

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» <https://t-s.today>

Russian journal of transport engineering

2020, №2, Том 7 / 2020, No 2, Vol 7 <https://t-s.today/issue-2-2020.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/05SATS220.pdf>

DOI: 10.15862/05SATS220 (<http://dx.doi.org/10.15862/05SATS220>)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Балдин Д.Ю., Краев А.Н., Жайсамбаев Е.А. Сравнительный анализ способов усиления железобетонных тавровых балок // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2020 №2, <https://t-s.today/PDF/05SATS220.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/05SATS220

For citation:

Baldin D.Yu., Kraev A.N., Zhaisambaev E.A. (2020). Comparative analysis of reinforced concrete tee beams reinforcement methods. *Russian journal of transport engineering*, [online] 2(7). Available at: <https://t-s.today/PDF/05SATS220.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/05SATS220

УДК 624.21/.8

ГРНТИ 67.29.63

Балдин Данил Юсупович

ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, Россия
Магистрант, 2 курс
E-mail: danil.baldin@mail.ru

Краев Андрей Николаевич

ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, Россия
Доцент кафедры «Строительных конструкций»
Кандидат технических наук
E-mail: kraev-an@mail.ru
РИНЦ: http://elibrary.ru/author_profile.asp?id=761631

Жайсамбаев Еркен Аскерович

ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, Россия
Магистрант
E-mail: zhaysambaeverkn@mail.ru
РИНЦ: http://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1028545
SCOPUS: <http://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57202306280>

Сравнительный анализ способов усиления железобетонных тавровых балок

Аннотация. В связи с увеличением требований, предъявляемых к транспортным сооружениям, возникает необходимость их усиления. Статья посвящена анализу методов усиления несущих железобетонных конструкций транспортных сооружений. Автор отмечает, в какой период жизни моста, ему требуется усиление, какие трудности сопутствуют усилению конструкций, и какие основные методы усиления существуют на сегодняшний день. Чтобы выбрать оптимальный метод усиления необходимо производить поверочные расчеты, изучать зону, требующую усиления, учитывать, во сколько раз увеличится несущая способность и не возникнут ли дополнительные силовые воздействия. В данной статье приводятся достоинства и недостатки усиления приваркой дополнительной арматуры и приклеиванием композитного материала. Автором произведен расчет усиления растянутой зоны тавровой железобетонной балки пролетного строения дополнительной арматурой и композитными материалами. На

основе произведенных расчетов выдвинуты рекомендации об актуальности применения того или иного способа усиления конструкции.

Ключевые слова: транспортное сооружение; железобетонная балка пролетного строения; расчет усиления; несущая способность; метод предельных состояний; приварка дополнительной арматуры; композитные материалы; ламинаты; холсты; изгибающий момент

Введение

Транспортная инфраструктура не будет функционировать без такой важной составляющей, как мостовые сооружения. В нашей стране дорожная сеть имеет недостаточное развитие, в связи с этим одной из задач правительства является строительство дорог и транспортных сооружений на них, в основном мостов и водопропускных труб. Основным материалом пролетных строений и опор мостовых сооружений является железобетон. С течением времени увеличиваются нагрузки и воздействия на транспортные сооружения, а материал подвергается деградации, приводящей к снижению несущей способности элементов мостов и грузоподъемности самих мостовых сооружений. Встает вопрос об усилении элементов мостовых сооружений. На выбор способа усиления влияет много разных факторов, в связи с этим важно выбрать наиболее эффективный способ усиления мостовых конструкций.

Анализ состояния проблемы

Строительные, в том числе и мостовые, конструкции рассчитываются по методу предельных состояний, в основе которого лежит принцип – обеспечение безотказной работы конструкций с учетом изменчивости свойств материалов, нагрузок и воздействий, геометрических характеристик конструкций, условий их работы, а также степени ответственности проектируемых объектов, определяемым материальным и социальным ущербом при нарушении их работоспособности. Конструкция становится непригодной к эксплуатации или полностью теряет несущую способность при невыполнении условий первой группы предельных состояний [1].

Расчет по предельным состояниям производится на всех этапах: изготовление, транспортирование, монтаж, эксплуатация, ремонт и усиление.

Усиление служит для повышения качества конструкции и всего сооружения в целом для его дальнейшей нормальной эксплуатации, в частности, усиление направлено на повышение несущей способности, жесткости, трещиностойкости конструкций и производится, когда мостовое сооружение перестает соответствовать нормативным требованиям [2].

Усиление может столкнуться с рядом проблем, таких как разница в возрасте усиливаемых конструкций, применяемых ранее и сейчас, стесненность выполнения работ, невозможность обеспечения достаточной безопасности проведения работ и так далее [3].

Возможную схему разрушения конструкции можно установить поверочными расчетами, на основе которых делается выбор способа усиления. В железобетонных элементах общем случае могут происходить разрушения:

- растянутой зоны;
- сжатой зоны;
- зоны среза от поперечных сил;
- по пространственному сечению от крутящего момента;

- зоны местного сжатия;
- по отрыву и продавливанию.

При выборе способа усиления необходимо учитывать, насколько увеличится несущая способность, также нужно помнить о том, что при устранении одного вида разрушения, может реализоваться другой вид от иных силовых воздействий.

Усиление осуществляется с помощью стальных элементов, бетона, железобетона и полимерных композитных материалов в наиболее слабых зонах.

Усиливающий элемент должен включиться в работу, помимо этого должна быть обеспечена совместная работа усиливаемого элемента и элемента усиления, при этом нужно учитывать несущую способность как усиливаемого (кроме случаев, когда конструкция сильно разрушена), так и усиливающего элемента. Основной бетон и бетон усиления должен иметь по возможности одинаковые механические характеристики.

