

УДК 678.8

*С.И. Мишкин¹, А.Е. Раскутин¹, А.А. Евдокимов¹, И.Н. Гуляев¹***ТЕХНОЛОГИИ И ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ СТРОИТЕЛЬСТВА
ПЕРВОГО В РОССИИ АРОЧНОГО МОСТА
ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-6-5-5

Рассмотрены технологии, которые применены при строительстве первого в России быстровозводимого арочного автомобильного моста из композиционных материалов, а также основные этапы его строительства. Мост, построенный по данной технологии в районном поселении Языково Ульяновской области, имеет длину пролета 11,98 м, выдерживает нагрузку до 100 т, долгое время не требует капитальных вложений и постоянно контролируется системой мониторинга с применением оптоволоконных датчиков деформации и температуры.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, арочный мост, плетеная углеродная преформа, строительство.

Article is devoted to consideration of technologies which have been applied at construction of the fast-erected arch automobile bridge first in Russia from composite materials, and also the main stages of its construction. The bridge constructed on this technology in the regional settlement of Yazykovo of the Ulyanovsk region, has the span length of 11,98 meters, maintains loading to 100 tons, long time does not require capital investments and is constantly supervised by monitoring system using fiber optic sensors of deformation and temperature.

Keywords: polymer composite materials, arch bridge, wicker carbon preform, construction.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

В настоящее время на территории России существует огромное количество мостов через малые реки, которые находятся в аварийном состоянии и требуют ремонта или реконструкции. Решение этой проблемы требует продуманного и взвешенного подхода, учитывая достаточно сложную экономическую ситуацию в стране: максимального сокращения издержек на производство комплектующих элементов и стоимости готового мостового сооружения при увеличении сроков полезного использования и межремонтного интервала. Для решения данной проблемы во ФГУП «ВИАМ» совместно с АО «НИИГрафит» впервые в России разработана технология строительства быстровозводимых автомобильных арочных мостов с использованием полимерных композиционных материалов (ПКМ) нового поколения на основе стеклянных и углеродных армирующих волокнистых наполнителей, позволяющая изготавливать составные элементы для строительства в непосредственной близости от строящегося моста и свести транспортно-логистические издержки практически к нулю. Кроме того, применение ПКМ нового поколения позволяет увеличить срок полезного использования мостового сооружения свыше 50 лет [1–6].

В США при изготовлении аналогичных углепластиковых арочных элементов используются преформы на основе углеродного волокна. Создаваемое в бетоне оболочкой из углепластика пространственно-напряженное состояние (так называемый эффект

«обоймы») приводит к повышению несущей способности бетонного ядра, т. е. увеличению разрушающей нагрузки без увеличения площади сечения (рис. 1) [7, 8].

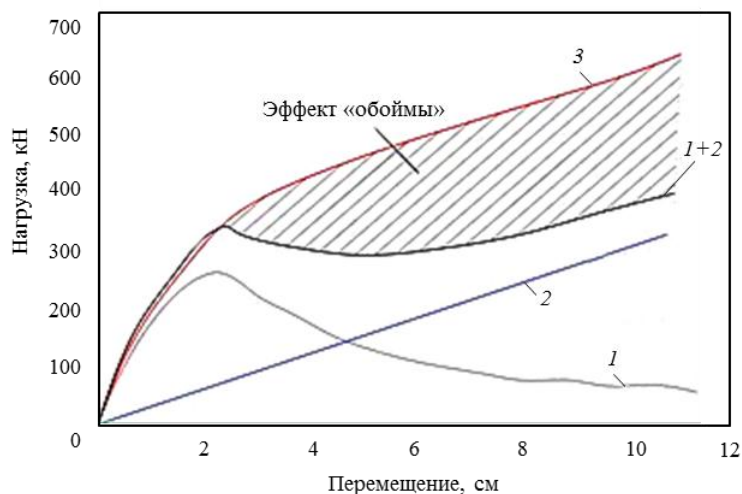


Рис. 1. Диаграмма «напряжение–деформация» для образцов из бетона (1), трубы из полимерного композиционного материала (2), трубобетона (3)

На основании изученного иностранного опыта первоочередной задачей являлась разработка новых ПКМ, применяемых для изготовления составных частей мостовых конструкций (арочных элементов и профилированного настила), достаточно прочных, чтобы выдержать статические и динамические нагрузки, и в то же время легких, чтобы строительство мостов могло выполняться без применения крупногабаритной тяжелой строительной техники [7, 8].

