

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» <https://t-s.today>
Russian journal of transport engineering

2018, №3, Том 5 / 2018, No 3, Vol 5 <https://t-s.today/issue-3-2018.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/11SATS318.pdf>

DOI: 10.15862/11SATS318 (<http://dx.doi.org/10.15862/11SATS318>)

Статья поступила в редакцию 12.07.2018; опубликована 01.09.2018

Ссылка для цитирования этой статьи:

Федотов М.Ю., Лоскутов М.Л., Шелемба И.С., Колесников А.В., Овчинников И.Г. К вопросу мониторинга несущих металлических конструкций мостов с использованием волоконно-оптических датчиков // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2018 №3, <https://t-s.today/PDF/11SATS318.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/11SATS318

For citation:

Fedotov M.Yu., Loskutov M.L., Shelemba I.S., Kolesnikov A.V., Ovchinnikov I.G. (2018). To the issue of monitoring of metal-bearing bridges supporting fiber optic sensors. *Russian journal of transport engineering*, [online] 3(5). Available at: <https://t-s.today/PDF/11SATS318.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/11SATS318

УДК 624.04

Федотов Михаил Юрьевич

ООО «ЛИРА софт», Москва, Россия
Руководитель проектов
E-mail: fedotovmyu@gmail.com

Лоскутов Максим Леонидович

Ассоциация строителей России, Москва, Россия
Директор департамента строительства и инфраструктурных проектов
E-mail: m.lloskutoff@gmail.com

Шелемба Иван Сергеевич

ООО «Инверсия-Сенсор», Пермь, Россия
Первый заместитель генерального директора
Главный конструктор
E-mail: shelemba@i-sensor.ru

Колесников Алексей Викторович

ООО «ЛИРА софт», Москва, Россия
Технический директор
E-mail: heallex@yandex.ru

Овчинников Игорь Георгиевич

ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Пермь, Россия
ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», Саратов, Россия
Доктор технических наук, профессор
E-mail: bridgesar@mail.ru

**К вопросу мониторинга несущих
металлических конструкций мостов с использованием
волоконно-оптических датчиков**

Аннотация. Приведены результаты исследований по мониторингу деформаций несущих металлических конструкций пролетного строения моста с помощью волоконно-оптических датчиков на основе волоконных брэгговских решеток до и после усиления

полимерными композиционными материалами. Получено, что в результате усиления прогиб моста уменьшился в 2 раза. Результаты экспериментальных исследований сравнивались с расчетным обоснованием, выполненном в ПК ЛИРА 10.8. В результате экспериментально-теоретических исследований подтверждено, что установленная система усиления с использованием композитных шпренгелей может эффективно применяться для восстановления несущей способности искусственных сооружений.

Ключевые слова: мониторинг; волоконно-оптический датчик; полимерный композиционный материал; усиление; композитный шпренгель; несущая металлическая конструкция; пролетное строение моста

Введение

Для большинства мостовых сооружений, построенных в первой половине прошлого века, характерным видом повреждений металлических несущих конструкций является снижение механических характеристик, обусловленное усталостью металла, коррозией, а также возникновение погнутости элементов конструкций вследствие длительной эксплуатации при воздействии различных климатических факторов. При этом рассматриваемые объекты проектировались и возводились в соответствии с нормативной документацией того периода, и не были рассчитаны на современный уровень статических и динамических нагрузок, возникающих при эксплуатации. Это позволяет говорить о необходимости оценки технического состояния конструкции с помощью современных методов и средств мониторинга [1-6], а также о необходимости восстановления или повышения исходной несущей способности для предотвращения возможных критических и аварийных ситуаций при дальнейшей эксплуатации.

Не секрет, что традиционно для усиления металлических конструкций с целью повышения их несущей способности обычно применяются металлические накладки, пластины, использование которых приводит к значительному увеличению собственного веса сооружения, при этом необходимо ограничивать или полностью прекращать движение транспорта на период проведения ремонтных работ, что является крайне невыгодным с экономической точки зрения, вследствие задержек транспортировки грузов и корректировки пассажиропотока [7, 8].

В последнее время активное распространение получили технологии восстановления несущей способности с применением полимерных композиционных материалов (ПКМ) [9, 10], при этом, анализируя зарубежный и отечественный опыт, стоит отметить, что усиление обычно осуществляется непосредственно на объекте путем послойного нанесения слоев пропитанного армирующего наполнителя (контактное формование), на основе связующих холодного отверждения (отверждение при комнатной температуре), что накладывает ряд ограничений по климату (сложности или невозможность установки системы в холодное время года).

Другим вариантом организации усиления металлических несущих конструкций является применение готовых композитных шпренгелей, изготовленных методом автоклавного формования, что способствует монолитности и минимальному разбросу свойств ПКМ (по сравнению с другими технологиями формования), с дискретным жёстким механическим креплением к пролетному строению моста. Такой подход позволяет уйти от сезонности работ и не требует привлечения тяжеловесной грузоподъемной техники. При этом проблема усиления металлических конструкций внешним армированием с использованием композитных материалов фактически не разработана, как, например, в случае усиления бетонных, железобетонных и каменных конструкций, и, поэтому, является актуальной и перспективной в связи с большим объемом эксплуатируемых конструкций данного типа, требующих реконструкции и ремонта.

Эффективным методом диагностики несущих металлических пролетных строений мостов является применение волоконно-оптических систем мониторинга [11-14], включающих сеть волоконно-оптических датчиков (ВОД) на основе волоконных брэгговских решеток (ВБР) и интеррогатор (устройство сбора данных от ВОД) со встроенным программным обеспечением (ПО), позволяющим осуществлять обработку и визуализацию данных в режиме реального времени или дискретно с заданным периодом опроса ВОД.

