

УДК 624.272

КУДРЯВЦЕВ С. В.
КУДРЯВЦЕВ В. А.
ГУРЬЯНОВ Ю. В.



**Кудрявцев
Сергей
Владимирович**

кандидат технических наук,
доцент кафедры «Строительные конструкции»
Уральского федерального университета

e-mail: sterxy@gmail.com

Эффективное решение по увеличению грузоподъемности автомобильных мостов

Дано описание нового конструктивного решения по усилению несущих строительных конструкций балочных автомобильных мостов с использованием композитных материалов на основе углеродных и базальтовых волокон, приведены основные инженерные формулы для оценки несущей способности главных балок с учетом усиления.

Ключевые слова: мост, усиление, углепластик, базальтовое волокно, несущая способность.



**Кудрявцев
Владимир
Александрович**

заместитель генерального
директора по проектированию ЗАО «Уралспецэнерго-ремонт-Екатеринбург»

e-mail: kudva@list.ru

*KUDRYAVTSEV S. V.
KUDRYAVTSEV V. A.
GURJANOV U. V.
EFFECTIVE SOLUTION FOR INCREASE CARRYING CAPACITY OF ROAD BRIDGES*

A description is given of a new constructive solution to strengthen bearing beam structures of highway bridges using composite materials based on carbon and basalt fibers, presented basic engineering formulas for estimating the bearing capacity of the main beams, taking into account the reinforcement.

Keywords: bridge, reinforcement, carbon fiber, basalt fiber, bearing capacity.



**Гурьянов
Юрий
Владимирович**

директор ООО «НИИ
высокопрочные системы
усиления «ИНТЕР/ТЭК»

e-mail: inter-tec@mail.ru

По данным Росавтодора, общая протяженность сети автомобильных дорог России более 1 млн км, а к 2030 г. она должна достигнуть показателя в 1,7 млн км. В ближайшие годы предстоит как активное строительство новых, так и реконструкция старых автомобильных дорог для возможности пропуска транспортных потоков со все большей интенсивностью, а это, в свою очередь, приведет к увеличению нагрузки на искусственные сооружения дорожной сети, к которым относятся автомобильные мосты.

В то же время происходит постоянное ужесточение норм и увеличение нормативных нагрузок, на которые должны быть запроектированы новые и реконструированы существующие мосты. Зачастую изменение строительных норм и увеличение нагрузок влечет за собой необходимость в усилении пролетных строений мостов с увеличением их несущей способности. Кроме того, в эксплуатируемых мостовых конструкциях постоянно возникают различные дефекты и повреждения, связанные как с воздействием

внешней неблагоприятной среды, так и с физическим износом сооружения.

В настоящее время на федеральных и территориальных дорогах России эксплуатируется более 25 тыс. автомобильных мостов, из них более 90% составляют железобетонные мосты с типовыми пролетными строениями балочного типа с длиной пролетов до 24 м [1].

Существует несколько способов увеличения несущей способности реконструируемых пролетных строений мостов [2]:

- наращивание сечения нижней растянутой арматуры;
- устройство разгружающей шпренгельной системы из стальных профилей;
- устройство усиливающей системы из композитных материалов.

При этом варианты усиления с применением стальных арматурных и профильных элементов обладают рядом недостатков:

- увеличение собственного веса конструкции, что может быть существенно для сильно ослабленного сооружения;

- существенное уменьшение подмостового габарита;
- технологические сложности с соединением существующих и вновь устанавливаемых элементов для их совместной работы, необходимость вскрытия существующих арматурных стержней для приварки к ним новых;
- необходимость в дополнительных работах по антикоррозийной обработке стальных элементов усиления и периодических ремонтах антикоррозийного покрытия;
- снижение архитектурной выразительности и эстетических свойств усиленной конструкции, кроме того, психологический дискомфорт у населения от осознания «ненадежности» сооружения.

Системы усиления на основе композитных материалов лишены подобных недостатков, так как обладают ничтожно малым весом по сравнению со стальными элементами, не подвержены коррозии даже в агрессивных средах, высота сечения элементов усиления из композитного материала ничтожно мала и практически не изменяет подмостовой габарит сооружения. Кроме того, после соответствующей обработки усиленной поверхности (окраска, шпаклевка и т. п.) композитные элементы усиления незаметны невооруженным глазом и никак не меняют эстетических свойств сооружения.