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 13.2. «Конструкционные ПКМ» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Материалы и методы

Технология возведения мостового сооружения подразумевает, что в производственных условиях изготавливаются полые арочные элементы из углепластика и листы стеклопластикового профнастила, которые доставляются на место строительства или организуется производственная площадка в непосредственной близости от места строительства. На заранее возведенный фундамент монтируются арочные элементы массой 30–150 кг в зависимости от пролетной длины моста, после чего они заполняются бетоном. Затем поверх арочных элементов монтируется профнастил, на который наносится слой торкретбетона и засыпается грунт, после чего укладывается дорожное покрытие. Таким образом, весь цикл строительства занимает около 3 мес.

Основную полезную нагрузку в конструкции арочного моста воспринимает арочный элемент из углепластика марки ВКУ-51, изготавливаемого методом вакуумной инфузии. Данный метод обладает неоспоримым преимуществом при изготовлении крупногабаритных деталей сложной геометрической формы при производствах мелких серий [9–11].

Отдельной важной задачей являлся подбор оптимального угла ориентации углеродного волокна в преформе относительно продольной оси арочного элемента. Предложена и реализована схема ориентации волокон под углом 40 град. При таком угле ориентации радиальные и продольные нагрузки на готовое изделие воспринимаются наиболее скомпенсировано. Дополнительным преимуществом данной укладки является максимальная «укривистость» [8, 11].

Дефекты, возникающие в деталях из ПКМ в процессе их изготовления, существенно ухудшают эксплуатационные характеристики изделий и резко снижают их надежность. Поэтому перед отправкой готовых арочных элементов на строительную площадку проводили их проверку по выявлению дефектов методом неразрушающего контроля. Используемый импедансный метод контроля позволяет выявлять дефекты разного вида, в том числе в виде трещин и расслоений, ориентированных перпендикулярно поверхности арочного элемента. Это дает возможность контролировать качество арочных элементов на этапе изготовления.

Арочные элементы быстровозводимого моста сверху накрывали профилированным настилом из стеклопластикового композиционного материала марки ВПС-58, который, также как и арочные элементы, изготавливается методом вакуумной инфузии.

Результаты

В соответствии с проектной документацией «На автомобильный арочный мост с арочными элементами постоянного круглого сечения из ПКМ с бетонным сердечником и профилированным настилом, с двумя полосами движения и пешеходными тротуарами» был построен пилотный объект – двухполосный быстровозводимый мост с использованием в качестве надземных частей опор арочных элементов и профилированного настила из композиционных материалов нового поколения по адресу: Ульяновская область, районное поселение Языково – в месте пересечения с ручьем Соловей. Для строительства пилотного мостового сооружения было необходимо 19 арочных элементов длиной 11,98 м и стрелой подъема 1,62 м с радиусом по огибающей поверхности 11 м, а также 32 листа профилированного настила габаритом 3000×1500 мм и толщиной 4 мм. При этом на 3 арочных элемента были интегрированы по 6 оптоволоконных датчиков деформации и 1 оптоволоконный датчик температуры.

Организацию строительного процесса осуществляли в соответствии с ТР 00200851-001–2014 «Технологический регламент на возведение быстровозводимых мостовых сооружений».

Демонтаж старого моста (рис. 2) начался в сентябре и выполнялся при помощи самоходного гидравлического экскаватора.



Рис. 2. Вид старого моста перед началом строительства

Перед работами по устройству фундамента провели подготовительные работы по планировке территории. Конструкция фундамента представляет собой два ряда

забивных свай длиной 12 м сечением 35×35 см. В соответствии с проектной документацией забивку свай производили под углом 10–15 град на глубину 10 м (рис. 3). При этом использовался дизельный молот, установленный на мачте самоходной копровой установки.



Рис. 3. Конструкция фундамента будущего арочного моста

Для объединения свай с ростверком производили срезку их оголовков. Работы по срезке оголовков и последующие работы по устройству ростверков осуществляли под защитой шпунтового ограждения, для которого использовали стальные профили шпунта Ларсена (Л-IV). Конструкция шпунтового ограждения представляла собой незамкнутую трапецию. Погружения шпунта осуществляли при помощи той же копровой установки, что и для погружения свай. Для предотвращения поступления воды со дна котлована, огороженного шпунтовым ограждением, устраивался бетонный тампонажный слой.