Способы усиления индивидуальны и имеют свою специфику. Они классифицируются в зависимости от схемы разрушения:

1. ***Усиление растянутой зоны:***

- Приварка дополнительной арматуры.
- Приклейка дополнительной арматуры.
- Приклейка стальных пластин.
- Предварительное напряжение наружными прядями.
- Приклейка ламината из полимерных композитных материалов.

2. ***Усиление сжатой зоны:***

- Увеличение площади поперечного сечения обоймой, рубашкой.
- Дополнительная арматура в сжатую зону.
- Ограничение поперечных деформаций.
- Установка дублирующих элементов.
- Применение полимербетонных композиций.

3. ***Усиление зоны среза от действия поперечных сил:***

- Увеличение площади поперечного сечения обоймой, рубашкой.
- Установка дополнительной поперечной арматуры в виде хомутов, стержней, планок и др.
- Применение полимербетонных композиций.
- Применение холстовых композитных материалов.

4. ***Усиление при кручении, местном сжатии и продавливании:***

- Увеличение площади поперечного сечения обоймами, рубашками.
- Установка дополнительной замкнутой поперечной арматуры.
- Уширение площади опирания.
- Применение холстовых композитных материалов.

5. *Изменение расчетной схемы:*

- Изменение места передачи нагрузки.
- Повышение степени внешней статической неопределенности.
- Повышение степени внутренней статической неопределенности.

Помимо вышеперечисленного, усилением также считается разгрузка конструкций.

Наиболее распространенными железобетонными изгибаемыми элементами являются плиты и балки, они могут быть одно- и многопролетными.

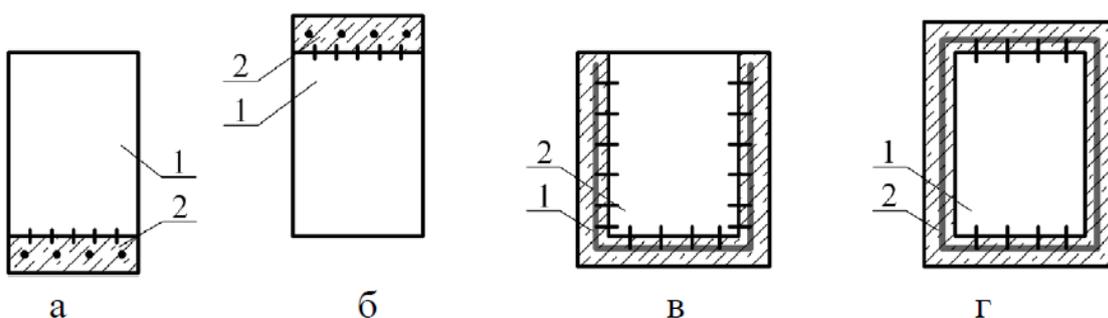
Постановка задачи, методы решения и результаты

В данной работе выполняется сравнительный анализ двух способов усиления железобетонной типовой тавровой балки пролетного строения мостового сооружения.

С течением времени в балке накапливаются повреждения, и ее несущая способность уменьшается. В качестве способов восстановления несущей способности будут рассматриваться усиление нижней растянутой грани балки способом приварки дополнительной арматуры и способом приклеивания полимерного композитного материала.

Усиление способом приварки арматуры

Увеличение поперечного сечения (рис. 1) один из самых старых и распространенных способов усиления. Суть способа в присоединении железобетона и обеспечении совместной работы. Увеличение сечения может быть наращиванием, рубашкой и обоймой. Данный способ снижает гибкость конструкции, вследствие увеличения жесткости.



1 – усиливаемая конструкция; 2 – усиливающий элемент

Рисунок 1. Способы увеличения поперечного сечения [2]:
а, б – односторонним наращиванием; в – рубашкой; г – обоймой

При одностороннем наращивании через корытшей или наклонные стержни дополнительная арматура приваривается к рабочей для обеспечения совместной работы. Вдоль стенки устанавливаются короткие хомуты и косые стержни, которые привариваются к ранее установленной арматуре. Затем зону усиления бетонируют в опалубке, уплотняя вибраторами, используется смесь пластичной консистенции класса не ниже В25. Если нужно улучшить только восприятие главных растягивающих напряжений, то балки заключаются в железобетонную оболочку, армированную косыми стержнями и хомутами.

Для приварки дополнительной арматуры может использоваться соединение внахлест с отбивкой защитного слоя по всей длине (рис. 2) или же защитный слой отбивается только там,

где будут привариваться коротыши, толщина которых превышает толщину защитного слоя (рис. 3).

