

скоростном циклическом нагружении алмазного зерна. Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения // Сб. научных трудов ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины. Киев, 2009. № 12. С. 504–508.

3. Tillmann W., Tolan M., Lopes-Dias N.F. et al. Influence of chromium as carbide forming doping element on the diamond retention in diamond tools // International Conference on Stone and Concrete Machining (ICSCM). 2015. Т.3. Р. 21–30.

4. Шарин П.П., Яковлева С.П., Гоголев В.Е., Васильева М.И. Структурная организация высокоизносостойких алмазосодержащих композитов на основе твердосплавных порошков, полученных методом спекания с пропиткой медью // Перспективные материалы. 2015. № 6. С. 66–77.

5. Schubert T., Trindade B., Weißgärber T., Kieback B. Interfacial design of Cu-based composites prepared by powder metallurgy for heat sink applications // Materials Science and Engineering. 2008. V. 475, №1–2. Р. 39–44.

6. Яхутлов М.М., Карамурзов Б.С., Беров З.Ж., Батыров У.Д., Нартыжеев Р.М. Направленное формирование межфазной границы алмаз-матрица с использованием нанопокровов // Изв. Кабардино-Балкарского госуниверситета. 2011. Т. 1, №4. С. 23–25.

7. Локтюшин В.А., Гуревич Л.М. Получение нанотолщинных металлических покрытий на сверхтвердых материалах методом термодиффузионной металлизации // Изв. Волжского государственного технического университета. 2009. Т. 11, № 3. С. 50–54.

8. Hsieh Y.Z., Chen J.F., Lin S.T. Pressureless sintering of metal-bonded diamond particle composite blocks // Journal of materials science. 2000. Т. 35, №. 21. Р. 5383–5387.

9. Шарин П.П., Никитин Г.М., Лебедев М.П., Атласов В.П., Гоголев В.Е., Попов В.И. Способ получения композиционной алмазосодержащей матрицы с повышенным алмазодержанием на основе твердосплавных порошковых смесей. Заявка на выдачу патента РФ на изобретение № 2015132568 от 04. 08. 2015.

10. Шарин П.П., Никитин Г.М., Лебедев М.П., Махарова С.Н., Гоголев В.Е., Атласов В.П. Способ соединения монокристалла алмаза с металлами. Заявка на выдачу патента РФ на изобретение № 2015141663 от 30. 09. 2015.

11. Шарин П.П., Лебедев М. П., Гоголев В.Е., Ноговицын Р.Г., Слободчиков П.А. Способ изготовления алмазных инструментов. Патент РФ №2478455. Оpubл. 10. 04. 2012.

Поступила в редакцию 02.06.2016

УДК 624.272

## Оценка напряженно-деформированного состояния пролетных строений моста, усиленного композитными материалами

А.А. Хрюкин, М.В. Смолина

Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск

Приведены данные мониторинга технического состояния усиленного композитными материалами моста через р. Протока, эксплуатируемого в климатических условиях Республики Саха (Якутия). Определена грузоподъемность усиленных пролетных строений с учетом фактического технического состояния на четвертый год эксплуатации опытной конструкции. На основе наблюдений за опытной конструкцией сделаны выводы об эффективности усиления композитными материалами на основе углеволокна. Сформулированы наиболее значимые проблемные вопросы усиления композитами в зоне низких температур.

Ключевые слова: железобетонные мосты, техническое состояние, грузоподъемность, несущая способность, пролетное строение, усиление композитными материалами, углеволокно.

---

ХРЮКИН Артем Андреевич – магистрант, hryukin95@gmail.com; СМОЛИНА Милена Васильевна – ст. преподаватель, milena-smolina@ya.ru.