Устройство ростверка осуществляли в два яруса в несколько этапов. На первом этапе производили изготовление арматурного каркаса обоих ярусов с обвязкой арматурного каркаса железобетонных свай. Затем производили бетонирование первого яруса ростверка.

Для предотвращения повреждения несущих арочных конструкций от возможных последствий ледохода и корчехода, в мосту предусмотрена нижняя защитная оболочка. Для обеспечения возможности обвязки арматурного каркаса защитной оболочки и передвижения вдоль арочных элементов изготовили деревянные кружала. Кружала проектировали и рассчитали так, чтобы полностью воспринять нагрузку от бетонного заполнения арочных элементов до момента набора прочности бетона и исключения возможности повреждения углепластиковой оболочки. Поверх кружал из специализированной влагостойкой фанеры смонтировали съемную опалубку для последующей обвязки арматурного каркаса защитной оболочки с формированием ложа под арочные элементы (рис. 4).



Рис. 4. Арматурный каркас нижней защитной оболочки арочных элементов

Далее вручную производили установку арочных элементов, в том числе и с оптоволоконными сенсорными элементами в соответствии со схемой, представленной на рис. 5. Бетонирование второго яруса ростверка осуществляли после монтажа всех арочных элементов. При защите мест контакта «металл–углепластик» использовали антикоррозионную пасту марки ВП-1, а также систему на основе грунтовок ЭП-076 и эмали ЭП-140, разработанных во ФГУП «ВИАМ».

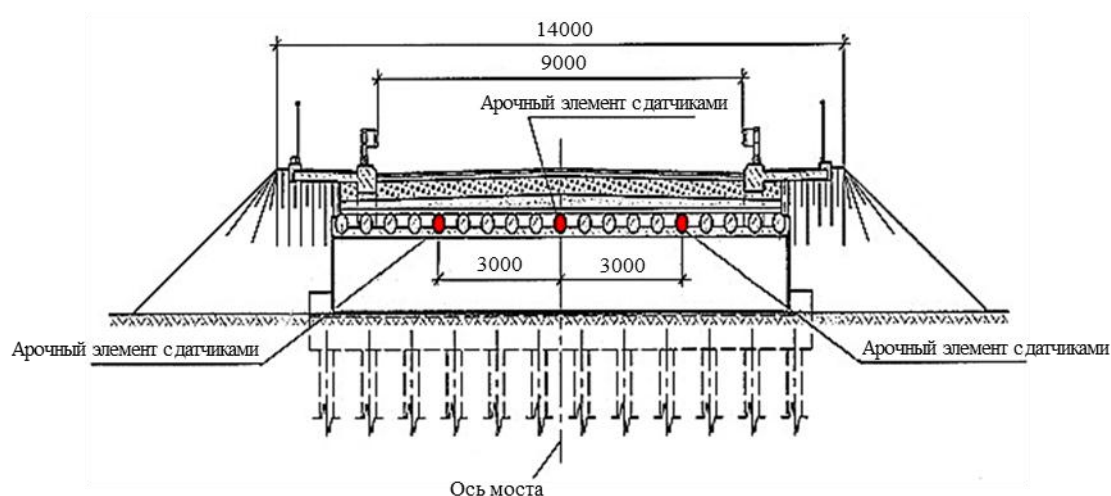


Рис. 5. Схема расположения арочных элементов в мосту

После набора прочности бетона второго яруса ростверка произведены подготовительные работы по бетонированию арочных элементов, включающие изготовление технологических отверстий $\varnothing 150$ мм в центре каждого арочного пролета (рис. 6). Бетонирование арочных элементов осуществляли через сделанные отверстия безусадочным бетоном с показателем подвижности П5 с помощью автобетононасоса. Полноту заполнения арочных элементов бетоном контролировали по отверстиям $\varnothing 5$ мм, сделанным в арке по всей длине через 1 м. Производили также диагностику арочных элементов на наличие внутренних полостей на границе «ПКМ–бетон» с помощью импедансного метода неразрушающего контроля.



Рис. 6. Подготовительные работы перед бетонированием арочных элементов

В период набора прочности бетонного ядра арочных элементов проводили работы по изготовлению арматурного каркаса и бетонированию плиты проезжей части и защитной оболочки. Плита проезжей части расположена в центральной части моста и имеет ширину 5 м, длину – на всю ширину дорожного полотна. Она необходима для уменьшения толщины слоя насыпного грунта, чтобы равномерно распределить нагрузку от автотранспорта на все арочные элементы и избежать поднятия уровня дороги.