На территории Российской Федерации с использованием композитных материалов уже усилено несколько десятков мостов, например: мост через р. Тишковку на 93 км трассы Кукуштан — Чайковский в Пермском крае [1], мост через р. Кехта на автодороге Москва — Архангельск [3], мост через р. Киржач на 94 км федеральной трассы М7 [3], мост через р. Черная в г. Соликамске Пермского края [4] и многие другие.

Усиление моста через р. Мулянка в Пермском крае

В июне 2013 г. потребовалось перевезти новую коксовую камеру массой 213 т для предприятия ООО «ЛУКОЙЛ-Пермнефтеоргсинтез». На пути движения автоколонны с тяжелым грузом оказался небольшой мост через р. Мулянка в пос. Большое Савино Пермского края, и возник вопрос о необходимости обследования технического состояния моста и усиления его для возможности пропуска автоколонны.

Обследование моста было выполнено специалистами ООО «НИИ ВСУ «ИНТЕР/ТЭК»» в июне 2013 г. Были определены фактические схемы

расположения элементов конструкций, размеры поперечных сечений и их соединений. Выполнена проверка соответствия конструкций имеющейся проектной документации, фактической геометрической неизменяемости, выявлены отклонения, повреждения, дефекты элементов и узлов конструкций. Уточнены фактические и прогнозируемые нагрузки и воздействия на строительные конструкции. Установлены физико-механические свойства материалов конструкций.

Строительство моста осуществлялось в 2003 г. Сооружение представляет собой однопролетный автодорожный мост с двумя береговыми опорами. Длина моста 18 м, общая ширина 7,84 м. Мост расположен в плане и в продольном профиле на прямой. Габарит проезжей части $\Gamma = 6,5$ м. На мосту и на подходах к мосту две полосы для движения — по одной полосе в каждую сторону. Тротуар выполнен только с одной стороны моста, ширина тротуара $T = 0,6$ м. Фотография общего вида моста приведена на Иллюстрации 1.

Конструкция моста образована двумя береговыми опорами, пролетным строением и мостовым полотном. Покрытие проезжей части асфальтобетонное. Толщина дорожной одежды на мосту составляет от 50 до 100 мм.

Пролетное строение моста образовано четырьмя сборными железобетонными балками таврового сечения, объединенными монолитной железобетонной плитой толщиной 150 мм в единую температурно-неразрезную бездиафрагменную конструкцию. Расстояние между балками 1,83 м. Схема расстановки балок в поперечном направлении $K1,175 + 1,83 \times 3 + K1,175$. Балки пролетного строения изготовлены по типовой серии 3.503.1–73. Полная длина балок 18 м. Высота балок 1050 мм, толщина пояса балки 150 мм, толщина ребра балки от 160 мм.

Балки пролетного строения опираются на полимерные опорные части размером 150 мм × 350 мм, высотой 70 мм, установленные на монолитные железобетонные постаменты береговых опор размером 500 мм × 500 мм, высотой 120 мм.

Береговые опоры монолитные железобетонные призматического очертания шириной 6,59 м, высотой до верха свайного ростверка 2,8 м. Фундаменты береговых опор свайные.

В процессе обследования были обнаружены следующие дефекты и повреждения строительных конструкций пролетного строения моста:

- разрушение защитного слоя бетона с оголением и коррозией про-



Иллюстрация 1. Общий вид автомобильного моста через р. Мулянка

дольной рабочей арматуры в двух балках пролетного строения в приопорной зоне;

- наклонные трещины на приопорных участках двух балок пролетного строения с шириной раскрытия до 0,1 мм, шаг трещин 500 мм;
- продольная трещина в монолитной железобетонной плите пролетного строения по оси моста с шириной раскрытия до 0,3 мм на всем протяжении пролетного строения;
- разрушение защитного слоя бетона с оголением и коррозией рабочей арматуры плиты проезжей части на участках сопряжения моста с берегом.

Статический расчет конструкций пролетного строения

Статический расчет элементов главных балок и плиты проезжей части моста выполнялся аналитическим путем. Пространственное распределение нагрузки на главные балки моста определялось по способу внецентренного сжатия [5]. При этом предполагается, что поперечные сечения пролетного строения не испытывают деформаций, т. е. имеют бесконечно большую жесткость, а плита проезжей части пролетного строения рассматривается как неразрезная балка на упругих опорах, в качестве которых принимаются главные балки. Таким образом, любая нагрузка, расположенная симметрично по отношению к продольной оси моста, распределяется между главными балками пропорционально их жесткости.