ВОД датчики имеют ряд преимуществ по сравнению с традиционно применяемой электрической тензометрией, которые позволяют использовать их для мониторинга искусственных сооружений во всех климатических зонах РФ. Точность измерения относительной деформации ВОД составляет 1 мкм/м (10^{-6} %), точность измерения температуры 0,1 °С [15].

В настоящей статье представлены результаты исследований по мониторингу деформаций несущих металлических конструкций пролетного строения моста с помощью ВОД до и после усиления композитными шпренгелями на основе углепластика, изготовленными методом автоклавного формования.

1. Объекты и методы исследований

В качестве объекта мониторинга использовался железнодорожный мост 739 серии через реку Любовша, расположенный на км 118 ПК 7+46 м пути участок Орел-Елец Московской железной дороги. Мониторинг осуществлялся с использованием датчиков, оборудования и ПО разработки и производства компании ООО «Инверсия-Сенсор» (г. Пермь).

Волоконно-оптическая система мониторинга несущих конструкций железнодорожного моста состояла из 15 ВОД, расположенных на нижнем поясе балок пролетного строения моста (рисунок 1).



Рисунок 1. Зоны расположения датчиков на нижнем поясе балок моста (фото авторов)

Внешний вид волоконно-оптической системы мониторинга несущих конструкций мост представлен на рисунке 2.

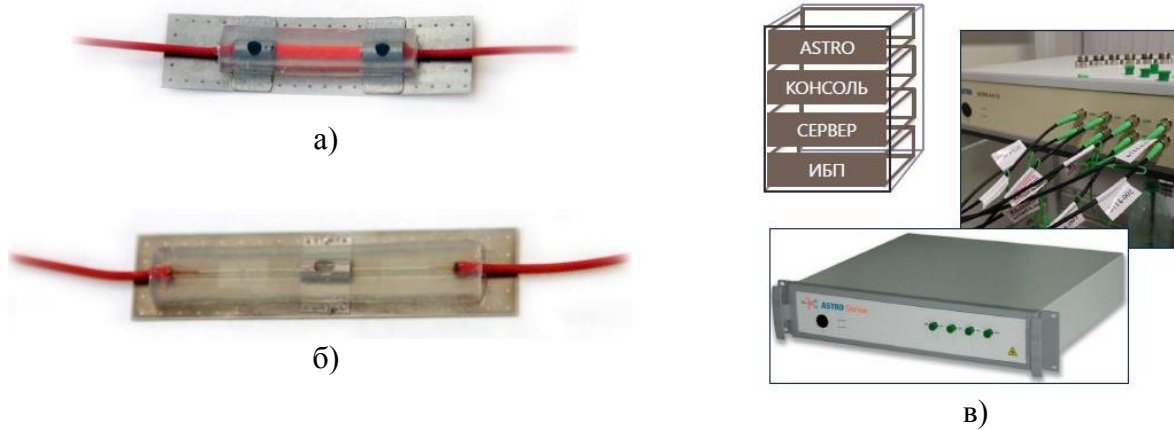


Рисунок 2. Волоконно-оптическая система мониторинга (фото авторов):
а) ВОД деформации ASTRO A521; б) ВОД температуры ASTRO A511;
в) Стоечный 4-х канальный анализатор сигналов ASTRO A321

Для измерения деформации использовали ВОД ASTRO A521, приклеенные на нижнюю поверхность балки (по 6 штук на каждую балку). Для температурной компенсации использовали 3 ВОД температуры ASTRO A511.

Волоконно-оптическая линия связи (ВОЛС) от нижнего пояса балок моста прокладывалась к месту установки стоечного 4-х канального анализатора сигналов от ВОД ASTRO A321.

До усиления несущих металлических балок композитными шпренгельными элементами ВОД нижнего пояса балок соединяли последовательно в один шлейф измерения (рисунок 3).

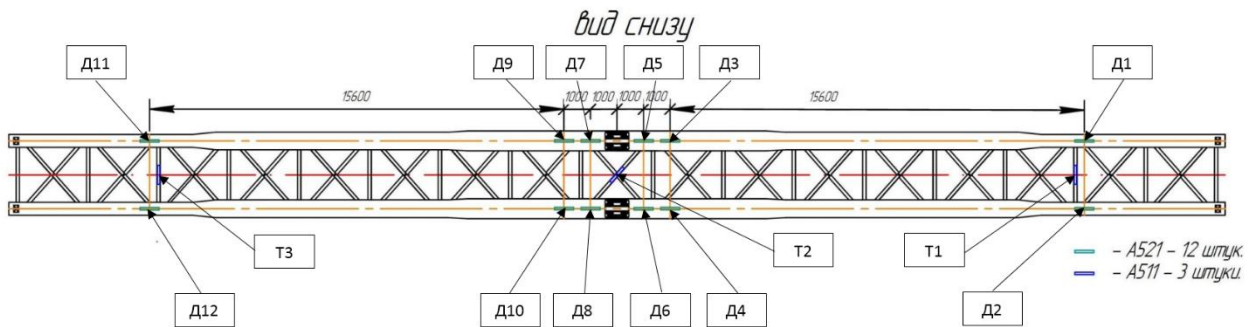


Рисунок 3. Схема расположения ВОД до усиления балок (рисунок авторов)

После усиления несущих металлических балок композитными шпренгельными элементами ВОД нижнего пояса балок соединяли последовательно в два шлейфа измерения (рисунок 4).