После бетонирования плиты и защитной оболочки, в пазухи между арочными элементами засыпали керамзитовый щебень, а поверх смонтировали стеклопластиковый профилированный настил. Настил позволяет равномерно распределить нагрузку на арочные элементы. Далее произвели монтаж порталных стенок из стеклопластикового профилированного настила, воспринимающего распорные нагрузки, передаваемые на грунт от дорожного полотна, и играющего роль внешней опалубки и гидроизоляции.

Дополнительным условием к эксплуатации мостового сооружения является обеспечение защиты открытых наружных порталных стенок от пожара и воспламенения. Для этого использовали огнезащитное покрытие вспенивающегося типа марки ВЗО-9х, разработанное во ФГУП «ВИАМ», так как оно полностью отвечает комплексу требований FAR-25 (АП-25), являясь трудносгораемым и самозатухающим, имея минимальное тепло- и дымовыделение, высокий коэффициент вспенивания. Покрытие наносили на стеклопластиковый настил, используемый для порталных стенок моста, с помощью распыления.

Поверх огнезащитного покрытия для дополнительной защиты профилированного настила от воздействия атмосферных факторов наносили фторполиуретановую эмаль марки ВЭ-69, разработанную во ФГУП «ВИАМ». Данная эмаль обладает высокой адгезией, эластичностью и низким влагопропусканием.

По окончании устройства порталных стенок после набора прочности бетона в арках, произвели засыпку пространства над арками привозным песчаным грунтом и песчано-гравийной смесью с послойным уплотнением до коэффициента уплотнения 0,95. После этого провели работы по благоустройству моста, включающие асфальтирование тротуаров и проезжей части в два слоя, укрепление конуса берегов и монтаж защитного ограждения (рис. 7).



Рис. 7. Готовый арочный мост

После завершения работ по благоустройству мостового сооружения проведена установка, подключение и настройка системы мониторинга арочных элементов и детектора транспортного потока.

Контроль за возникновением деформаций в конструкциях чаще всего осуществляется с помощью визуальных методов, сигнальных меток или различных тензорезисторных устройств. Строящиеся, а также большая часть уже имеющихся построек (особенно объекты повышенной опасности) в настоящее время требуют нового подхода к безопасности, которая не может быть осуществлена за счет периодического осмотра и установки геодезических маяков. Для прогнозирования возможных разрушений на ранней стадии, особенно при возникновении форс-мажорных ситуаций, требуется непрерывный мониторинг всей инженерной конструкции. Такую систему разработали во ФГУП «ВИАМ».

Оптоволоконная система мониторинга арочных элементов моста состоит из сети соединенных между собой оптоволоконных датчиков деформации и температуры, а также устройства их опроса.