## Assessment of the Intense Deformed Condition of Bridge Superstructure Strengthened by Composite Materials

A.A. Hryukin, M.V. Smolina

M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk

Data of monitoring of technical condition of the bridge through the river Protoka strengthened by composite materials and operated in climatic conditions of the Republic of Sakha (Yakutia) are provided in the article. Load-carrying capacity of the strengthened bridge superstructure taking into account the actual technical condition at the fourth year of the operation of a pilot design is determined. On the basis of observations over the pilot design conclusions are made on efficiency of strengthening by composite materials on the basis of a carbon fiber. The most significant problematic issues of strengthening by composites in a zone of low temperatures are formulated.

Key words: steel concrete bridges, technical condition, load-carrying capacity, bearing capability, super structure, strengthening by composite materials, carbon fiber.

### Введение

На мостах и путепроводах автомобильных дорог Российской Федерации в настоящее время эксплуатируются более 40 тыс. железобетонных пролетных строений. Они отличаются конструктивными решениями, примененными при их проектировании нормативными документами и технологией их возведения. Эти сооружения работают в весьма различных климатических условиях и подвергаются воздействию различных агрессивных эксплуатационных сред [1].

В связи с ростом интенсивности движения и увеличением грузоподъемности эксплуатирующихся на дорогах автомобилей ремонт и усиление используемых железобетонных конструкций мостовых сооружений на автомобильных дорогах общего пользования являются приоритетными задачами. Следует отметить, что, по данным 2013 г., на территории Республики Саха (Якутия) всего лишь 9% железобетонных мостов имеют «хорошее» техническое состояние, все они запроектированы под различные временные нагрузки, с классами К, равными 11 и более низкими, это означает, что их фактиче-

ская несущая способность не соответствует современным расчетным нагрузкам (АК-14, НК-14), а, следовательно, требуется их усиление [2].

В последнее десятилетие активно развивается и совершенствуется технология увеличения или восстановления несущей способности конструкций с помощью композитных материалов.

### Объект и методы исследования

В 2013 г. организацией ОАО «ТрансДорПроект» на мосту через р. Протока на 11+079 км автомобильной дороги «Подъезд к п. Кангалассы» в Республике Саха (Якутия) было произведено опытное применение способа усиления системой внешнего армирования композитными материалами. Сотрудниками и студентами кафедры «Автомобильные дороги и аэродромы» автодорожного факультета Северо-Восточного федерального университета ведется мониторинг напряженно-деформированного состояния усиленных элементов моста через р. Протока (рис. 1–3).

Обследование моста производилось ежегодно, согласно ОДМ 218.3.014-2011 «Методика

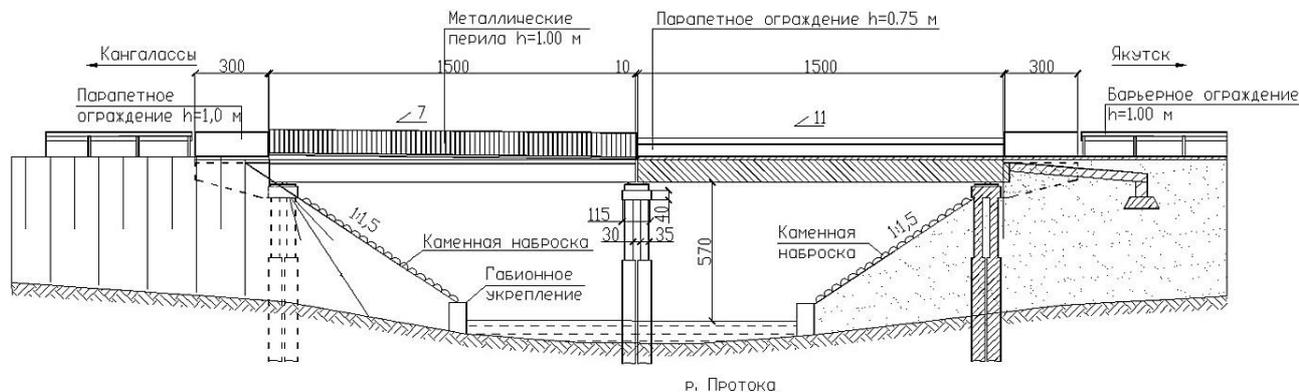


Рис. 1. Схема моста через р. Протока на 11+079 км автомобильной дороги «Подъезд к п. Кангалассы»