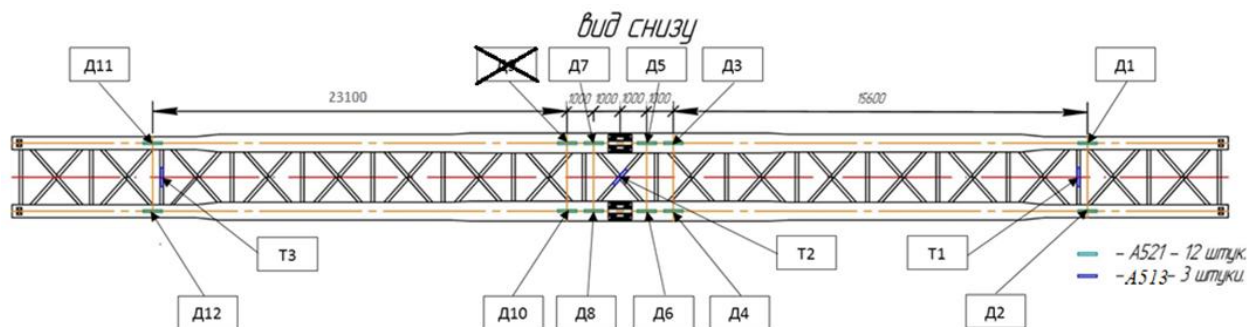


Рисунок 4. Схема расположения ВОД до усиления балок (рисунок авторов)

Первый шлейф: Д1-Д8, Т1, Т2. Второй шлейф: Д9-Д12, Т3. ВОЛС от нижнего пояса балок моста прокладывалась к месту установки анализатора. Так как из-за установленных композитных шпренгелей невозможно установить ВОД на старые места было решено сместить их на 15 см ближе к центру. Датчики Д11, Д12, Т3 были перенесены на 7,5 м дальше от центра в связи с отсутствием доступа к прошлому месту установки. При проведении коммутации линии после завершения монтажных работ было обнаружено, что ВОД Д9 вышел из строя (повреждение чувствительного элемента), поэтому мониторинг проводился без него.

2. Результаты экспериментов и их обсуждение

Исследование технического состояния металлических конструкций пролетного строения моста до установки системы усиления проводилось в двух режимах:

- кратковременное нагружение;
- длительное нагружение.

В качестве кратковременной нагрузки осуществлялось прохождение по мосту состава из двух вагонов, общая длина которого примерно равна длине моста. Длительность воздействия составила 5 секунд. Показания ВОД деформации приведены на рисунке 5.

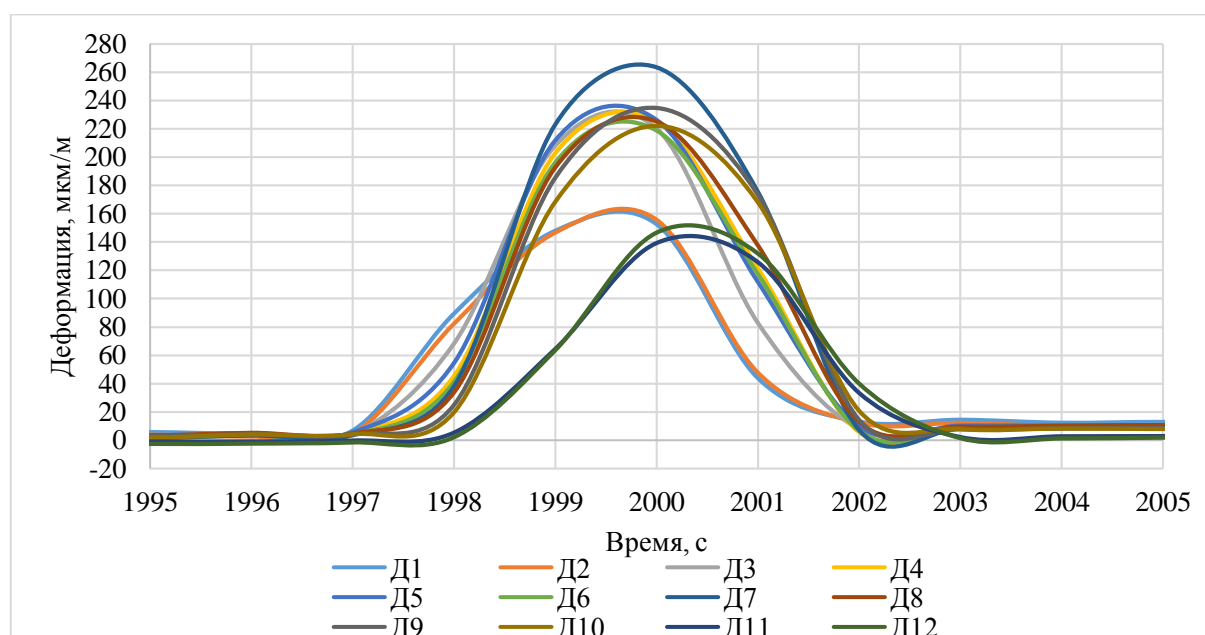


Рисунок 5. Показания ВОД деформации при кратковременной нагрузке до усиления композитными шпренгелями (рисунок авторов)

Из графиков хорошо видно, как ВОД отслеживают перемещение нагрузки по длине моста: сначала начинают расти и достигают максимума показания ВОД, установленных в начале пролетного строения моста (Д1 и Д2), затем максимума достигает деформация ВОД, расположенных в центральной части моста (Д3-Д10), и, в завершение, максимальной становится деформация ВОД, размещенных в конце пролетного строения моста (Д11-Д12). Таким образом, максимальная зафиксированная деформация составляет 263 мкм/м, усредненные показания максимальной деформации в центральной зоне составляют 230 мкм/м. Показания ВОД по краям моста составили (140-160) мкм/м.

Для исследования влияния продолжительной нагрузки показания ВОД снимались во время движения грузового состава. Длительность воздействия составляла порядка 1 минуты. Показания ВОД деформации приведены на рисунке 6.

