

УДК 620.179:678.8

*А.Е. Раскутин¹, В.В. Махсидов¹, О.И. Смирнов¹, Л.А. Кашарина¹***МОНИТОРИНГ НАГРУЖЕННОСТИ
КОМПОЗИТНОЙ КОНСТРУКЦИИ АРОЧНОГО МОСТА
НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-3-49-59

Приведено описание разработанной оптоволоконной системы мониторинга нагрузки конструкции (арочных элементов моста), работающей в реальном масштабе времени и предупреждающей о приближении к критическому уровню нагружения. Рассмотрены критерии работоспособности конструкции пилотного объекта – двухполосного автомобильного арочного моста, в свою очередь выбор основного критерия проведен на основе принципа оценки работоспособности конструкции с учетом возможностей используемого оборудования. Показано, что относительная осевая деформация арочных элементов практически не изменялась за период наблюдения.

Ключевые слова: мониторинг конструкций, полимерные композиционные материалы, оптоволоконная брэгговская решетка, нагруженность арочных элементов, деформация.

*A.E. Raskutin¹, V.V. Makhsidov¹, O.I. Smirnov¹, L.A. Kasharina¹***MONITORING OF THE DEFORMABILITY
OF THE COMPOSITE STRUCTURE OF THE ARCH BRIDGE
BASED ON FIBER-OPTIC SENSORS**

A description is given of the developed fiber-optic system for monitoring structural loading (arch-bridge elements) operating in real time and warning of approaching the critical level of loading. The criteria for working capacity of the design of the a two-lane automobile arched bridge. The choice of the main criterion was made on the basis of the principle of assessing the structural stability of the structure taking into account the capabilities of the equipment used. It is shown that the relative axial deformation of the arched elements practically did not change over the period of observation.

Keywords: monitoring of structures, polymeric composite materials, fiber-optic Bragg grating, loading of arched elements, deformation.

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

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) в сравнении с традиционными конструкционными материалами (сталь, алюминиевые и титановые сплавы и т. п.) обладают низкой плотностью, высокой прочностью, коррозионной стойкостью и долговечностью. По этой причине растет объем применения ПКМ в различных отраслях промышленности (в авиастроении, строительстве и др.) [1–3]. Несмотря на очевидные преимущества ПКМ, существует ряд факторов, которые ограничивают их широкое применение в изделиях, эксплуатирующихся длительное время – например, в авиационной технике и строительных объектах. В силу своей природы и особенностей

технологии производства ПКМ в сравнении с алюминиевыми сплавами или сталями не могут накапливать повреждения, обладают гораздо бóльшим разбросом значений свойств, способностью поглощать влагу из окружающей среды и под воздействием механической нагрузки разрушаются практически мгновенно [4–6].

Контроль за возникновением деформаций в строительных конструкциях в настоящее время осуществляется с помощью визуальных методов, сигнальных меток или различных тензорезисторных устройств. Строящиеся, а также бóльшая часть уже имеющихся построек, особенно объекты повышенной опасности, в настоящее время требуют нового подхода к безопасности, которая не может быть осуществлена путем периодического осмотра и с помощью установки геодезических маяков. Для прогнозирования возможных разрушений на ранней стадии, особенно при возникновении форс-мажорных ситуаций, требуется непрерывный мониторинг всей инженерной конструкции.

Перспективным с точки зрения встроенного контроля материала конструкции являются оптические волоконные датчики на основе брэгговской решетки [7, 8]. Волоконные брэгговские решетки (ВБР) в сравнении с традиционно применяемыми тензодатчиками более компактны, не подвержены электромагнитным помехам и могут интегрироваться в единое оптоволокно [9, 10]. В настоящее время также интенсивно разрабатываются материалы для высокотемпературной волоконной оптики [11, 12]. Вместе с тем оптоволокно достаточно легко интегрируется в ПКМ (например, в угле-, стекло-, органопластики и т. п.) в процессе изготовления элемента конструкции, поэтому внедрение такой системы мониторинга мостового сооружения (арочного моста) является актуальным и перспективным для решения вопросов наблюдения и контроля состояния слабо- и сильнонагруженных конструкций. Система мониторинга на основе таких оптоволоконных оптических датчиков позволит:

- оценивать состояние несущих элементов конструкции моста с точки зрения нагруженности в реальном масштабе времени;
- уменьшить количество внеплановых осмотров моста;
- осуществлять непрерывный мониторинг напряженно-деформированного состояния арочных конструкций из ПКМ в составе мостового сооружения, а также контроль и анализ транспортного потока.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 4.1. «Интеллектуальные ПКМ II и III поколений» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Материалы и методы

Состав системы мониторинга арочных элементов из ПКМ пилотного объекта

Оптоволоконная система мониторинга двухполосного автомобильного арочного моста включает следующие элементы (рис. 1):

1. Оптоволоконные датчики деформации и температуры, интегрируемые в арочные элементы из ПКМ.
2. Блок-контейнер для размещения измерительного оборудования, подводимые оптоволоконные кабели.
3. Комплект измерительного оборудования для сбора информации от оптоволоконных датчиков, включающий анализатор сигналов волоконно-оптических датчиков ASTRO A317 (ООО «Инверсия-Сенсор», Россия), сервер, оптический кросс, источник бесперебойного питания и программное обеспечение.