Рис. 2. Общий вид на пролетные строения моста через р. Протока до усиления композитными материалами



Рис. 3. Вид на балку моста через р. Протока, усиленную металлическими тяжами

оценки технического состояния мостовых сооружений на автомобильных дорогах», и включало в себя исследование физического и напряженно-деформированного состояния конструкций, выявление дефектов и повреждений, влияющих на грузоподъемность, осмотр сооружения, проверку внешнего вида системы усиления, инструментальные измерения.

В 2016 г. для получения актуальных данных о напряженно-деформированном состоянии усиленных конструкций моста через р. Протока, а также в целях оценки эффективности усиления произведены расчеты прочности усиленной конструкции в составе эксплуатируемого пролетного строения по нормальным и наклонным сечениям. Расчеты по грузоподъемности производились по общепринятой методике СП 35.13330 «Мосты и трубы» по первой группе предельных состояний с учетом требований ОДН 218.0.032-2003 «Временное руководство по определению грузоподъемности мостовых сооружений на автомобильных дорогах», ОДМ 218.3.027-2013 «Рекомендации по применению тканевых композиционных материалов при ремонте железобетонных конструкций мостовых сооружений» и Регламента по производству внешнего армирования композиционными материалами на основе углеродного волокна железобетонных пролетных строений автодорожных мостов для усло-

вий Республики Саха (Якутия), разработанного СГУПС и СВФУ по заказу Министерства транспорта и дорожного хозяйства РС(Я).

Стоит отметить, что действующие нормативные документы в полной мере не учитывают климатические особенности работы усиленных конструкций, что, безусловно, требует дополнительных исследований в этой области и постоянное наблюдение за работой опытных конструкций. В диссертационной работе Д.Н. Смердова [3] отмечены пробелы в нормативной документации, касающиеся оценки несущей способности железобетонных пролетных строений, усиленных композитными материалами. Автором утверждается, что данная оценка производится по зарубежным методикам, положенным в основу действующих международных норм по проектированию.

Применение указанных методик в Российской Федерации существенно ограничено, так как в них заложены гипотезы и подходы, отличающиеся от тех, что реализованы в российских нормах, кроме того в них не учитываются особенности работы конструкций в северной строительной-климатической зоне, что не позволяет получить достоверную информацию о напряженно-деформированном состоянии усиленных элементов. Кроме этого необходимо уточнить схемы армирования для наиболее распространенных в Республике Саха (Якутия) типов железобетонных пролетных строений.

#### Результаты мониторинга технического состояния

Результаты обследования, проведенные в 2011 г., показали, что мост через р. Протока не удовлетворял нормативным требованиям по грузоподъемности. Грузоподъемность пролетных строений была снижена вследствие уменьшения несущей способности балки №7 пролетного строения №2 из-за коррозии 2 стержней 3-го ряда арматуры в ребре балки, пониженной прочности бетона продольных швов монолитирования, а также по причине того, что существующие на тот момент конструкции усиления (металлическими тяжами) не были включены в работу. Фактическая грузоподъемность пролетных строений, рассчитанная с учетом фактических размеров конструкций и выявленных дефектов, составляла для нагрузки по схеме «АК» – 10,2 тс, по схеме НК-80 – 80 тс.

Все балки пролетных строений были усилены элементами из прокатного швеллера №24, одетого снизу на ребро и притянутого вертикальными и наклонными тяжами. Эксплуатация мостового сооружения происходит в условиях воздействия агрессивной среды, что привело к

ускоренному коррозионному износу конструкций. Продукты коррозии металлической арматуры увеличились в объеме и образовали продольные трещины в бетоне с последующей интенсификацией процесса коррозии, разрушением защитного слоя и потерей несущей способности конструкции.