В расчете были учтены постоянные нагрузки от собственного веса строительных конструкций моста, определенные по результатам его натурного обследования, и временные нагрузки от автотранспортных средств по [6]. Кроме того, конструкции пролетного строения были рассчитаны на пропуск сверхнормативной подвижной нагрузки от автоколонны с коксовой камерой массой 213 т.

Максимальный изгибающий момент от расчетных нагрузок в середине пролета главных балок составил $M = 260$ тм, а максимальная поперечная сила на опоре главных балок

$Q = 61$ т. При этом несущая способность существующих неусиленных балок пролетного строения по моменту $M_{ult} = 194$ тм, а по поперечной силе $Q_{ult} = 54$ т.

Таким образом, по результатам проверочных расчетов главные балки пролетного строения моста не обладали достаточной несущей способностью для восприятия сверхнормативных нагрузок при транспортировке тяжелого оборудования, поэтому было принято решение об усилении главных балок пролетного строения и плиты проезжей части на участках с трещинами. В качестве элементов усиления была выбрана система из композитных материалов на основе углеродных и базальтовых волокон.

Конструктивные решения по усилению моста

Наиболее распространенным решением при усилении балок пролетных строений мостов композитными материалами является приклейка композитной ламели к нижней грани главных балок пролетного строения. В этом случае ламель может быть дополнительно закреплена на концах поперечными U-образными хомутами из полос композитной ткани.

Данное решение позволяет повысить несущую способность конструкции примерно на 15%, но к рассматриваемому случаю данный вариант неприменим, так как требуется повысить несущую способность главных балок более чем на 30%. Поэтому предложен новый способ увеличения несущей способности балок пролетного строения путем послыонного внешнего армирования композитным материалом в три этапа.

На первом этапе выполняется приклейка одной ламели шириной 100 мм из композитного материала ITECWRAP® CL1-140 к нижней грани балки и четырех ламелей шириной 100 мм из композитного материала ITECWRAP® CL1-140 к боковым граням балки (Иллюстрация 2).

На втором этапе выполняется приклейка полос шириной 500 мм из композитного материала ITECWRAP® CF1-011 к нижней грани балок. Полосы композитной ткани заводятся на 170 мм на боковые грани сечения с обеих сторон. Композитная ткань наклеивается в два слоя (Иллюстрация 3).

На третьем этапе выполняется приклейка поперечных U-образных полос шириной 250 мм из композитного материала ITECWRAP® CF1-011.

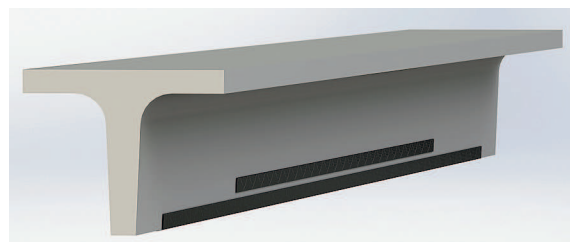


Иллюстрация 2. Первый этап усиления. Наклейка ламелей из композитного материала ITECWRAP® CL1-140

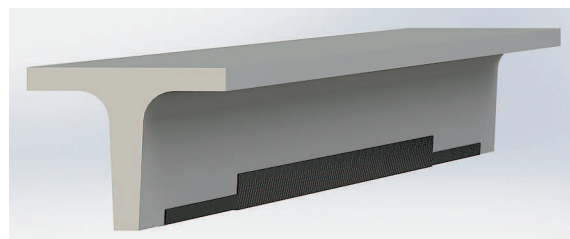


Иллюстрация 3. Второй этап усиления. Наклейка полос ткани из композитного материала ITECWRAP® CF1-011

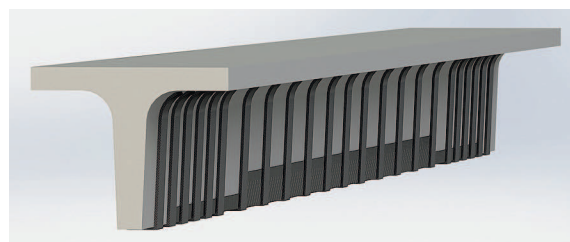


Иллюстрация 4. Третий этап усиления. Наклейка U-образных полос из композитного материала ITECWRAP® CF1-011