В соответствии с разработанной оптоволоконной системой мониторинга двухполосного автомобильного арочного моста объектом контроля являются арочные элементы из углепластика марки ВКУ-51И, заполненные бетоном.

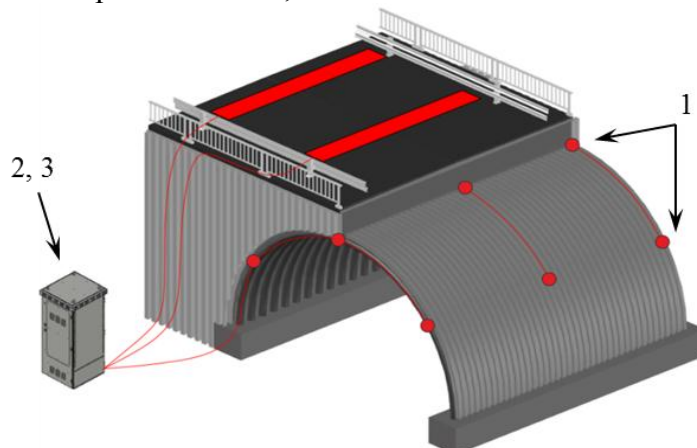


Рис. 1. Состав оптоволоконной системы мониторинга двухполосного автомобильного арочного моста

Оптоволоконная система мониторинга предназначена для оценки нагруженности арочных элементов в реальном масштабе времени и предупреждает о приближении к критическому уровню нагружения. Система мониторинга отслеживает деформацию ПКМ, оценивает состояние материала и конструкции, отображает текущие значения деформации и в случае приближения к критическому уровню нагруженности арочных элементов подает сигнал об этом на экран монитора, а также записывает текущие значения датчиков и результаты анализа нагруженности в файл. Установленная система мониторинга отслеживает состояние трех арочных элементов, располагающихся на периферии и в центре моста. В каждый арочный элемент интегрировано по 6 оптоволоконных датчиков деформации.

Диапазон измерения относительных деформаций оптоволоконных датчиков деформации из стеклопластика на основе ВБР – от -4500 до $+4500$ мкм/м (от $-0,45$ до $+0,45\%$). Рабочий температурный диапазон датчиков деформации и температуры – от -40 до $+40^\circ\text{C}$. Рабочий температурный диапазон датчиков температуры – от -50 до $+80^\circ\text{C}$. Частота опроса оптоволоконных датчиков составляет не менее 500 Гц.

На основе ранее разработанной документации в ВЭТЦ ФГУП «ВИАМ» инфузионным методом изготовлены три полые заготовки арочных элементов из углепластика ВКУ-51И с интегрированными оптоволоконными сенсорными элементами на основе ВБР. На рис. 2 показан оптоволоконный датчик деформации на основе ВБР в корпусе из стеклопластика, интегрированный на поверхность оболочки арочного элемента, до нанесения защитного полисульфидного покрытия ВИТЭФ-Инт.

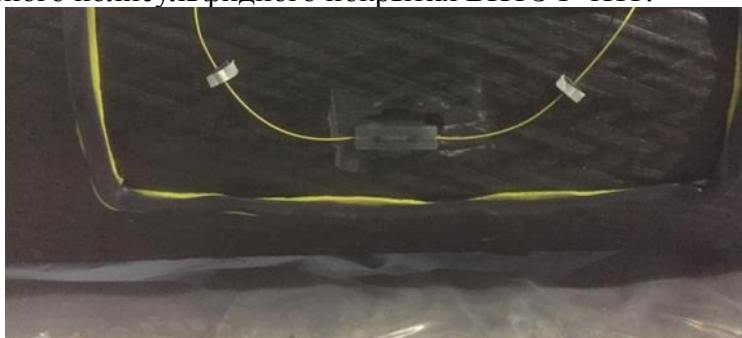


Рис. 2. Оптоволоконный датчик деформации на основе волоконной брэгговской решетки в корпусе из стеклопластика, приклеенный на поверхность оболочки арочного элемента

Оптоволоконные датчики деформации размещаются на поверхности оболочки арочного элемента из углепластика на $1/4$ (сечения 2–2 и 2'–2') и $1/2$ (сечение 3–3) длины его проекции на ось X в верхней и нижней точках сечения. На основе ранее разработанной проектной документации контроль арочных элементов в конструкции моста осуществляется в соответствии со схемой, приведенной на рис. 3.