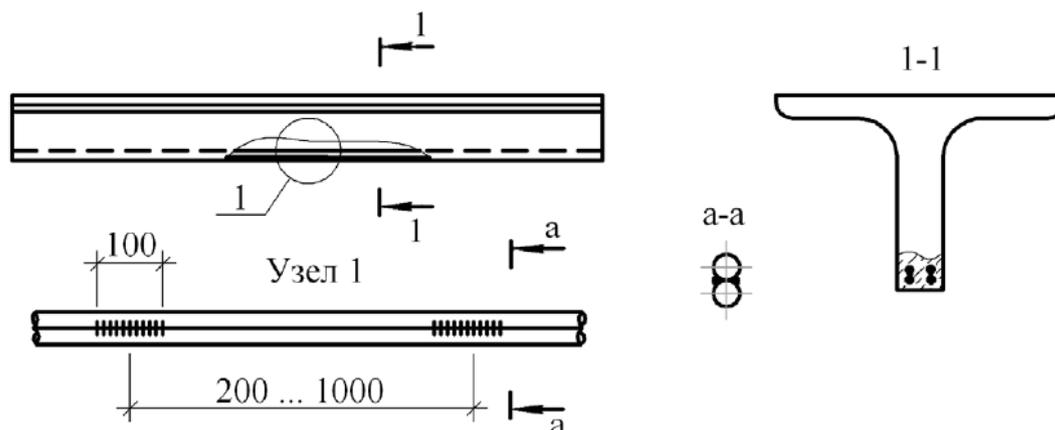
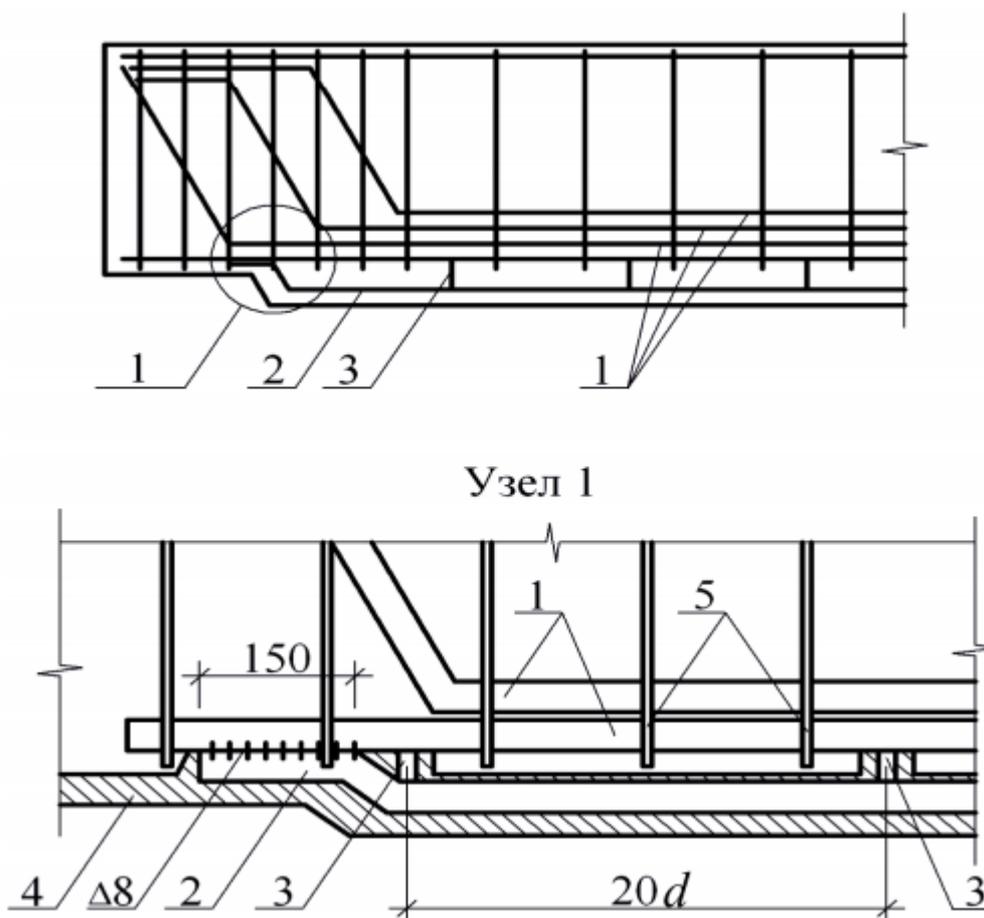


Рисунок 2. Усиление растянутой зоны приваркой дополнительной арматуры способом внахлест [2]



1 – рабочие стержни балки; 2 – стержень усиления (по расчету); 3 – коротыши высотой 30–35 мм; 4 – торкретбетон; 5 – хомуты; d – больший диаметр из поз. 1, 2.

Рисунок 3. Усиление растянутой зоны приваркой дополнительной арматуры с помощью коротышей [2]

Если арматура не заведена за грань опоры усиливаемой конструкции или арматура преднапряженная, то к такой арматуре нельзя приваривать дополнительную арматуру.

Дополнительную арматуру можно преднапрягать электротермическим методом, если не предполагается разгрузка конструкции. Усиливающий стрежень одним концом приваривается к рабочей арматуре, затем по нему пропускается ток от сварочного трансформатора, после этого приваривается второй конец, при этом температура не должна превышать 300–400 градусов по Цельсию.

Преимущества метода увеличения площади поперечного сечения:

- относительная простота и экономичность;
- повышение жесткости, уменьшение гибкости, что важно для сжатых и сжато-изогнутых элементов.

Недостатком является различие деформационных характеристик старого и нового бетона, что говорит об их несовместимости. В новом бетоне образуются трещины, что приводит к его отслоению по причине возникновения дополнительных растягивающих напряжений.

До бетонирования наносится полимерцементная прослойка. При бетонировании используется смесь на мелком щебне класса не ниже В25. Старый и новый бетон несовместимы, так как различаются их деформационные характеристики, что является главным недостатком способа. Происходит отслоение нового бетона от старого, так как в новом бетоне появляются трещины по причине того, что в нем возникают дополнительные растягивающие напряжения.

Материал усиления должен располагаться как можно дальше от нейтральной оси. Необходимо внимательно следить за не смещением осей симметрии, когда добавляется металл, когда усилия регулируются искусственно, следить нужно еще внимательнее.

Усиление способом приклейки полимерного композитного материала

При усилении конструкций полимерными композитными материалами, наклеивается материал, придающий лучшую прочность на растяжение, чем арматурная сталь (рис. 4) практически без увеличения веса.