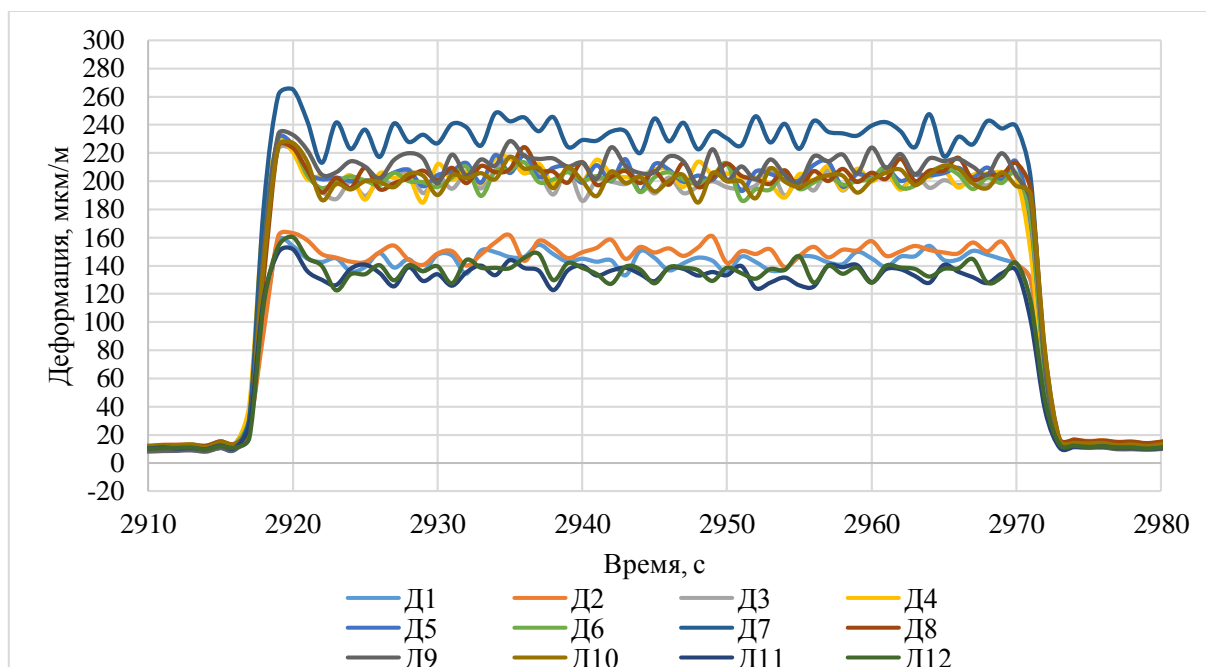


Рисунок 6. Показания ВОД деформации при продолжительной нагрузке до усиления композитными шпренгелями (рисунок авторов)

Благодаря большой длине состава силовое воздействие в течении почти всего времени движения остается на постоянном уровне. Зафиксированные деформации сопоставимы с деформациями при кратковременной нагрузке: 200-240 мкм/м в центральной зоне металлической несущей балки и 140-160 мкм/м – по краям пролетного строения моста.

Помимо данных от ВОД деформации, параллельно снимались показания от ВОД температуры (рисунок 7).

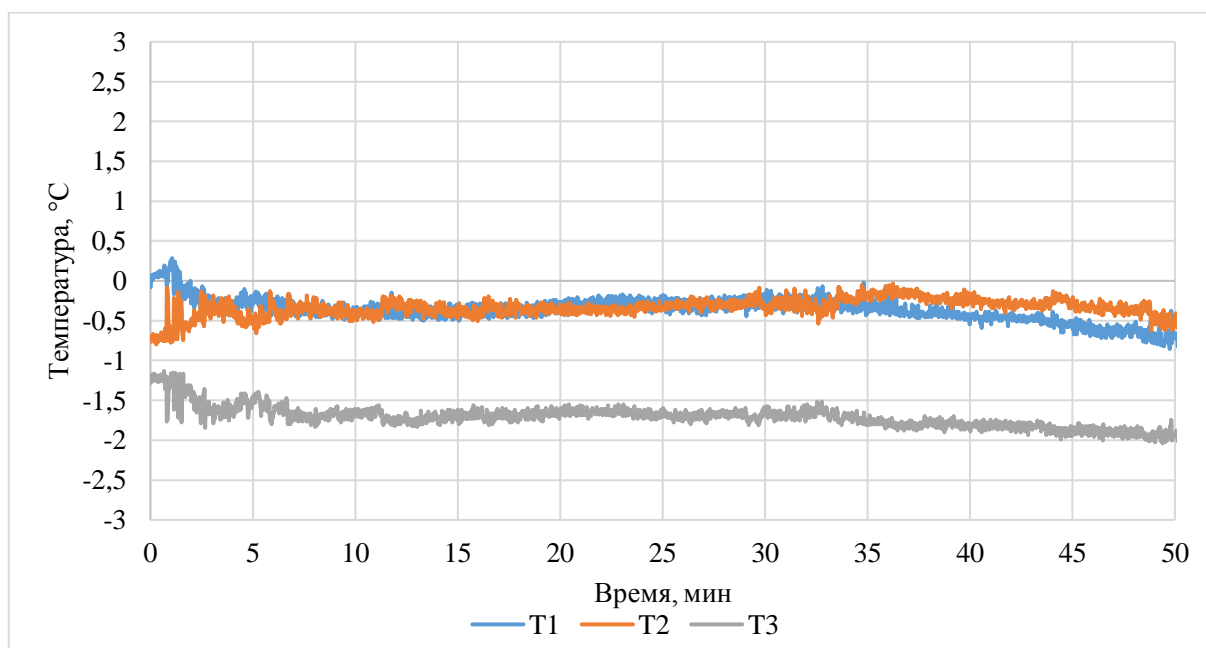


Рисунок 7. Показания ВОД температуры (рисунок авторов)

Из рисунка 7 видно, что изменение температуры в местах расположения соответствующих датчиков в период проведения исследований, составило не более одного градуса. Эти данные необходимо учитывать для термокомпенсации [16, 17], с целью

исключения температурной погрешности при измерениях с помощью ВОД деформации на основе ВБР, что особенно целесообразно при резких колебаниях температуры.