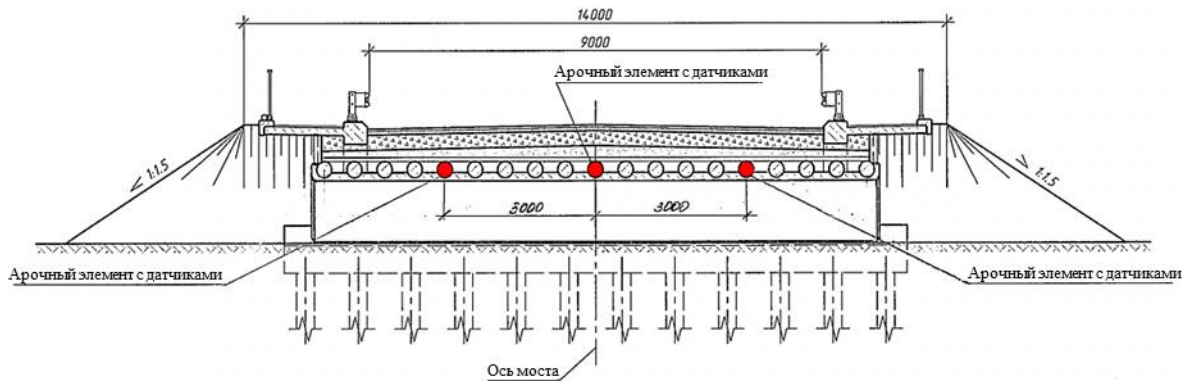


Рис. 3. Расположение арочных элементов с интегрированными оптоволоконными датчиками в конструкции двухполосного автомобильного арочного моста

По техническому заданию ФГУП «ВИАМ» в АО «НИИГрафит» разработана проектная документация и в 2016 г. возведен пилотный объект – двухполосный автомобильный арочный мост через ручей Соловей в пос. Языково Карсунского района Ульяновской области. Данный мост рассчитан на нагрузку 100 т.

Выбор критерия работоспособности конструкции пилотного объекта

Выбор критерия работоспособности конструкции двухполосного автомобильного арочного моста произведен исходя из возможного принципа оценки работоспособности конструкции с учетом возможностей используемого оборудования.

Одним из возможных принципов оценки работоспособности конструкции является определение ее нагруженности путем измерения ее деформации. В этом случае считается, что при нагрузках, не превышающих критическое значение, соответствующее разрушению, конструкция сохраняет работоспособность. В данной системе мониторинга был принят указанный принцип. При этом определение нагруженности конструкции непрерывно проводится путем измерения ее деформации в определенном сечении. Необходимо отметить, что данный принцип оценки работоспособности будет справедлив для тех материалов и конструкций, которые не чувствительны (или имеют незначительную чувствительность) к циклическим нагрузкам, т. е. не накапливают повреждений в процессе нагружения.

В процессе проектирования двухполосного автомобильного арочного моста на расчетную нагрузку 100 т были определены расчетные нагрузки и деформации несущих элементов конструкции – арочных элементов из бетона, армированных углепластиком марки ВКУ-51И. Расчетные осевые деформации на внешней поверхности оболочки арочного элемента из углепластика на $1/2$ и $1/4$ длины проекции арочного элемента на ось X в верхней и нижней точках сечения представлены в таблице. При этом расчетная схема нагружения соответствовала расположению четырехосного транспортного средства массой 100 т по центру проезжей части моста.

**Расчетные осевые деформации на внешней поверхности оболочки
арочного элемента из углепластика ВКУ-51И**

Положение в сечении арочного элемента	Относительная осевая деформация на поверхности углепластика арочного элемента, %, на длине проекции на ось X	
	1/4	1/2
С 10%-ным запасом		
Верхняя точка сечения	-0,368	-0,367
Нижняя точка сечения	0,334	0,309
Расчетные значения при нагрузке на мост 100 т		
Верхняя точка сечения	-0,3312	-0,3303
Нижняя точка сечения	0,3006	0,2781

Проведенные ранее испытания конструктивно-подобных образцов (КПО) арочных элементов разрушились при разрушающей нагрузке (24,5–31,2 т) и прогибе (16,0–52,3 мм), характерном для такого вида конструкций и технологии их изготовления.

Тензометрия КПО арочных элементов в процессе их нагружения показала, что в сечении 3–3 (вершина арки) имеется немонотонная зависимость изменения деформации с ростом нагрузки как в верхней точке сечения арочного элемента, так и в нижней. Максимальная деформация в верхней точке сечения 3–3 составила 250 мкм/м (0,025%), в нижней точке 1200 мкм/м (0,12%); минимальная деформация в верхней точке -1300 мкм/м (-0,13%), в нижней точке 140 мкм/м (0,014%).

В сечении 2–2 (на 1/4 длины проекции КПО арочного элемента) тензометрия показала наличие монотонной зависимости изменения деформации с ростом нагрузки как в верхней точке сечения арочного элемента, так и в нижней. Максимальная деформация в верхней точке сечения 2–2 составила 4200 мкм/м (0,42%), в нижней точке -1000 мкм/м (-0,1%); минимальная деформация в верхней точке 1800 мкм/м (0,18%), в нижней точке -2700 мкм/м (-0,27%).