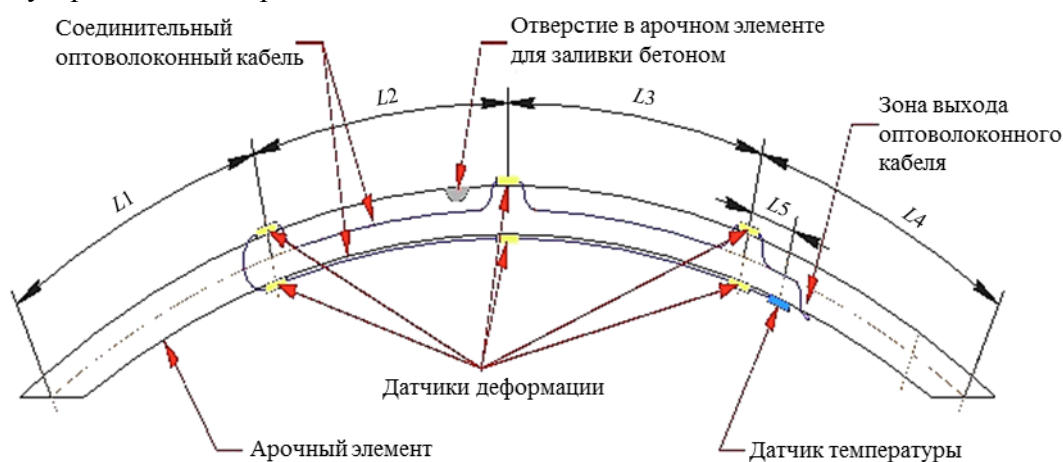


Рис. 8. Схема расположения датчиков на арочном элементе

На основании теоретических данных о распределении деформаций и нагрузок в арочном элементе, разработана схема расположения оптоволоконных датчиков деформации (рис. 8). Датчики деформации располагаются симметрично вдоль верхней и нижней осей арочного элемента, причем значения длин дуг $L1$, $L2$, $L3$ и $L4$ определяются размерами арочного элемента при условии, что длины дуг равны: $L1=L2=L3=L4$.

Поскольку показания оптоволоконных датчиков деформации зависят от температуры, для корректного измерения деформации на арочном элементе установлен дополнительный свободный от механических воздействий термокомпенсирующий оптоволоконный датчик температуры.

Датчики изготавливают из оптического волокна с записанной волоконной брэгговской решеткой (ВБР) и стеклопластика на основе клеевого препрега КМКС 2м.120.Т10.37. В качестве клеевого состава для склеивания частей корпусов датчиков, а также наклеивания датчиков на арочный элемент использовали клей ВК-58.

Принцип действия дорожного детектора на мосту основан на изменении сигналов оптического волокна с ВБР при воздействии на нее деформаций. К преимуществам применения ВБР в качестве сенсорных элементов в дорожном детекторе следует отнести их нечувствительность к электромагнитным воздействиям, коррозии, имеющуюся возможность объединения датчиков в единую сеть и расположение опросного устройства на значительном расстоянии от объекта.

Оптическое волокно с линейкой ВБР интегрировали в углепластик и помещали в защитный прочный герметичный корпус из нержавеющей стали, который закрепляли непосредственно на дорожное полотно, что обеспечивало равномерное распределение нагрузки на сенсорные элементы.

Поскольку ВБР реагирует на изменение температуры окружающей среды, использовали дополнительный термокомпенсирующий датчик температуры. Он выполнен в виде фрагмента используемого в детекторе оптического волокна с ВБР, защищенного от механических воздействий и расположенного в корпусе дорожного детектора.

Установленный на мост дорожный детектор полностью соответствует требованиям, предъявляемым к эксплуатации автомобильных дорог: высота – не более 15 мм, ширина (в направлении движения транспортных средств) – не более 600 мм. Он состоит из двух групп секций по 9 элементов в каждой, которые устанавливаются с помощью анкерных болтов на асфальтированную проезжую часть. Первая группа секций, соединенная в линию поперек проезжей части, установлена на расстоянии 4 м от края фундамента арочных элементов, а вторая – на расстоянии 0,2 м от края первой группы секций. Зная расстояние между линиями детекторов, можно определять скорость автомобилей. Оптоволоконный кабель, выходящий от периферийной секции каждой группы детектора, соединяется с подводящим кабелем, который проложен в траншее в гофрошланге и соединен с оптическим кроссом [12].