С учетом полученных показаний ВОД, а также расчетов (рисунок 8), выполненных в программном комплексе ЛИРА 10.8, фактическое значение прогиба составило 71 мм (76 мм в ПК ЛИРА 10.8), что является критическим при эксплуатации конструкций данного типа. Таким образом, данные, полученные от волоконно-оптической системы мониторинга, свидетельствуют о том, что деформации главных балок пролетного строения моста достигли опасного уровня и, как следствие, требуется установка системы усиления.

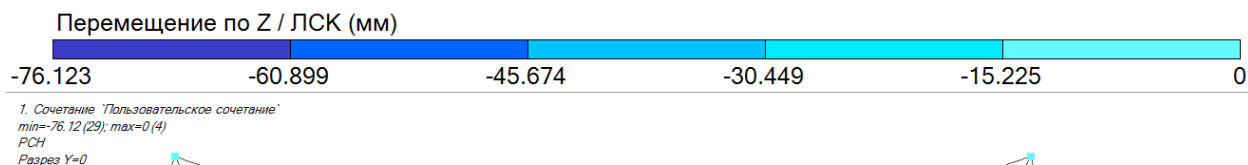


Рисунок 8. Прогибы нижней части моста в ПК ЛИРА 10.8 (рисунок авторов)

Для восстановления несущей способности пролетного строения моста методом дискретного механического крепления были установлены композитные шпренгели, после чего был проведен повторный мониторинг с целью оценки качества проведенного усиления.

После проведения операций по усилению металлических балок пролетного строения моста композитными шпренгелями были установлены ВОД и проведен мониторинг во время движения грузового состава. Длительность динамического воздействия была аналогичной эксперименту до проведения усиления и составила порядка 1 минуты. Благодаря большой длине состава силовое воздействие, как и в предыдущем случае, в течении почти всего времени движения оставалось на постоянном уровне (рисунок 9).

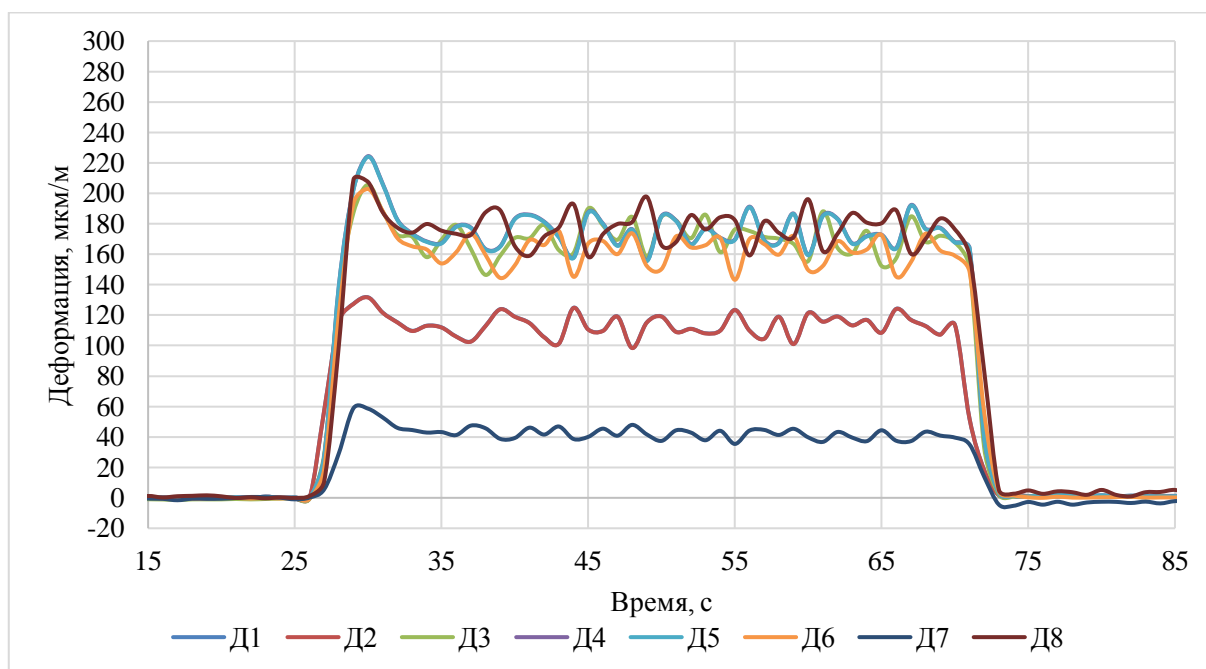


Рисунок 9. Показания ВОД деформации при продолжительной нагрузке на несущие металлические балки моста после усиления композитными шпренгельными элементами (рисунок авторов)

Из рисунка 9 видно, что после усиления несущих металлических балок моста композитными шпренгелями величины деформаций мостовых конструкций под нагрузкой уменьшились. Деформация в центральной зоне составила (160-180) мкм/м, по краям – (110-120) мкм/м.

Данные от ВОД, полученные до и после усиления конструкции приведены на рисунке 10.