Использование полученных данных тензометрии при испытании КПО арочных элементов для оценки работоспособности конструкции затруднительно, так как расчетные и экспериментальные схемы нагружения арок различаются. По этой причине для оценки работоспособности конструкции целесообразно ориентироваться на расчетные значения деформации.

В результате проведенного анализа расчетных и экспериментальных максимальных и минимальных осевых деформаций за критерий предельного состояния конструкции моста принято расчетное значение деформации -0,3312% в сечении 2–2 по верхней точке сечения (см. таблицу). Отметим, что разрушение углепластиков ВКУ-51 и ВКУ-51И при растяжении происходит в диапазоне относительной деформации 1,0–1,2% и несколько меньшей – при сжатии.

Оценку работоспособности пилотного объекта осуществляли по определению нагруженности арочных элементов и сравнению с расчетной относительной осевой деформацией ($\varepsilon_p = -0,3312\%$) и с предельно допустимой относительной деформацией, соответствующей разрушению углепластика ВКУ-51И (1,0%). При этом исходя из запаса по нагрузке (деформации) будет рассчитываться нагруженность (Н) контролируемых арочных элементов по следующей формуле (для оценки состояния конструкции принимается максимальное значение по трем арочным элементам) [13–16]:

$$N = \left(1 - \frac{|\varepsilon_p| - |\varepsilon_{\text{тек}}|}{|\varepsilon_p|} \right) \cdot 100\%, \quad (1)$$

где $\varepsilon_{\text{тек}}$ – текущая деформация, измеряемая датчиком деформации.

Текущая деформация рассчитывается по формуле:

$$\varepsilon_{\text{тек}} = \frac{\beta}{K_{\varepsilon}} \cdot \left(\frac{\Delta\lambda_{\varepsilon}}{\lambda_0^{\varepsilon}} \right) - \frac{\beta \cdot \Delta\lambda_T^T}{K_T^T \cdot \lambda_0^T} \cdot \alpha_L, \quad (2)$$

где K_{ε} – коэффициент чувствительности оптоволоконного датчика деформации, равный 0,86; K_T^T – коэффициент чувствительности термокомпенсирующего оптоволоконного датчика, равный 10,32; β – коэффициент пересчета размерности, равный 100; λ_0^{ε} – начальная брэгговская длина волны оптоволоконного датчика деформации, нм; λ_0^T – начальная брэгговская длина волны термокомпенсирующего оптоволоконного датчика температуры, нм; $\Delta\lambda_{\varepsilon}$ – изменение брэгговской длины волны оптоволоконного датчика, вызванное деформацией, нм ($\Delta\lambda_{\varepsilon} = \lambda_{\text{тек}} - \lambda_{\text{исх}}$); $\Delta\lambda_T^T$ – изменение брэгговской длины волны оптоволоконного датчика, вызванное температурой, нм ($\Delta\lambda_T^T = \lambda_{\text{тек}} - \lambda_{\text{исх}}$); α_L – температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) материала контролируемой конструкции, равный 0,0000034 1/°C.

Определение температуры проводили по формуле:

$$T = T_0 + \frac{\beta^T \cdot \Delta\lambda_T^T}{K_T^T \cdot \lambda_0^T} \cdot \alpha_L, \quad (3)$$

где K_T^T – коэффициент чувствительности термокомпенсирующего оптоволоконного датчика; β^T – коэффициент пересчета размерности, равный 10^6 ; λ_0^T – начальная брэгговская длина волны термокомпенсирующего оптоволоконного датчика температуры, нм; $\Delta\lambda_T^T$ – изменение брэгговской длины волны оптоволоконного датчика, вызванное температурой, нм; α_L – ТКЛР материала контролируемой конструкции, равный 0,0000034 1/°C; T_0 – температура, соответствующая изготовлению датчика, равная 20°C.

Результат

Разработка программного обеспечения системы мониторинга арочных элементов из ПКМ пилотного объекта

С учетом разработанного состава и выбранных критериев оценки состояния конструкции разработано программное обеспечение «АркаПКМ-Контроль» для оптоволоконной системы мониторинга двухполосного автомобильного арочного моста, предназначенное для оценки нагруженности арочных элементов в реальном масштабе времени и предупреждения о приближении к критическому уровню нагружения. Программное обеспечение написано на языке C++ и предназначено для работы в операционной системе MS Windows 7 и выше; размер программного обеспечения 100 кБ. Минимальные системные требования для работы программного обеспечения: тип ЭВМ – Intel(R) Xeon(R), CPU E3-1220v3 @ 3,1 ГГц, 4 Тб RAM. На рис. 4 показано главное окно разработанного программного обеспечения.