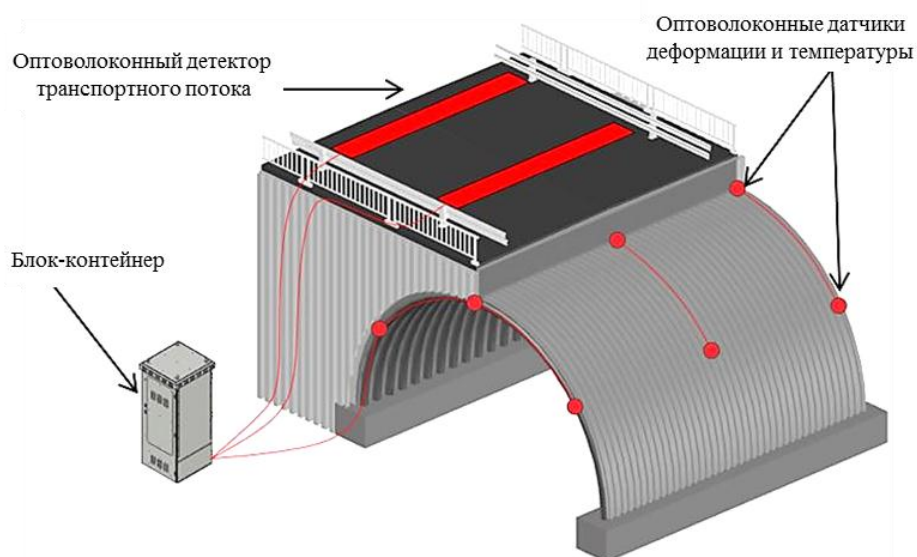


Рис. 9. Схема системы мониторинга арочного моста

Оборудование системы мониторинга, включающее оптический кросс, анализатор волоконно-оптических сигналов, сервер, консоль, источник бесперебойного питания, установлено в блок-контейнер и подключено между собой для анализа поступающей информации от датчиков и детектора транспортного потока. При этом каждое входящее оптоволокно вначале подключено в оптический кросс для возможности упрощения диагностики каждого элемента (арочный элемент или одна из двух групп детектора) и далее к анализатору сигналов (рис. 9) [13–15].

Для анализа сигналов от оптоволоконных датчиков деформации и температуры и детектора транспортного потока, во ФГУП «ВИАМ» разработано программное обеспечение, которое установлено на сервер. После подключения оборудования и его соединения с оптоволоконными датчиками деформации и температуры и детектором транспортного потока проведена их настройка и последующее включение для непрерывной работы системы мониторинга моста.

Обсуждение и заключения

Во ФГУП «ВИАМ» совместно с АО «НИИГрафит» проведена большая работа по разработке материалов и технологий для производства быстровозводимых арочных мостов из композиционных материалов. Первый в России мост построен по данной технологии за 3,5 мес в районном поселении Языково Ульяновской области. Мост может выдерживать нагрузку до 100 т, долгое время не требует капитальных вложений и постоянно контролируется системой мониторинга, при этом цена мостового сооружения практически не отличается от мостов, построенных по традиционным технологиям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н. *Материалы нового поколения // Защита и безопасность*. 2014. №4. С. 28–29.
3. Каблов Е.Н. *Современные материалы – основа инновационной модернизации России // Металлы Евразии*. 2012. №3. С. 10–15.
4. Каблов Е.Н. *Тенденции и ориентиры инновационного развития России: сб. науч.-информ. материалов*. 3-е изд. М.: ВИАМ, 2015. 720 с.
5. Каблов Е.Н. *России нужны материалы нового поколения // Редкие земли*. 2014. №3. С. 8–13.
6. Каблов Е.Н. *Конструкционные и функциональные материалы – основа экономического и научно-технического развития России // Вопросы материаловедения*. 2006. №1. С. 64–67.
7. Власенко Ф.С., Раскутин А.Е. *Применение полимерных композиционных материалов в строительных конструкциях // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2013. №8. Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 24.03.2017).
8. Власенко Ф.С., Раскутин А.Е., Донецкий К.И. *Применение плетеных преформ для полимерных композиционных материалов в гражданских отраслях промышленности (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2015. №1. Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 24.03.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-1-5-5.
9. Вешкин Е.А., Постнов В.И., Абрамов П.А. *Пути повышения качества деталей из ПКМ при вакуумном формовании // Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2012. Т. 14. №4 (3). С. 831–838.
10. Афанасьев Д.В., Ощепков М.Ю. *Безавтоклавные технологии // Композитный мир*. 2010. С. 28–37.
11. Донецкий К.И., Караваев Р.Ю., Раскутин А.Е., Панина Н.Н. *Свойства угле- и стеклопластиков на основе плетеных преформ // Авиационные материалы и технологии*. 2016. №4 (45). С. 54–59. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-4-54-59.

-
12. Дышенко В.С., Раскутин А.Е., Зуев М.А. Дорожный детектор в системах безостановочного автоматического взвешивания // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №5. Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 24.03.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-5-12-12.
 13. Каблов Е.Н., Сиваков Д.В., Гуляев И.Н., Сорокин К.В., Федотов М.Ю., Гончаров В.А. Методы исследования конструкционных композиционных материалов с интегрированной электромеханической системой // Авиационные материалы и технологии. 2010. №4. С. 17–20.
 14. Гуляев И.Н., Гуняев Г.М., Раскутин А.Е. Полимерные композиционные материалы с функциями адаптации и диагностики состояния // Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 242–253.
 15. Гуляев И.Н., Гуняев Г.М. Использование непрерывных армирующих волокон в качестве тензорезисторных сенсорных элементов // Авиационные материалы и технологии. 2010. №2. С. 22–27.