На рис. 4 наглядно показано, что в швеллере усиления отсутствовало заполнение клеевыми составами. Также во всех тягах отсутствовало натяжение и, по сути, элементы усиления не были включены в совместную работу с балками и потому не выполняли функцию усиления.



Рис. 4. Скол бетона угла ребра балки БЗ над опорной частью на опоре №3 моста через р. Протока. Отсутствие клеевого заполнения в швеллере усиления

В целях обеспечения безопасной эксплуатации, повышения эксплуатационной надежности и долговечности моста через р. Протока произведено усиление железобетонных пролетных строений системой внешнего армирования композитными материалами на основе тканей и ламинатов из углеродных волокон.

Усиление балок пролетных строений произведено путем наклейки на боковые поверхности по низу ребер предварительно натянутых лент FibARM Tape-230/300 и ламинатов Sika CarboDur S1012, для фиксации концов элементов усиления, а так же для работы балок по поперечной силе выполнена наклейка хомутов из холстов композитного материала (рис. 5–6).

В 2016 г. визуальное обследование пролетных строений показало, что композитные материалы находятся в нормальном состоянии, видимые дефекты и повреждения отсутствуют.

#### Расчет грузоподъемности моста на четвертый год эксплуатации

Определение несущей способности усиленных пролетных строений выполнено с учетом изменения напряженно-деформированного состояния, вызванного включением полимерных композитных материалов (ПКМ) в совместную работу с



Рис. 5. Усиление композитной тканью FibARM Tape-230/300 из углеродного волокна производства ХК «Композит»



Рис. 6. Усиление ламелями Sika® CarboDur S1012

основным материалом пролетного строения. Расчет предполагает рассмотрение предельного состояния, при котором все элементы в сечении достигли своего предела прочности за исключением материала усиления, предельные напряжения в котором определяются по формулам (1) и (2), что ограничивает возможное разрушение бетонного основания, на которое наносится материал усиления, и возможное отслоение материала усиления по контакту «клей–бетон» по причине того, что бетон не может воспринять деформацию в нем.

Так как балки пролетного строения моста усилены одновременно как углеродными ламинатами, так и холстами, то расчет был произведен отдельно для обоих вариантов.

Предельные напряжения в композитном материале определяются по формулам (1) и 2:

$$\sigma_{fu} = E_f \varepsilon_{b,ult} = 0,45 \sqrt{\frac{B \cdot E_f}{nt_f}} \leq 0,9 R_{ft}. \quad (1)$$

Расчетные значения составляют: для холстов  $\sigma_{fu} = 33706,14$  МПа; для ламинатов  $\sigma_{fu} = 19091,9$  МПа.

$$\sigma_{fu2} = E_f \varepsilon_{b,ult} = \frac{h-d-x}{x}. \quad (2)$$

Расчетные значения составляют: для холстов  

$$\sigma_{fu2} = 240000 \cdot 0,0035 \cdot \frac{0,9 - 0,35 - 0,032}{0,032} = 13571,9$$

МПа; для ламинатов

$$\sigma_{fu2} = 240000 \cdot 0,0035 \cdot \frac{0,9 - 0,35 - 0,0672}{0,0672} = 9796,31$$

МПа.

Расчет по прочности нормальных сечений следует производить в зависимости от соотношения между значением относительной высоты сжатой зоны бетона  $\xi_R = x/h_0$  ( $h_0 = h - a_0$  – рабочая высота сечения,  $a_0$  – расстояние от нижней грани балки до приведенного центра тяжести арматуры и ПКМ), определяемым из соответствующих условий равновесия, и значением граничной относительной высоты сжатой зоны  $\xi$ , при которой предельное состояние бетона сжатой зоны наступает одновременно с достижением в растянутой стальной арматуре напряжения, равного расчетному сопротивлению  $R_s$ . Для этого должно выполняться условие:

$$\xi \leq \xi_R. \quad (3)$$

Значение граничной относительной высоты сжатой зоны бетона определяется по формулам:

$$\xi_R = \frac{0,85 - 0,008R_b}{1 + 0,0001R_s(4,545 - 0,145R_b)}, \quad (4)$$

$$\xi_R = h - (x/h_0). \quad (5)$$

Значения составляют  $\xi_R = 0,7$  м,  $\xi = 0,77$  м, при этом условие (3) принимает вид  $0,77 \text{ м} > 0,682 \text{ м}$ .

