolganov V.I., Libert E.P., Sakhenenko V.M. *Method Of Producing Holes In Articles From Composite Materials*. SU 1599219 A1 (Patent) 1990. (accessed 2nd October 2024).

45. Fedotov D., Skvortsov K. Investigation of the Strength of Puncture Holes. *Trudy MAI*. 2018;(98): 6. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32761946> (accessed 2nd October 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
46. Komkov M.A., Kolganov A.V. Modeling of Process of Originating Holes in Composite Constructions by Method of Puncturing Non-Solidified Polymer Fibrous Material. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*. 2007;(3): 33–47. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=9597361> (accessed 2nd October 2024). (In Russ., abstract in Eng.).

Information about the authors:

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

Alexander A. Piskunov — Russian University of Transport, Moscow, Russia, e-mail: a.piskunov52@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5444-8415>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=807388

Mikhail N. Erofeev — Russian University of Transport, Moscow, Russia, e-mail: kventr@list.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1048-3574>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=836604
WoS: <https://www.webofscience.com/wos/author/rid/Q-4553-2017>
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=6701806693>

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

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>

Submitted: 14th October 2024. Revised: 26th November 2024. Published online: 27th December 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, ARCTICA