На участках длиной 3 м с обоих концов балки U-образные полосы приклеиваются в два слоя с шагом 500 мм, а в средней части балки U-образные полосы закрепляются с шагом 1000 мм. Такие элементы усиления выполняют двойную функцию: во-первых, увеличивают несущую способность балки по поперечной силе на приопорных участках, а во-вторых, дополнительно закрепляют полосы композитной ткани для лучшей их работы совместно с усиливаемой конструкцией (Иллюстрация 4).

Усиление плиты проезжей части предусмотрено полосами шириной 200 мм из композитного материала ITECWRAP® BF1-016. Приклейка полос усиления выполняется к нижней грани плиты с шагом 500 мм в направлении поперек оси моста. Поперечные полосы усиления дополнительно закреплены продольными полосами для лучшей работы совместно с усиливаемой плитой.

Приклейка полос и ламелей композитного материала осуществляется клеем ITECRESIN® AS2-300 на основе эпоксидной смолы.

Технические характеристики примененных композитных материалов приведены в Таблице 1.

Оценка несущей способности главных балок, усиленных композитными материалами

Оценка несущей способности главной балки по нормальным сечениям на действие изгибающего момента (Иллюстрация 5) может быть выполнена согласно [7, 8] из выражения

$$M \leq R_s A_s (h_{01} - 0,5x) + R_{fu} A_f (h_{02} - 0,5x), \quad (1)$$

где R_s – расчетная прочность растянутой стальной арматуры;

Таблица 1. Технические характеристики примененных композитных материалов

Наименование материала	ITECWRAP® CL1-140	ITECWRAP® CF1-011	ITECWRAP® BF1-016
Тип материала	Ламель на основе углеродных волокон	Ткань на основе углеродных волокон	Ткань на основе базальтовых волокон
Модуль упругости $M = 260$, МПа	170 000	230 000	91 000
R_f , МПа	3 100	4 900	2 100
R_{fu} , МПа	1 070	3 200	1 200
Толщина монослоя t_f , мм	1,4	0,111	0,16
C_E	0,85	0,8	0,7
k_m	0,45	0,9	0,9
Удельный вес, кг/м ²	0,21	0,2	0,4

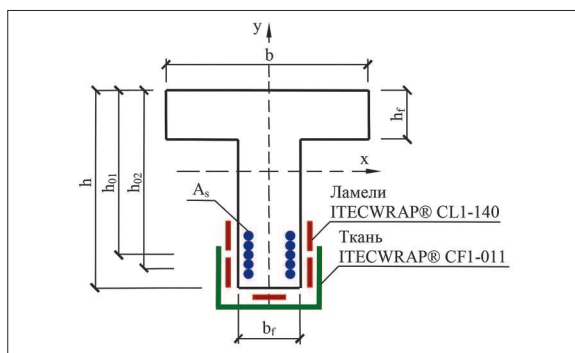


Иллюстрация 5. Расчетное сечение в пролете балки

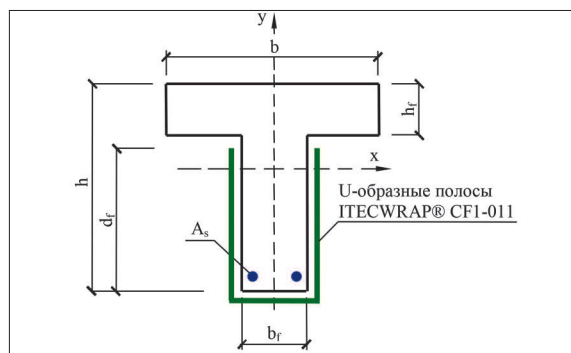


Иллюстрация 6. Расчетное сечение вблизи опоры балки

A_s – площади поперечного сечения растянутой арматуры;
 h_{01} , h_{02} – расстояния от верхней сжатой грани сечения до центра тяжести растянутой стальной и композитной арматуры соответственно;

$R_{fu} = k_m \cdot \frac{C_E}{\gamma_m} \cdot R_f$ – прочность композитного материала

при изгибе;

R_f – расчетная прочность композитного материала при растяжении;

k_m – коэффициент условий работы композитного усиления, зависящий от жесткости элементов усиления;

C_E – коэффициент условий работы композитного материала;

$\gamma_m = 1,1$ – коэффициент надежности композитного материала;

A_f – площадь поперечного сечения композитной арматуры;

$x = \frac{R_s A_s + R_{fu} A_f}{R_b \cdot b}$ – высота сжатой зоны бетона.