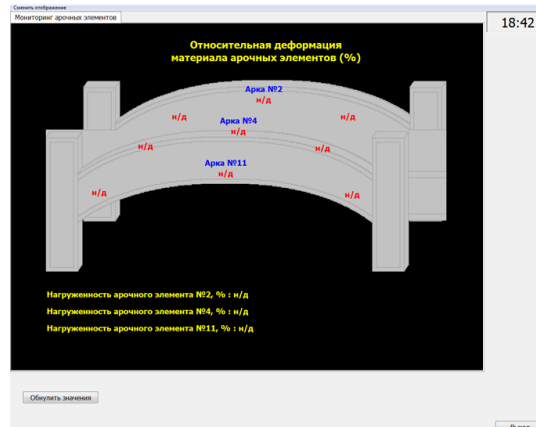


Рис. 4. Главное окно разработанного программного обеспечения «АркаПКМ-Контроль»

Система мониторинга отслеживает нагруженность арочных элементов, деформацию ПКМ, оценивает состояние материала и конструкции, отображает их текущие значения и в случае приближения к критическому уровню нагруженности арочных элементов подает сигнал об этом на экран монитора, а также записывает в файл текущие значения датчиков и результаты анализа нагруженности.

Непрерывный мониторинг арочных элементов из ПКМ пилотного объекта и оценка их работоспособности

По завершении возведения двухполосного автомобильного арочного моста в пос. Языково Ульяновской области и установки оптоволоконной системы мониторинга арочных элементов данная система с июня 2017 г. была запущена эксплуатацию в тестовом режиме.

Мониторинг деформации арочных элементов из ПКМ осуществляли путем подключения измерительного оборудования к датчикам и записи их показаний, на основе которых проводили анализ данных, поступающих от системы мониторинга арочных элементов из ПКМ, пилотного объекта.

По окончании возведения двухполосного автомобильного арочного моста и его благоустройства (в том числе после укладки асфальта на дорожное покрытие) проводили замер показаний оптоволоконных датчиков деформации – таким образом сформирован «нулевой уровень» состояния арочных элементов моста. При сравнении показаний оптоволоконных датчиков, на момент изготовления арочных оболочек и в возведенном мосту, следует, что установленные арки незначительно деформированы, что связано с монтажными напряжениями в результате их установки в конструкцию (рис. 5). При этом практически во всех контролируемых точках арочного элемента имеются незначительные сжимающие деформации. Указанные деформации не превышают расчетных (0,3312%) и критических (1,0%) значений.

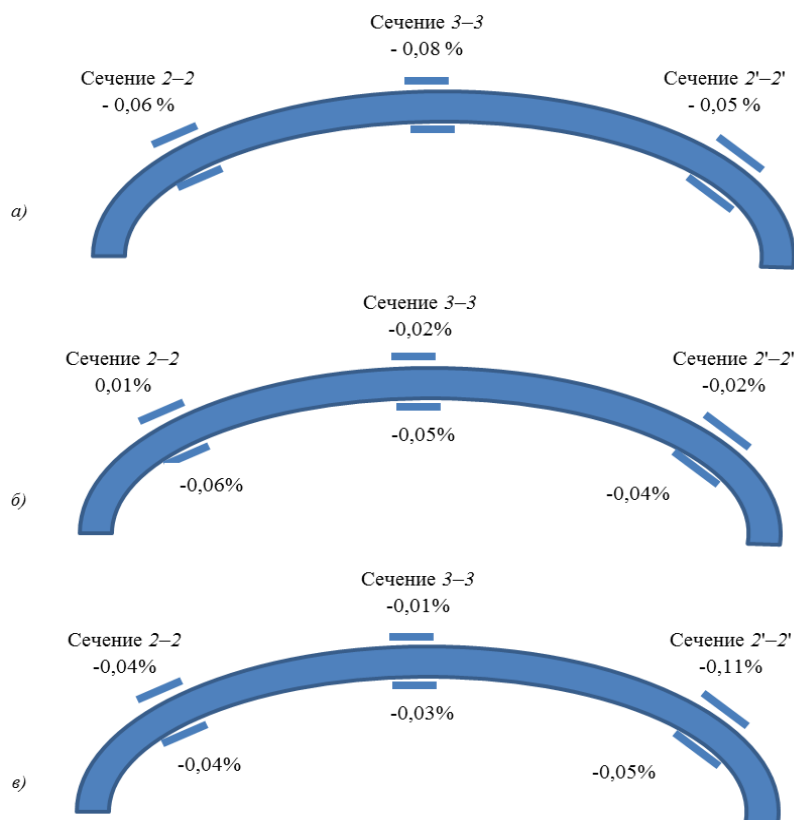


Рис. 5. Относительная осевая (монтажная) деформация углепластика ВКУ-51И после возведения двухполосного автомобильного арочного моста:

а – арка №2; б – арка №4; в – арка №11

Следует отметить, что последующий мониторинг осуществляли относительно «нулевого уровня» показаний оптоволоконных датчиков деформации.