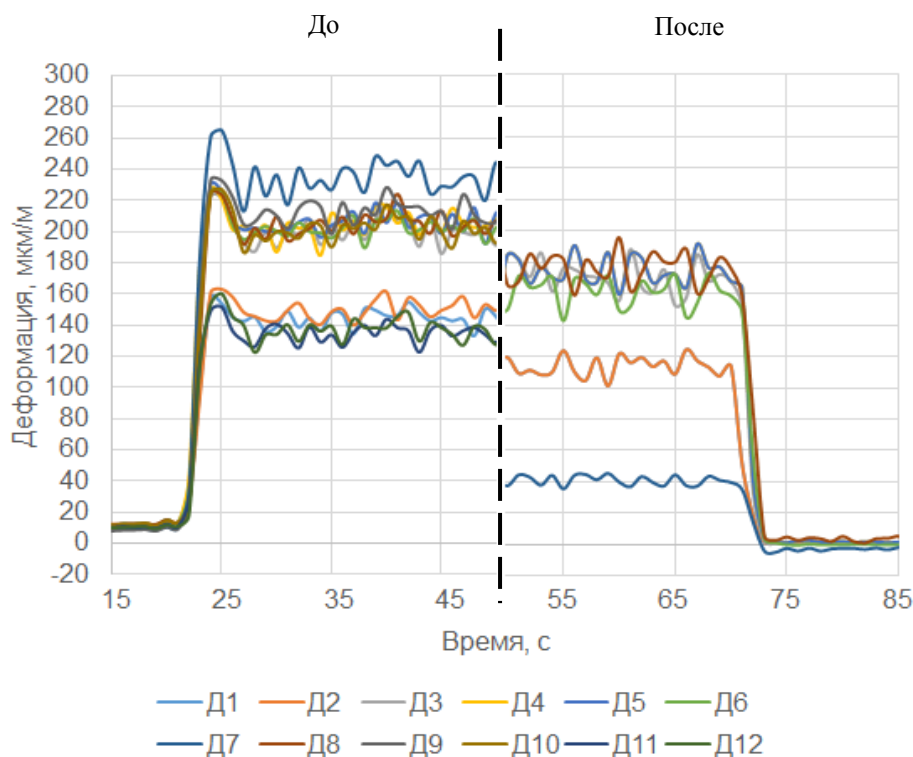


Рисунок 10. Показания ВОД деформации при продолжительной нагрузке до и после усиления композитными шпренгелями (рисунок авторов)

В результате сравнения данных, полученных до и после усиления конструкции, видно, что величина деформации на несущие металлические конструкции пролетного строения моста снизилась в среднем на 40 мкм/м.

С учетом полученных показаний ВОД, а также расчетов, выполненных в программном комплексе ЛИРА 10.8 (рисунок 11), фактическое значение прогиба после усиления составило 32 мм (35 мм в ПК ЛИРА 10.8), что является допустимым значением для безопасной эксплуатации конструкций данного типа.

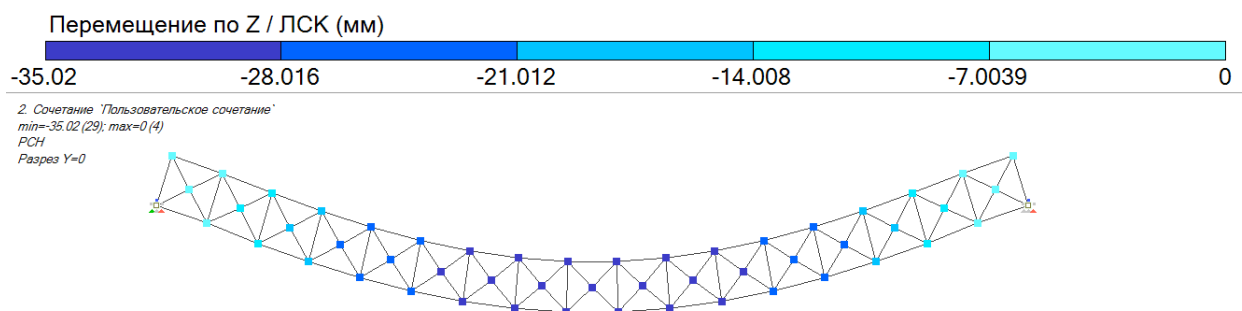


Рисунок 11. Прогиб нижней части конструкций моста после усиления (рисунок авторов)

Таким образом, экспериментально подтверждено, что установленная система усиления с использованием композитных шпренгелей может эффективно применяться для восстановления несущей способности искусственных сооружений, при этом волоконно-оптическая система мониторинга является эффективным инструментом оценки фактического технического состояния мостовых конструкций и может успешно применяться для отслеживания и предотвращения возникновения критических ситуаций.

Выводы

Проведена оценка технического состояния железнодорожного моста 739 серии через реку Любовша, расположенный на км 118 ПК 7+46 м пути участок Орел-Елец Московской железной дороги до усиления композитными шпренгелями с помощью системы мониторинга на основе ВОД.

Данные, полученные от ВОД, свидетельствуют о том, что значения прогиба до проведения усиления были близки к критическому значению (71 мм), а, следовательно, для дальнейшей безопасной эксплуатации объекта требовалось проведение мероприятий по усилению конструкции.

После проведения усиления проведена повторная оценка технического состояния моста с помощью системы мониторинга на основе ВОД. Показано, что данные, полученные от ВОД, свидетельствуют о том, что значение прогиба уменьшилось и составило 32 мм, что соответствует значениям, необходимым для дальнейшей безопасной эксплуатации.

Полученная относительная погрешность 8 % между экспериментальными исследованиями и расчетным обоснованием в ПК ЛИРА 10.8 является допустимой.