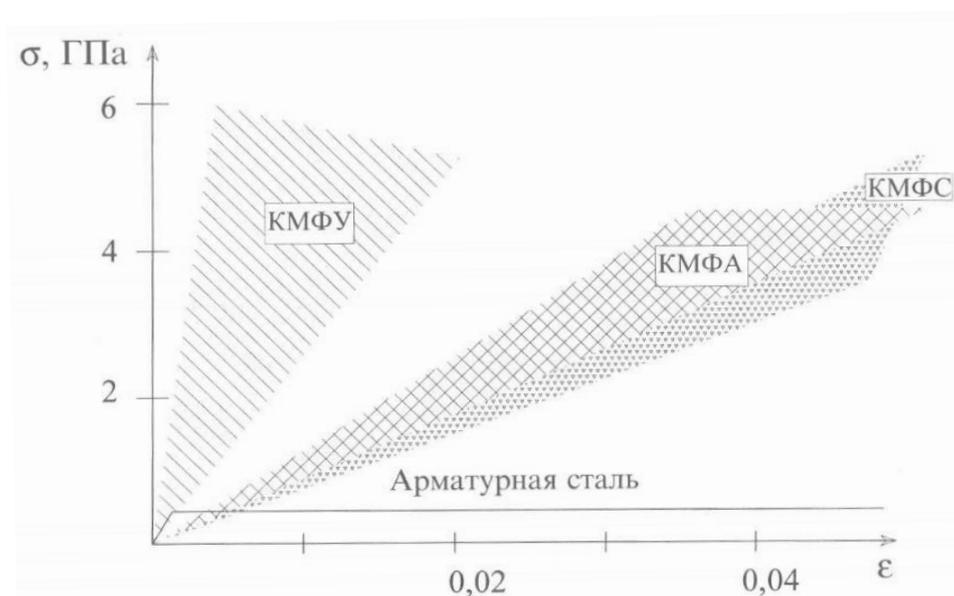


Рисунок 4. Диаграмма «напряжение-деформация» для различных типов КМФ и арматурной стали [1]

Установка композитных материалов на основе фибры (КМФ) простая, что важно для работы в стесненных условиях. При использовании КМФ не нужно длительное время поддерживать его специальными конструкциями, что существенно уменьшает трудоемкость, также работы становятся более безопасными. Прочность сечения будет сохранена, не будут повреждаться бетон и арматура, потому что не будут применяться анкерные устройства.

Внешнее армирование представляет собой матрицу – непрерывную фазу и армирующие углеродные волокна [4]. В общем случае полимерный композитный материал – это волокна, отвержденные в эпоксидном полимере. Отверждающий полимер защищает волокна от внешних агрессивных сред и перераспределяет нагрузку между ними, а сами волокна воспринимают внешние силовые воздействия.

Ламинаты представляют собой омоноличенные в полимере жесткие полосы и пластины из тонких углеродных, стеклянных, полиэфирных, арамидных волокон. Ламинаты формируются в бухты диаметром около одного метра и в таком виде доставляются на площадку, где режутся на ленты любой длины [5].

Гибкая ткань с одно- или двунаправленным расположением волокон называется холстом, что является еще одним типом полимерных композитных материалов. Его плотное прилегание к конструкции обеспечивается полимерным клеем, что называется способом применения «по месту». Длина холстов может быть любой.

Наиболее распространенные способы изготовления полимерных композитов:

- между высокотемпературными матрицами до их формования и застывания вытягиваются углеродные ровницы, пеки или пряжи, пропитанные смолой – это автоматический способ;
- для более позднего изготовления с помощью прессформы пропитанные полимером пряжи или нити находятся в плоской форме при очень низкой температуре – это прессовочный способ;
- застывшая часть формируемой массы композита разрезается по длине на отдельные полосы – это ручное формование в виде необходимого профиля.

Преимущества КМФ:

- материалы на основе углеродных, арамидных и стекловолокон по сравнению со сталью имеют в 4–5 раз меньший удельный вес, при этом прочность на растяжение и модуль упругости значительно больше;
- более безопасный и менее трудоемкий процесс наклейки по причине того, что материал имеет небольшой удельный вес;
- усиливаемая конструкция не повреждается, так как не требуется анкеровка;
- не нужно соединять полосы, так как они изготавливаются любой длины и привозятся в рулонах;
- легко поддаются предварительному напряжению;
- материал гибкий, способный принимать очертания конструкции, что дает возможность усиливать железобетонные конструкции;
- нет необходимости защищать от воздействия окружающей среды, материалы обладают высокой выносливостью и долговечностью;
- возможность выполнения работ во время эксплуатации сооружения;

- для увеличения несущей способности материал наклеивается в двух направлениях, что выполнимо, благодаря малой толщине КМФ.

Недостатками являются отсутствие достаточно апробированных отечественных нормативных документов, где прописаны расчеты усиления, правила проектирования, технология устройства работ, возможность случайного повреждения незащищенной конструкции, отказ от вандализма и пожара. Для благоприятной работы усиливаемой конструкции нагрузки должны быть распределены следующим образом: постоянная нагрузка воспринимается усиливаемой конструкцией, а вся временная нагрузка воспринимается композитным усилением. Специальные покрытия могут обеспечить защиту от вандализма и пожара [7].

На стоимость работ по усилению различными способами влияет множество факторов, к тому же тяжело учесть эксплуатационные расходы и расходы, связанные с временным прекращением эксплуатации. Работы по усилению КМФ производительны, что нужно учитывать в смете, также нужно учитывать количество и стоимость будущих ремонтов, не забывая об альтернативных способах усиления.

Условия работы конструкций различны, поэтому областями усиления являются:

- растянутая зона сечения железобетонной балки или плиты;
- места, где есть риск возникновения наклонных трещин, то есть на приопорных участках;
- по периметру конструкции на внецентренно сжатых колоннах.

Для полимерных композитов не требуется дополнительных мероприятий по защите от воздействия окружающей среды, также КМФ обладают хорошей выносливостью и долговечны. В случае неполадок усиление из полимерного композита легко ремонтируется наклейкой дополнительного слоя [8].

Диаметр волокон, их распределение в матрице, параллельность, местные дефекты материала и объемное соотношение волокон и полимера влияют на микромеханические процессы деформирования и разрушения, которые определяют поведение композитов под нагрузкой [9].