Несущую способность главной балки по наклонным сечениям на действие поперечной силы (Иллюстрация 6) можно оценить из выражения

$$Q \leq Q_b + Q_{sw} + Q_{s,inc} + \frac{0,85 \cdot A_{f,sh} \cdot \sigma_{fu} \cdot d_f}{s_f}, \quad (2)$$

где Q_b , Q_{sw} , $Q_{s,inc}$ – соответственно поперечные усилия, воспринимаемые бетоном сжатой зоны, поперечной стальной арматурой и отогнутыми стержнями продольной арматуры в сечении, определяемые по [7];

$A_{f,sh}$ – площадь сечения поперечной композитной арматуры;

σ_{fu} – напряжения в композитной арматуре в предельном состоянии;

s_f – шаг наклейки U-образных композитных полос усиления.

Выбранная конструктивная схема усиления пролетного строения моста позволяет повысить несущую способность балок пролетного строения на 38% по изгибающему моменту и на 16% по поперечной силе. Таким образом, несущая способность конструкции после усиления составила по изгибающему моменту $M_{ult} = 268$ тм, а по поперечной силе $Q_{ult} = 63$ т, что достаточно для восприятия расчетных усилий, возникающих при движении автоколонны со сверхнормативной нагрузкой.

Заключение

1 Предложенный в данной работе новый способ усиления сборных железобетонных балок пролетных строений мостовых конструкций послойным армированием композитными материалами позволяет повысить их несущую способность более чем в два раза по сравнению

с существующими способами усиления композитными материалами.

- 2 Предложенный способ усиления, при отсутствии значительных технических недостатков, обладает также целым рядом достоинств по сравнению с различными способами усиления стальными профилями.
- 3 Основываясь на опыте эксплуатации подобных сооружений [1, 3, 4, 9], можно сделать вывод, что применение композитных материалов является эффективным и надежным способом увеличения несущей способности строительных конструкций автомобильных мостов и может быть рекомендовано для применения на других подобных конструкциях.
- 4 Применение композитных материалов позволяет существенно ускорить и упростить процесс реконструкции эксплуатируемых автомобильных мостов, а значит, дает возможность пропуска больших транспортных потоков и увеличения скорости их движения, что в конечном итоге неминуемо приведет к улучшению качества жизни всех жителей России.

Список использованной литературы

- 1 Смердов Д. Н. Оценка несущей способности железобетонных пролетных строений мостов, усиленных композитными материалами : автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.23.11. Новосибирск, 2010.
- 2 Усиление железобетонных балочных пролетных строений автодорожных мостов. Обзорная информация. М., 1987. Вып. 2.
- 3 Хаютин Ю. Г., Чернявский В. Л., Аксельрод Е. З. и др. Усиление железобетонных конструкций автомобильных мостов композитными материалами [Электронный ресурс]. URL: http://www.interaqua.biz/stat_8.pdf, свободный.
- 4 Усиление железнодорожного моста в Соликамске [Электронный ресурс]. URL: <http://carbon66.ru/usilenie-mosta-solikamsk/>.
- 5 Поливанов В. И. Проектирование и расчет железобетонных и металлических автодорожных мостов. М., 1970.
- 6 ГОСТ Р 52748–2007. Дороги автомобильные общего пользования. Нормативные нагрузки, расчетные схемы нагружения и габариты приближения. М., 2008.
- 7 СП 35.13330.2011. Мосты и трубы. Актуализированная редакция. СНиП 2.05.03–84*/Минрегион России. М., 2011.
- 8 Руководство по усилению железобетонных конструкций композитными материалами/ООО «Научно-исследовательский институт высокопрочных систем усиления «ИНТЕР/ТЭК». Екатеринбург, 2010.
- 9 Кудрявцев С. В. Оценка несущей способности железобетонных ступитителей, усиленных композитными материалами // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2013. № 2. С. 91–96.