Таким образом, экспериментально и теоретически подтверждена эффективность предлагаемой экспериментальной технологии усиления металлических несущих конструкций моста и возможность широкого применения волоконно-оптических систем мониторинга для повышения безопасности эксплуатации искусственных сооружений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Овчинников И.Г. Прочностной мониторинг мостовых сооружений // Автомобильные дороги 1995, №7-8.
2. Нигаматова О.И., Овчинников И.Г. Мониторинг транспортных сооружений // Инновационный транспорт. 2015. № 1(15) с. 30-34.
3. Овчинников И.Г., Овчинников И.И., Нигаматова О.И., Михалдыкин Е.С. Прочностной мониторинг мостовых сооружений и особенности его применения. Часть 1. Международный и отечественный опыт применения мониторинга // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», Том 1, номер 1 (2014) <http://t-s.today/PDF/01TS114.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.
4. Овчинников И.Г., Овчинников И.И., Нигаматова О.И., Михалдыкин Е.С. Прочностной мониторинг мостовых сооружений и особенности его применения. Часть 2. Непрерывный мониторинг состояния мостовых сооружений // Интернет-журнал «Транспортные сооружения» Том 1, No 2 (2014) <http://t-s.today/PDF/01TS214.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.
5. Shridhar K. Panigrahi, P.J. Salunke, N.G. Gore. Structural Health Monitoring and Strengthening of Bridges // International Journal of Science and Engineering Applications. Volume 4 Issue 5, 2015, p. 309-313.

6. Maintenance, monitoring, safety, risk and resilience of bridge and bridges networks. Edited by Tulio Nogueira Bittencourt, Dan M. Frangopol, Andre Beck. 2016. Brazil. 616 p.
7. Осипов В.О., Козьмин Ю.Г. и др. Содержание, реконструкция, усиление и ремонт мостов и труб. – М., Транспорт 1996 – 471 с.
8. Дементьев, В.А. Усиление и реконструкция мостов на автомобильных дорогах [Текст]: учеб. пособие / В.А. Дементьев, В.П. Волокитин, Н.А. Анисимова; под общ. ред. проф. В.А. Дементьева; Воронеж. гос. арх. строит. ун-т. – Воронеж, 2006. – 116 с.
9. Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Чесноков Г.В., Татиев Д.А., Покулаев К.В. Усиление металлических конструкций фиброармированными пластиками: часть 1. состояние проблемы // Интернет-журнал "Науковедение" № 3, 2014. Май-июнь. с. 1-27. Идентификационный номер статьи в журнале 19TVN314.
10. Неволин Д.Г., Смердов Д.Н., Смердов М.Н. Усиление железобетонных конструкций зданий и сооружений различного назначения полимерными композиционными материалами. Екатеринбург. УрГУПС. 2017. 151 с.
11. Ларин А.А., Федотов М.Ю., Бухаров С.В., Резниченко В.И. Новые области применения систем волоконно-оптических датчиков // Прикладная фотоника. 2017. №4. С. 310-324.
12. Федотов М.Ю., Гончаров В.А. Мониторинг конструкций из ПКМ оптоволоконными сенсорами / В сб. материалов XXXIII международной ежегодной конференции и блиц-выставки «Композиционные материалы в промышленности» (СЛАВПОЛИКОМ). Крым. 2013. С. 205-206.
13. Федотов М.Ю. Концепции создания и тенденции развития интеллектуальных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 71-80.
14. Раскутин А.Е., Махсидов В.В., Смирнов О.И., Кашарина Л.А. Мониторинг нагруженности композитной конструкции арочного моста на основе волоконно-оптических датчиков // Труды ВИАМ. 2018. № 3 (63). С. 49-59.
15. Kablov E.N., Sivakov D.V., Gulyaev I.N., Sorokin K.V., Fedotov M.Y., Dianov E.M., Vasil'ev S.A., Medvedkov O.I. Application of optical fiber as strain gauges in polymer composite materials // Polymer Science. Series D. 2011. T. 4. №3. P. 246-251.
16. Terentyev V.S., Kharenko D.S., Dostovalov A.V., Wolf A.A., Simonov V.A., Babin S.A., Fedotov M.Yu., Shienok A.M., Shishkin V.V., Shelemba I.S., Fiber-optic sensors based on FBGs with increased sensitivity difference embedded in polymer composite material for separate strain and temperature Measurements / В сборнике: Transforming the Future of Infrastructure through Smarter Information – Proceedings of the International Conference on Smart Infrastructure and Construction, ICSIC 2016. 2016. P. 75-79.
17. Shishkin V.V., Terentyev V.S., Kharenko D.S., Dostovalov A.V., Wolf A.A., Simonov V.A., Babin S.A., Shelemba I.S., Fedotov M.Yu., Shienok A.M. Experimental method of temperature and strain discrimination in polymer composite material by embedded fiber-optic sensors based on femtosecond-inscribed FBGs // Journal of Sensors. 2016. T. 2016. Article ID 3230968, 6 pages <http://dx.doi.org/10.1155/2016/3230968>.

Fedotov Mikhail Yurievich

LLC "LIRA Soft", Moscow, Russia
E-mail: fedotovmyu@gmail.com

Loskutov Maxim Leonidovich

Russian builders association, Moscow, Russia
E-mail: m.lloskutoff@gmail.com

Shelemba Ivan Sergeevich

Inversiya-Sensor LLC, Perm, Russia
E-mail: shelemba@i-sensor.ru

Kolesnikov Alexey Viktorovich

LLC "LIRA Soft", Moscow, Russia
E-mail: heallex@yandex.ru

Ovchinnikov Igor Georgievich

Perm national research polytechnic university, Perm, Russia
Yuri Gagarin state technical university of Saratov, Saratov, Russia
E-mail: bridgesar@mail.ru

To the issue of monitoring of metal-bearing bridges supporting fiber optic sensors

Abstract. This article describes results of studies on the monitoring of deformations of load-bearing metal structures of a span structure of a bridge using fiber-optic sensors based on fiber Bragg gratings before and after reinforcement by polymer composite materials. It is received, that as a result of strengthening the deflection of the bridge has decreased in 2 times. The results of the experimental studies were compared with the computational justification carried out in PC LIRA 10.8. As a result of experimental and theoretical studies it was confirmed that the installed reinforcement system using composite spigots can be effectively used to restore the bearing capacity of artificial structures.