Свойства волокон и площадь их поперечного сечения определяют механические свойства материала, так как модуль упругости и прочность волокон намного больше, чем у отверждающего полимера [10].

Клеящий состав воспринимает сдвиговые и отрывающие усилия между склеиваемыми поверхностями. Чаще всего используются эпоксидные двухкомпонентные клеящие составы, способные схватываться при окружающей температуре.

От температурно-влажностного режима окружающей среды и склеиваемых поверхностей, скорости твердения и особенностей применения адгезива зависит выбор его типа.

Если перед усилением требуется выровнять поверхность, то бетон специального праймерного состава должен иметь с одной стороны физико-механические свойства сопоставимые со старым бетоном, а с другой стороны – со свойствами адгезива. Требуемое сцепление с полимерным композитным материалом будет обеспечено, если поверхность будет чистая и ровная.

После усиления мосты требуют оценки их состояния, актуальные проблемы этого описаны в [11].

Расчеты при усилении железобетонных тавровых балок

Для оценки эффективности применения различных типов усиления в рамках данной статьи были рассчитаны два варианта усиления железобетонной тавровой балки:

1. Усиление металлической арматурой.

Принимается тавровая балка Б1500.130.93-Т28АШс. Б – тип конструкции: балка; 1500 – длина балки в см; 130 – ширина плиты балки по бетону в см (рис. 5); 93 – высота балки в см; 28АШ – диаметр и класс рабочей арматуры (рис. 6, 7); с – рабочая арматура в сварных каркасах.

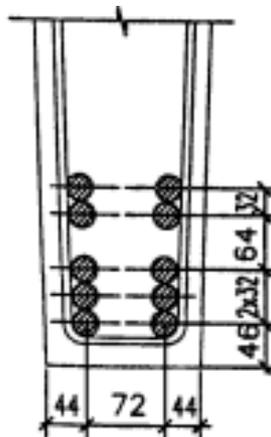


Рисунок 5. Армирование растянутой зоны балки Б1500.130.93-Т28АШс

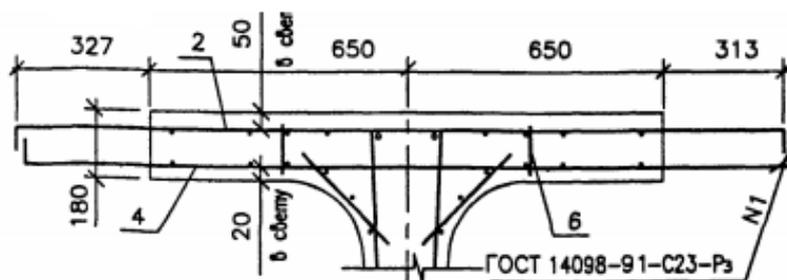


Рисунок 6. Армирование полки балки Б1500.130.93-Т28АШс

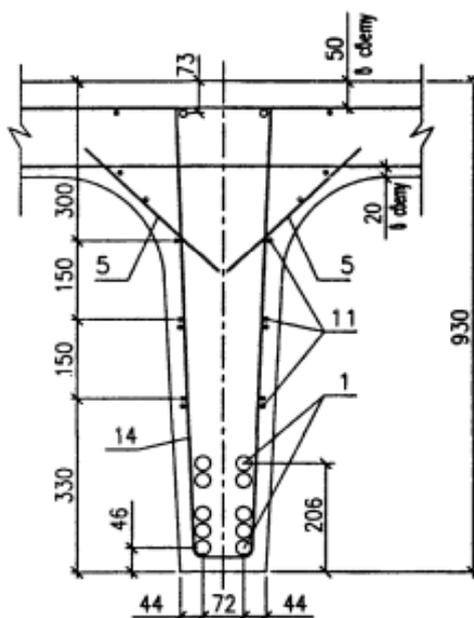


Рисунок 7. Армирование балки Б1500.130.93-Т28АШс

Модуль упругости бетона В25: $E_b = 30000$ МПа; модуль упругости арматуры А400: $E_s = 200000$ МПа; Расчетное сопротивление растяжению и сжатию арматуры А400: $R_s = 355$ (3600) МПа (кгс/см^2) = $R_{s,ad} = R_{sc}$; Расчетное сопротивление бетона сжатию: $R_b = 14.5$ МПа;

Площадь сечения одного стержня арматуры:

$$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{3.14 \cdot 2.8^2}{4} = 6.16 \text{ см}^2.$$

Центр тяжести рабочей арматуры:

$$y_0 = \frac{A_1(y_1+y_2+y_3+y_4+y_5)}{5 \cdot A_1} = \frac{6.16(20.6+17.4+11.0+7.8+4.6)}{5 \cdot 6.16} = 12.3 \text{ см.}$$

Расстояние от верхней грани до центра тяжести рабочей арматуры:

$$h_0 = h - y_0 = 93 - 12.3 = 80.7 \text{ см.}$$

Площадь сечения сжатой арматуры в полке:

$$A_{sc} = \frac{2 \cdot 3.14 \cdot 1.6^2}{4} = 4.1 \text{ см}^2.$$

Площадь сечения рабочей арматуры:

$$A_s = 61.6 \text{ см}^2.$$

Рассчитывается несущая способность балки до усиления.