Исследование влияния нагрузки от легковых транспортных средств («Лада-Приора», «Газель» и т. п.) массой до 3,5 т на деформацию арочных элементов показало нечувствительность к таким небольшим воздействиям. При проезде по центру моста катка массой 11 т максимальное изменение относительной деформации составило 0,07%.

Транспортный поток через возведенный мост (в обе стороны) в дневное время за период наблюдения составляет приблизительно 3–6 легковых машин в час и одна грузовая машина в час.

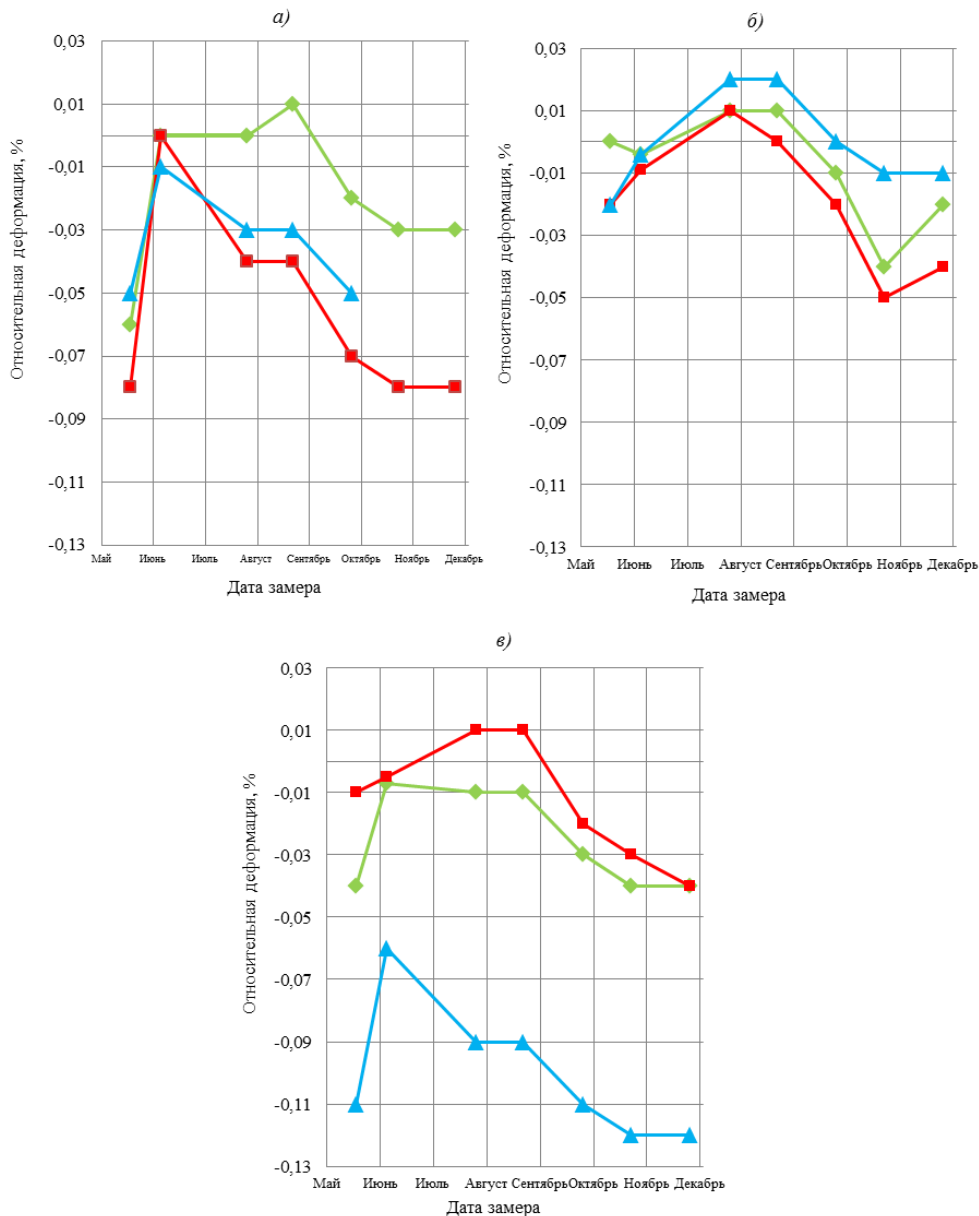


Рис. 6. Относительная осевая деформация углепластика ВКУ-51И в сечениях 2–2 (◆), 2′–2′ (▲) и 3–3 (■) в зависимости от даты замера:
 а – арка №2; б – арка №4; в – арка №11

На рис. 6 приведены результаты мониторинга арочных элементов за период с июня по ноябрь 2017 г. Как следует из полученных данных, в теплые месяцы года (июнь–сентябрь) сжимающая относительная осевая деформация арочных элементов

уменьшается практически до нуля или незначительно переходит к растягивающей, а с понижением температуры окружающей среды относительная осевая деформация арочных элементов снова переходит через ноль и увеличивается (по модулю). Максимально такое колебание составило 0,08% для сечения 3–3 арки №2; для сечения 2–2 для арки №2 изменение относительной осевой деформации составило до 0,07%, для арки №4 – до 0,04%, для арки №11 – до 0,06%. С июня по ноябрь относительная осевая деформация арочных элементов практически не изменялась. С учетом небольших значений измеряемой относительной деформации полученная зависимость предположительно связана с термическими деформациями конструкции, зависящими от понижения температуры воздуха в октябре–ноябре. Указанные деформации не превышают расчетные и критические значения.