Keywords: monitoring; fiber optic sensor; polymer composite material; strengthening; composite spigot; load-bearing metal structure; span structure of the bridge

REFERENCES

1. Ovchinnikov I.G. (1995). Strength monitoring of bridge structures. *Automobile roads*, 7-8. (in Russian).
2. Nigmatova O.I., Ovchinnikov I.G. (2015). Monitoring of transport constructions. *Innovative transport*, 1(15), pp. 30-34. (in Russian).
3. Ovchinnikov I.G., Ovchinnikov I.I., Nigmatova O.I., Mikhaldykin E.S. (2014). Strength monitoring of bridge constructions and features of its application. Part 1. International and domestic experience of monitoring application. *Russian journal of transport engineering*, [online] 1(1). Available at: <http://t-s.today/PDF/01TS114.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/01TS114
4. Ovchinnikov I.G., Ovchinnikov I.I., Nigmatova O.I., Mikhaldykin E.S. (2014). Strength monitoring of bridge constructions and features of its application. Part 2. Continuous monitoring of bridge construction status. *Russian journal of transport engineering*, [online] 2(1). Available at: <http://t-s.today/PDF/01TS114.pdf> <http://t-s.today/PDF/01TS214.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/01TS214

5. Shridhar K. Panigrahi, Salunke P.J., Gore N.G. (2015). Structural Health Monitoring and Strengthening of Bridges. *International Journal of Science and Engineering Applications*, 5(4), pp. 309-313.
6. Tulio Nogueira Bittencourt, Dan M. Frangopol, Andre Beck (2016). *Maintenance, monitoring, safety, risk and resilience of bridge and bridges networks*. Brazil, p. 616.
7. Osipov V.O., Kozmin Yu.G. and etc. (1996). Soderzhanie, rekonstruktsiia, usilenie i remont mostov i trub. [*The maintenance, reconstruction, strengthening and repair of bridges and culverts.*] – Moscow: Transport, p. 471.
8. Dement'ev V.A., Volokitin V.P., Anisimova N.A. (2006). Usilenie i rekonstruktsiia mostov na avtomobilnykh dorogakh. [*Strengthening and reconstruction of bridges on highways.*] Voronezh: Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering, p. 116.
9. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Chesnokov G.V., Tatiev D.A., Pokulaev K.V. (2014). Pokulaev. Strengthening of metal structures with fiber reinforced plastic: Part 1. State of the problem. *Russian journal of transport engineering*, [online] 3(1), pp. 1-27. Available at: <https://naukovedenie.ru/PDF/19TVN314.pdf> (in Russian).
10. Nevolin D.G., Smerdov D.N., Smerdov M.N. (2017). Usilenie zhelezobetonykh konstruksii zdanii i sooruzhenii razlichnogo naznacheniia polimernymi kompozitsionnymi materialami. [*Strengthening of reinforced concrete structures of buildings and structures for various purposes with polymeric composite materials.*] Ekaterinburg: Ural State University of Railway Transport, p. 151.
11. Larin A.A., Fedotov M.Iu., Bukharov S.V., Reznichenko V.I. (2017). New applications of fiber-optic sensor systems. *Applied photonics*, 4, pp. 310-324. (n Russian).
12. Fedotov M.Yu., Goncharov V.A. (2013). Monitoring konstruksii iz PKM optovolokonnyimi sensorami. [*Monitoring of structures from PCM with fiber-optic sensors.*] Crimea, p. 205-206.
13. Fedotov M.Yu. (2015). Concepts of creation and trends of development of intellectual materials. *Aviation materials and technologies*, 1(34), pp. 71-80. (n Russian).
14. Raskutin A.E., Makhsidov V.V., Smirnov O.I., Kasharina L.A. (2018). Monitoring of the loading of a composite structure of an arch bridge based on fiber-optical sensors. *Proceedings VIAM*, 3(63), pp. 49-59. (n Russian).
15. Kablov E.N., Sivakov D.V., Gulyaev I.N., Sorokin K.V., Fedotov M.Y., Dianov E.M., Vasil'ev S.A., Medvedkov O.I. (2011). Application of optical fiber as strain gauges in polymer composite materials. *Polymer Science. Series D*, 2011, 3(4), p. 246-251.
16. Terentyev V.S., Kharenko D.S., Dostovalov A.V., Wolf A.A., Simonov V.A., Babin S.A., Fedotov M.Yu., Shienok A.M., Shishkin V.V., Shelemba I.S. (2016). *Fiber-optic sensors based on FBGs with increased sensitivity difference embedded in polymer composite material for separate strain and temperature Measurements*. pp. 75-79.
17. Shishkin V.V., Terentyev V.S., Kharenko D.S., Dostovalov A.V., Wolf A.A., Simonov V.A., Babin S.A., Shelemba I.S., Fedotov M.Yu., Shienok A.M. (2016). Experimental method of temperature and strain discrimination in polymer composite material by embedded fiber-optic sensors based on femtosecond-inscribed FBGs. *Journal of Sensors*, p. 6. Available at: <http://dx.doi.org/10.1155/2016/3230968> (in Russian).