Определяется положение нейтральной оси. Если удовлетворяется неравенство:

$$R_s \cdot A_s \leq R_b \cdot b'_f \cdot h'_f + R_{sc} \cdot A'_{s}; \quad (1)$$

$$221.76 \text{ т} \leq 354.06 \text{ т.}$$

Условие выполняется, значит, нейтральная ось располагается в пределах полки, тогда значение сжатой зоны:

$$x = \frac{R_s A_s - R_{sc} A'_s}{R_b b'_f} = \frac{3600 \cdot 61.6 - 3600 \cdot 4.1}{145 \cdot 130} = 11 \text{ см.}$$

Несущая способность не усиленного сечения:

$$\begin{aligned} M_{ult} &= R_b \cdot b'_f \cdot x \cdot (h_0 - 0.5x) + R_{sc} \cdot A'_s \cdot (h_0 - a') = \\ &= 14.5 \cdot 1.3 \cdot 0.11 \cdot (0.807 - 0.5 \cdot 0.11) + 355 \cdot 0.00041 \cdot (0.807 - 0.073) = 166.7 \text{ т} \cdot \text{м.} \end{aligned}$$

Рассчитывается усиление нижней растянутой грани балки способом приварки дополнительной арматуры.

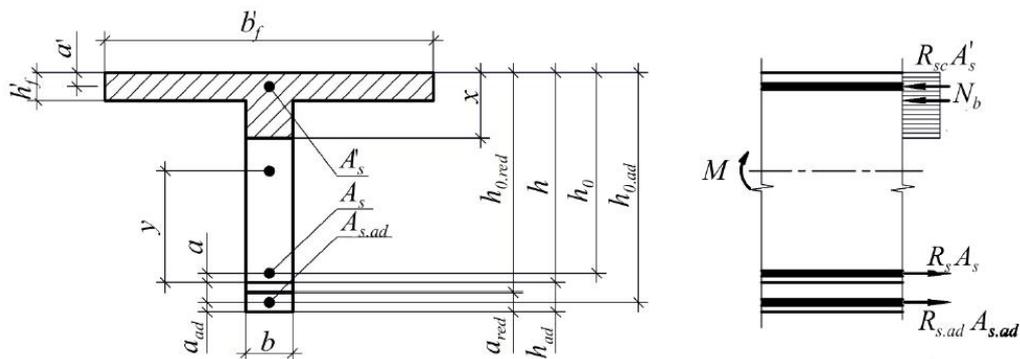


Рисунок 8. Расчетная схема изгибаемого элемента таврового сечения с усиленной растянутой зоной (составлен авторами)

Расчет данного усиления может производиться только при условии наступления предельного состояния усиленных конструкций одновременно с достижением в существующей и дополнительной арматуре расчетных сопротивлений. Данное условие достижимо только в случае совместной работы арматуры [12].

На рис. 8 приняты следующие обозначения: b'_f – ширина полки; h'_f – толщина полки; a' – защитный слой сжатой арматуры; A'_s – площадь сжатой арматуры; x – высота сжатой зоны бетона; y – расстояние от растянутой грани до центра тяжести сечения элемента до усиления; b – ширина элемента усиления; a – защитный слой растянутой существующей арматуры; h – высота элемента; h_{ad} – высота усиления; A_s – площадь сечения растянутой существующей арматуры; $A_{s.ad}$ – площадь сечения растянутой дополнительной арматуры, $A_{s.ad} = 4 \cdot 6.16 = 24.7 \text{ см}^2$; a_{ad} – защитный слой дополнительной арматуры; a_{red} – расстояние от растянутой грани усиленного сечения до центра тяжести приведенной растянутой арматуры; h_0 ; $h_{0.ad}$; $h_{0.red}$ – соответственно рабочая высота растянутой арматуры: существующей, дополнительной, приведенной:

$$h_{0.red} = \frac{h_0 \cdot R_s \cdot A_s + h_{0.ad} \cdot R_{s.ad} \cdot A_{s.ad}}{R_s \cdot A_s + R_{s.ad} \cdot A_{s.ad}}, \quad (2)$$

$$h_{0.ad} = 101 \text{ см};$$

$$h_{0.red} = \frac{80,7 \cdot 61,6 + 101 \cdot 24,7}{61,6 + 24,7} = 86,6 \text{ см}.$$

Определение высоты сжатой зоны:

$$R_s \cdot A_s + R_{s.ad} \cdot A_{s.ad} - R_b \cdot b'_f \cdot x - R_{sc} \cdot A'_s = 0; \quad (3)$$

$$3600 \cdot 61.6 + 3600 \cdot 24.7 - 3600 \cdot 4.1 = 145 \cdot 130 \cdot x;$$

$$x = 15,7 \text{ см};$$

Должно соблюдаться условие $\xi \leq \xi_R$:

$$\xi = \frac{x}{h_{0.red}} = \frac{15.7}{86.6} = 0.182;$$

$$\xi_R = \frac{0.8}{1 + \frac{\varepsilon_{s,el}}{\varepsilon_{b,ult}}} = \frac{0.8}{1 + \frac{0.0018}{0.0035}} = 0.54;$$

$\varepsilon_{s,el}$ – относительная деформация растянутой арматуры при напряжениях, равных R_s :

$$\varepsilon_{s,el} = \frac{R_s}{E_s} = \frac{355}{2 \cdot 10^5} = 0.0018;$$

$\varepsilon_{b,ult}$ – относительная деформация сжатого бетона при напряжениях, равных R_b , принимаемая равной 0,0035.

$$\xi = 0,182 \leq \xi_R = 0,54.$$

Условие выполняется.

Несущая способность балки:

$$\begin{aligned} M_{ult} &= R_b \cdot b'_f \cdot x (h_{0.red} - 0,5x) + R_{sc} \cdot A'_s (h_{0.red} - a) = \\ &= 14,5 \cdot 1,3 \cdot 0,11 \cdot (0,866 - 0,5 \cdot 0,11) + 355 \cdot 0,00041 \cdot (0,866 - 0,073) = 179,8 \text{ Т*м}. \end{aligned}$$

Несущая способность увеличивается на 7,9 %.

2. Усиление полимерным композитным материалом.

Выполняется расчет усиления нижней растянутой грани балки способом приклеивания полимерного композитного материала – фиброармированного пластика (ФАП).