Из данных мониторинга также следует, что сечения 2–2, 2'–2' (симметрично сечению 2–2), 3–3 для всех контролируемых арочных элементов нагружены приблизительно в равной степени. В сечении 2'–2' арки №11 относительная осевая деформация больше (до 0,11–0,12%), чем в ее симметричном сечении 2–2 и в аналогичных сечениях арок №2 и №4. Эта деформация связана с наличием повышенных монтажных деформаций (рис. 5), что возможно обусловлено отклонением от геометрических размеров арочного элемента, в том числе его сечения.

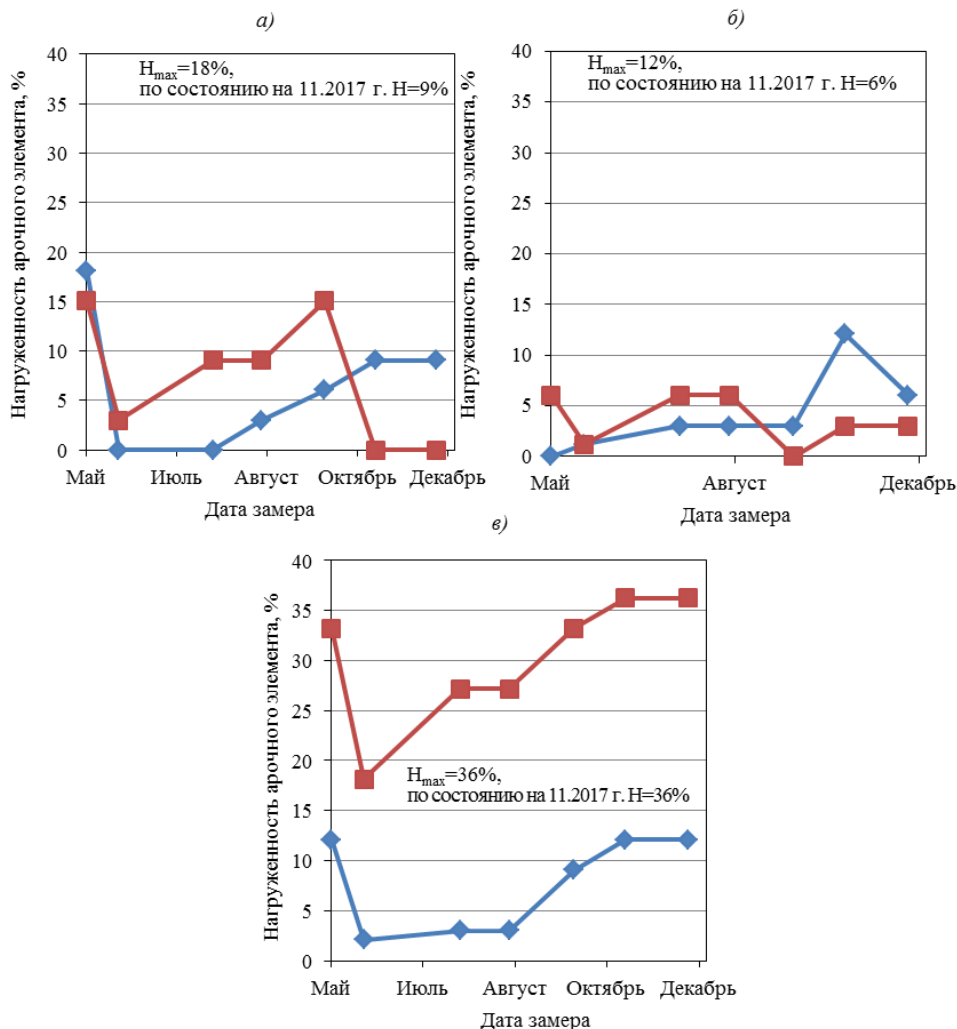


Рис. 7. Нагруженность (H) арочных элементов с оболочкой из углепластика ВКУ-51И в сечении 2–2 (◆)/2'–2' (■) в зависимости от даты замера:

а – арка №2; б – арка №4; в – арка №11

Согласно предложенному методу оценки и с учетом действующих монтажных деформаций максимальная нагруженность арочных элементов в возведенном мосту составляет (не более): 18% – для арки №2, 12% – для арки №4 и 36% – для арки №11 (рис. 7). Соответственно, арочный элемент №2 имеет запас по работоспособности (нагрузению) 82%, 88% – для арки №4, 64% – для арки №11.