Чтобы оценить несущую способность нормального сечения, следует найти положение нейтральной оси сечения, определяемое в зависимости от положения границы сжатой зоны бетона. Исходя из условия (3), которое, согласно регламенту, определяет положение сжатой зоны, установлено, что граница сжатой зоны проходит в ребре.

Если граница сжатой зоны бетона проходит в ребре, положение нейтральной оси определяется по формуле:

$$x = \frac{R_s A_s + \sigma_{fu} (A_{f1} + A_{f2}) - 0,5(\sigma_{fu} - \sigma_{fu2}) A_{f2}}{R_b b_f} - \frac{R_{sc} A'_s + R_b (b_f - b) h_f}{R_b b_f}. \quad (6)$$

Граница сжатой зоны рассчитана по формуле (6) и составляет для холстов  $x = 0,35176374$  м, для ламинатов  $x = 0,25225823$  м.

Несущая способность усиленного ПКМ сечения определяется по формуле:

$$M^V = R_s A_s h_0 - 0,5 R_b b_f x^2 - R_{sc} A'_s a'_s + \sigma_{fu} A_{f1} h +$$

$$\sigma_{fu2} A_{f2} \left( h - \frac{d}{2} \right) + 0,5(\sigma_{fu} - \sigma_{fu2}) \left( h - \frac{1}{3d} \right) A_{f2}. \quad (7)$$

Предельный изгибающий момент, воспринимаемый сечением, усиленным холстами, составляет  $M^V = 3548,24$  кНм, ламинатами –  $M^V = 3107,49$  кНм.

Несущая способность по поперечной силе рассчитана по наклонной трещине в наиболее опасном сечении после усиления балки пролетного строения по формуле (8):

$$Q^V = 0,8 R_s \sum A_{si} \sin \alpha + \frac{0,8 R_s A_{sw} c}{s_w} + \quad (8)$$

$$\sum \sigma_{fu} A_{fi} \sin \varphi + \sum \sigma_{fu} A_{fw}.$$

Значение несущей способности сечения по поперечной силе, усиленного ламинатами и холстами, составляет  $Q^V = 6873,52$  кН.

### Обсуждение результатов

На основе теоретических и экспериментальных исследований особенностей работы полимерных композиционных материалов, проведенных в Сибирском государственном университете путей сообщения (СГУПС) с 2006 по 2011 г., а также опыта их использования для усиления железобетонных конструкций промышленных и гражданских сооружений в России и ряде зарубежных стран, в том числе в практике ремонта и реконструкции мостов, была показана целесообразность их применения в мостах. В 2012 г. сотрудниками СГУПС и СВФУ под руководством проректора СГУПС по научной работе Бокарева С.А., д.т.н., профессора были проведены совместные дополнительные экспериментальные исследования влияния отрицательных температур и попеременного замораживания и оттаивания на железобетонные конструкции, усиленные композитными материалами, и выявлена перспективность их использования для климатических условий Республики Саха (Якутия). Результаты мониторинга технического состояния усиленного моста через р. Протока также подтверждают целесообразность применения системы внешнего армирования в климатических условиях республики. Расчеты грузоподъемности показали, что усиление с использованием композиционных материалов на основе тканей и ламинатов из углеродных волокон позволило увеличить несущую способность пролетных строений по изгибающему моменту в 1,4 раза, по поперечной силе в 8,08 раза, при этом грузоподъемность моста соответствует требуемым классам нагрузки АК-14, НК-14, которые регламентирует ГОСТ Р 52748-2007, безотказность работы пролетных строений обеспечена.