При расчете предельных усилий в усиленном сечении, нормальном к продольной оси элемента деформации сдвига в клеевом составе не учитывают.

Площадь сечения полимерной композитной арматуры подбирается итерационным методом. Задается некоторая начальная величина, которая корректируется в зависимости от расчетов по прочности на действие изгибающих моментов.

Для расчета усиления используется углеродный полосовой композитный материал MBrace Lam CF 165/3000, характеристики которого представлены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики углеродного полосового композитного материала

| Марка фирмы производителя | Толщина, мм | Ширина, мм | Модуль упругости, ГПа | Прочность на растяжение, МПа | Деформация растяжения, % |
|---------------------------|-------------|-------------|-----------------------|------------------------------|--------------------------|
| MBrace Lam CF 165/3000 | 1,2; 1,4 | 50, 80, 100 | 165 | 3000 | 1,7 |
| MBrace Lam CF 210/2400 | 1,2; 1,4 | 50, 90, 120 | 210 | 2400 | 1,7 |
| MBrace Lam CF 300/1300 | 1,4 | 50 | 300 | 1300 | 1,7 |

Составлена авторами

Предельная деформация растяжения:

$$\varepsilon_f = \frac{R_f}{E_f} = \frac{3000}{165000} = 0.0182.$$

Коэффициент надёжности по материалу для расчета по предельным состояниям первой группы $\gamma_f = 1,1$.

Коэффициент условий работы углеродных КМФ на открытом воздухе: $C_E = 0,85$.

Расчетная прочность равна:

$$R_{ft} = \frac{C_E R_f}{\gamma_f} = \frac{0.85 \cdot 3000}{1.1} = 2319 \text{ МПа.}$$

Расчетная деформация растяжения равна:

$$\varepsilon_{ft} = \frac{C_E \varepsilon_f}{\gamma_f} = \frac{0.85 \cdot 0.0182}{1.1} = 0.01407.$$

Отслаивание ФАП может произойти, если деформация в нём не может быть воспринята основанием. Чтобы предотвратить отслаивание ФАП, нужно ограничить уровень его деформаций. Выражение (4) даёт оценку коэффициента условия работы ФАП k_m , который зависит от жесткости элемента усиления ФАП:

$$k_m = \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{60\varepsilon_{ft}} \left(1 - \frac{nE_{ft}\varepsilon_{ft}}{360000} \right) \leq 0,9 \\ \frac{1}{60\varepsilon_{ft}} \left(\frac{90000}{nE_{ft}\varepsilon_{ft}} \right) \leq 0,9 \end{array} \right. \quad (4)$$

Первое выражение используется при $nE_{ft}\varepsilon_{ft} \leq 180000$, а второе – при $nE_{ft}\varepsilon_{ft} \geq 180000$.

Проверяется условие для отслаивания:

$$nE_{ft}t_f = 2 \times 165000 \times 1,4 = 462000 > 180000;$$
$$k_m = \frac{1}{60\varepsilon_{ft}} \left(\frac{90000}{nE_{ft}t_f} \right) \leq 0,9; \quad (5)$$
$$k_m = \frac{1}{60 \cdot 0,01407} \left(\frac{90000}{2 \cdot 165000 \cdot 1,4} \right) = 0,23 \leq 0,9.$$

Условие выполняется.

Поскольку начальные деформации бетона не учитываются, то расчетные деформации и напряжения в ФАП:

$$\varepsilon_{fu} = k_m \varepsilon_{ft} = 0,23 \times 0,01407 = 0,00324;$$
$$\sigma_{fu} = E_f \varepsilon_{fu} = 165000 \times 0,00324 = 535 \text{ МПа}.$$

Расчётная прочность углеткани равна $R_{fu} = \sigma_{fu} = 535 \text{ МПа}$.

Определяется предельное значение относительной высоты сжатой зоны бетона для внешней арматуры: $\alpha = 0,85$

$$\omega = \alpha - 0,008R_b = 0,85 - 0,008 \times 14,5 = 0,734.$$

В формулу для ξ_{Rf} подставляем значение прочности R_{fu} .

ε_{bu1} принимается равным ε_{b0} для непродолжительного действия нагрузки.

$\varepsilon_{b0} = 0,002$ – при осевом сжатии;

$$\xi_{Rf} = \frac{\omega}{1 + \frac{R_f}{\varepsilon_{bu1} E_f} \left(1 - \frac{\omega}{1,1} \right)} = \frac{0,734}{1 + \frac{535}{0,002 \cdot 165000} \left(1 - \frac{0,734}{1,1} \right)} = 0,477.$$

Площадь сечения внешней арматуры:

$$A_f = n_b b_f t_f = 2 \times 160 \times 1,4 = 448 \text{ мм}^2.$$

Определяется значение x :

$$x = \frac{R_{fu} A_f + R_s A_s - R_{sc} A'_s}{R_b b'_f} = \frac{535 \cdot 448 + 355 \cdot 6160 - 355 \cdot 410}{14,5 \cdot 1300} = 121 \text{ мм};$$

$$\xi = \frac{x}{h} = \frac{12,1}{93} = 0,131 < \xi_{Rf} = 0,477.$$

Условие выполняется.

Предельный изгибающий момент:

$$M_{ult} = A_f \sigma_f (h - 0,5x) + A_s R_s (h_0 - 0,5x) + A'_s R_{sc} (x - a') =$$
$$= 448 \cdot 10^{-6} \cdot 53500 (0,93 - 0,5 \cdot 0,121) + 6160 \cdot 10^{-6} \cdot 35500$$
$$(0,807 - 0,5 \cdot 0,121) + 410 \cdot 10^{-6} \cdot 35500 (0,121 - 0,073) = 184,8 \text{ т} \cdot \text{м}.$$

Несущая способность увеличивается на 10,9 %.