Обсуждение и заключения

Проведен анализ данных за период с июня по ноябрь 2017 г., поступающих от доработанной оптоволоконной системы мониторинга арочных элементов из углепластика ВКУ-51И с использованием датчиков деформации и температуры на основе ВБР, установленной на пилотном объекте – двухполосном автомобильном арочном мосту в пос. Языково Ульяновской области.

Показано, что в результате установки арочных элементов в конструкцию на их поверхности в вершине и на 1/4 длины присутствуют сжимающие осевые деформации до 0,11%.

Максимальное изменение значений относительной осевой деформации составило 0,08% для сечения 3–3 арки №2. С июня по ноябрь 2017 г. относительная осевая деформация арочных элементов практически не изменялась. С учетом небольших значений измеряемой относительной деформации полученная зависимость предположительно связана с термическими деформациями конструкции. Указанные деформации не превышают расчетные (0,3312%) и критические (1,0%) значения.

Согласно предложенному методу оценки и с учетом действующих монтажных деформаций максимальная нагруженность арочных элементов в возведенном мосту составляет (не более): 18% – для арки №2, 12% – для арки №4 и 36% – для арки №11. Соответственно, арочный элемент №2 имеет запас по работоспособности (нагрузению) 82%, 88% – для арки №4, 64% – для арки №11.

По результатам проведенного анализа данных оптоволоконной системы мониторинга пилотного объекта подготовлена и подана заявка на программу ЭВМ для мониторинга деформации ПКМ арочных элементов «АркаПКМ-Контроль», получено свидетельство №2017661616 от 17.10.2017 г. и разработаны технические условия ТУ26.51-014-07545412–2017 «Комплект системы мониторинга арочных элементов из ПКМ» на комплект системы мониторинга арочных элементов из ПКМ с использованием интегрированных оптоволоконных датчиков.

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. Шестой технологический уклад // Наука и жизнь. 2010. №4. С. 2–7.
3. Дориомедов М.С., Дасковский М.И., Скрипачев С.Ю., Шеин Е.А. Полимерные композиционные материалы в железнодорожном транспорте России (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №7 (43). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 27.02.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-7-12-12.
4. Ерасов В.С., Яковлев Н.О., Нужный Г.А. Квалификационные испытания и исследования прочности авиационных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 440–448.
5. Дыщенко В.С., Раскутин А.Е., Зуев М.А. Дорожный детектор в системах безостановочного автоматического взвешивания // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016.

- №5 (41). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 27.02.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-5-12-12.
6. 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: 27.02.2018).
 7. Васильев С.А., Медведков И.О., Королев И.Г. и др. Волоконные решетки показателя преломления и их применение // Квантовая электроника. 2005. Т. 35. №12. С. 1085–1103.
 8. Способ измерения деформации конструкции из композиционного материала: пат. 2427795 Рос. Федерация; опубл. 03.12.09.
 9. Каблов Е.Н., Сиваков Д.В., Гуляев И.Н. и др. Применение оптического волокна в качестве датчиков деформации в полимерных композиционных материалах // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2010. №3. С. 10–15.
 10. Каблов Е.Н., Сиваков Д.В., Гуляев И.Н. и др. Методы исследования конструкционных композиционных материалов с интегрированной электромеханической системой // Авиационные материалы и технологии. 2010. №4. С. 17–20.
 11. Щетанов Б.В., Купцов Р.С., Свистунов В.И. Методы получения монокристаллических волокон оксида алюминия для создания композиционных материалов и высокотемпературной волоконной оптики // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №4. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 27.02.2018).
 12. Никитина В.Ю., Кольшев С.Г., Купцов Р.С. Способы определения площади сечения монокристаллических волокон Al_2O_3 для расчета прочности при растяжении // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №2. Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 27.02.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-4-3-3.
 13. Huang Y., Palek L., Strommen R. et al. Real-Time Weigh-In-Motion Measurement Using Fiber Bragg Grating Sensors // Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical and Aerospace Systems. 2014. Vol. 9061. P. 96–102.
 14. Zhou Z., Liua W., Huang Y. et al. Optical Fiber Bragg Grating Sensor Assembly for 3D Strain Monitoring and Its Case Study in Highway Pavement // Mechanical Systems and Signal Processing. 2012. Vol. 28. P. 36–49.
 15. Wang K., Wei Z., Zhang H. et al. Fiber-Bragg-grating-based weigh-in-motion system using fiber-reinforced composites as the load-supporting material // Optical Engineering. 2006. Vol. 45. No. 6. P. 33–39.
 16. Zhan H., Wei Z., Fan L. et al. Sensing System and a High Performance Optical Fiber Bragg Grating (FBG) Demodulator // Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical and Aerospace Systems. 2010. Vol. 7647. P. 102–109.