Ведущие ученые в области внешнего армирования, такие как С.А.Бокарев, И.Г.Овчинников, доказали, что несмотря на высокую стоимость композитов (3806 руб. за погонный метр), использование их для усиления строительных конструкций по совокупности затрат оказывается более эффективным в сравнении с традиционными методами, так как при этом значительно сокращается трудоемкость производства, а также обеспечивается безопасный проезд автомобилей по мостовым сооружениям без остановки движения во время ремонтных работ [1, 4–6]. При использовании системы внешнего армирования может быть обеспечена экономия бюджетных средств Республики Саха (Якутия), выделяемых на ремонт мостовых сооружений с учетом количества железобетонных мостов, грузоподъемность которых в настоящее время является недостаточной и не отвечающей требованиям нормативных документов по нагрузке, что определяет практическую и социальную значимость данной работы [2].

#### Заключение

1. В рамках мониторинга за техническим состоянием моста через р. Протока в 2016 г. осуществлено обследование мостового перехода и собраны актуальные данные, необходимые для оценки напряженно-деформированного состояния пролетных строений моста.

2. С учетом изменения напряженно-деформированного состояния, вызванного включением полимерных композитных материалов в совместную работу с основным материалом пролетного строения, определена несущая способность усиленных пролетных строений. Результаты расчетов составили следующие значения: предельный изгибающий момент – 3548,24 кНм, предельная поперечная сила – 6873,52 кН. Усиление с использованием композиционных материалов на основе тканей и ламинатов из углеродных волокон позволило увеличить несущую способность пролетных строений по изгибающему моменту в 1,4 раза, по поперечной силе в 8,08 раза.

3. На основании полученных данных о напряженно-деформированном состоянии усиленных композитными материалами пролетных строений произведен расчет фактической грузоподъемности моста. По результатам расчетов грузоподъемность моста соответствует требуемым нормативным классам нагрузки АК-14,

НК-14, регламентируемых ГОСТ Р 52748-2007. Несмотря на «удовлетворительное» состояние моста по критерию «долговечность конструкций», грузоподъемность моста обеспечена за счет повышенного запаса несущей способности балок пролетного строения, которая была достигнута усилением системой внешнего армирования композитными материалами.

4. Применение системы внешнего армирования композитными материалами на основе тканей и ламинатов из углеволокна в качестве способа повышения несущей способности железобетонных пролетных строений является эффективным. Опыт эксплуатации усиленного композитами моста показал целесообразность и перспективность использования данной технологии в условиях Республики Саха (Якутия).

#### Литература

1. Овчинников И.Г., Валиев Ш.Н., Овчинников И.И., Зиновьев В.С., Умиров А.Д. Вопросы усиления железобетонных конструкций композитами: 1. Экспериментальные исследования особенностей усиления композитами изгибаемых железобетонных конструкций // Интернет-журнал «Науковедение». 2012. №4. С.1–22.
2. Хрюкин А.А., Смолина М.В. Анализ технического состояния железобетонных пролетных строений автодорожных мостов на дорогах Республики Саха (Якутия) // Мат-лы VIII Междунар. студенческой электронной научной конф. «Студенческий научный форум». 2016. С.1–4.
3. Смердов Д.Н. Оценка несущей способности железобетонных пролетных строений мостов, усиленных композитными материалами: Автореф. дис. ... к.т.н. Новосибирск, 2010. 16 с.
4. Бокарев С.А., Смердов Д.Н. Полимерные композиционные материалы в транспортном строительстве // Транспорт Урала. Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2016. №1. С. 24–30.
5. Бокарев С.А., Кобелев К.В., Слепец В.А. Усиление железобетонных элементов мостов полимерными композиционными материалами без остановки движения // Интернет-журнал «Науковедение». 2014. Вып. 5. 17 с.
6. Бокарев С.А., Смердов Д.Н. Исследование многократного замораживания и оттаивания на изменение несущей способности и деформативности изгибаемых железобетонных элементов, усиленных композиционными материалами // Транспорт Урала. Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2010. №3. С. 98–104.

Поступила в редакцию 11.11.2016