Заключение

На основе анализа двух способов усиления можно сделать следующие выводы:

1. В отличие от приклеивания полимерного композита, способ приварки дополнительной металлической арматуры повышает жесткость конструкции, что важно для изгибаемых элементов.
2. При добавлении металлической арматуры необходимо добиваться совместной работы старого и нового бетона, чего при использовании КМФ делать не нужно.
3. Полимерный композит имеет гораздо большую прочность на растяжение, модуль упругости и более низкий удельный вес, нежели арматурная сталь.
4. Работа по усилению балок пролетного строения – стесненная, значит, более предпочтительным является выбор простой по технологии способ усиления – полимерными композитными материалами.
5. Работы с применением КМФ менее трудоемкие и более безопасные, потому что для данного метода не нужно сооружать дополнительных поддерживающих конструкций.
6. В отличие от железобетона, полимерные композитные материалы менее подвержены влиянию окружающей среды.
7. Увеличение поперечного сечения на 16 см при использовании бетона и металлической арматуры увеличивает несущую способность на 7,9 %. Применение двух слоев полимерного композитного материала толщиной 1,4 мм увеличивает несущую способность на 10,9 %. Это показывает, то, что использование материалов из КМФ эффективнее увеличения поперечного сечения приваркой дополнительной арматуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шилин А.А., Пшеничный В.А., Картузов Д.В. Усиление железобетонных конструкций композиционными материалами. – М.: Стройиздат, 2007 – 144 с.
2. Неволин А.П., Богоявленский Н.А., Сырков А.В. Эксплуатация мостов. Часть 1. – Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2012 – 173 с.
3. Саламахин П.М. Мосты и сооружения на дорогах. Часть 2. – М.: Транспорт, 1991 – 448 с.
4. Бокарев С.А., Кобелев К.В., Слепец В.А. Усиление железобетонных элементов мостов полимерными композиционными материалами без остановки движения // Наукоеведение. – 2014. – №5(24).
5. Кунгурова А.В., Пермякова А.Ю. Особенности ремонта моста, усиленного композитными материалами // Транспорт, транспортные сооружения. Экология. – 2017. – №2. – с. 78–87.
6. И.Г. Овчинников, А.И. Ликверман, О.Н. Распоров и др. Защита от коррозии металлических и железобетонных мостовых конструкций методом окрашивания. – Саратов: Кубик, 2014.
7. Савчинский Б.В. Усиление автодорожных железобетонных мостов композиционными материалами // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. – 2010.
8. Овчинников И.Г., Валиев Ш.Н., Овчинников И.И. Вопросы усиления железобетонных конструкций композитами: 1. Экспериментальные исследования особенностей усиления композитами изгибаемых железобетонных конструкций // Наукоеведение. – 2012. – № 4.
9. Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Чесноков Г.В., Михалдыкин Е.С. Анализ экспериментальных исследований по усилению железобетонных конструкций полимерными композитными материалами. Часть 1. Отечественные эксперименты при статическом нагружении // Наукоеведение. – Том 8, №3. – 2016.
10. Овчинников И.Г., Валиев Ш.Н., Овчинников И.И., Зиновьев В.С., Умиров А.Д. Вопросы усиления железобетонных конструкций композитами: 2. Натурные исследования усиления железобетонных конструкций композитами, возникающие проблемы и пути их решения // Наукоеведение. – №4. – 2012.
11. Omar, T., Nehdi, M.L. Condition Assessment of Reinforced Concrete Bridges // Current Practice and Research Challenges. Infrastructures. – 2018. – №3. – P. 36–59.
12. Мерсиков В.И., Есикова И.Н. Расчет балочных разрезных железобетонных пролетных строений мостов и путепроводов на автомобильных дорогах. – Н. Новгород: ННГАСУ, 2009.

Baldin Danil Yusupovich

Industrial university of Tyumen, Tyumen, Russia
E-mail: danil.baldin@mail.ru

Kraev Andrey Nikolaevich

Industrial university of Tyumen, Tyumen, Russia
E-mail: kraev-an@mail.ru

Zhaisambaev Erkn Askerovich

Industrial university of Tyumen, Tyumen, Russia
E-mail: zhaisambaeverkn@mail.ru

Comparative analysis of reinforced concrete tee beams reinforcement methods

Abstract. Due to the increase in requirements for transport facilities, there is a need to strengthen them. The article is devoted to the analysis of reinforcement methods for load-bearing reinforced concrete structures of transport structures. The author notes in what period of the bridge's life, it needs reinforcement, what difficulties are associated with reinforcing structures, and what are the main amplification methods that exist today. In order to select the optimal amplification method, it is necessary to carry out verification calculations, study the zone requiring amplification, take into account how many times the load-bearing capacity will increase and whether additional force effects will occur. This article describes the advantages and disadvantages of reinforcing by welding additional reinforcement and bonding composite material. The author calculated the amplification of the extended zone of the T-section reinforced concrete beam of the superstructure with additional reinforcement and composite materials. Based on the calculations made, recommendations have been put forward on the relevance of using one or another method of reinforcing the structure.

Keywords: transport facility; reinforced concrete beam of superstructure; gain calculation; load bearing capacity; limit state method; welding of additional fittings; composite materials; laminates; canvases; bending moment

REFERENCES

1. Shilin A.A., Pshenichnyy V.A., Kartuzov D.V. (2007). Usilenie zhelezobetonnykh konstruktsiy kompozitsionnymi materialami. [*Reinforcement of reinforced concrete structures with composite materials.*] Moscow: Stroyizdat, p. 144.
2. Nevolin A.P., Bogoyavlenskiy N.A., Syrkov A.V. (2012). Ehkspluatatsiya mostov. Chast' 1. [*Operation of bridges. Part 1.*] Perm: Perm National Research Polytechnic University, p. 173.
3. Salamakhin P.M. (1991). Mosty i sooruzheniya na dorogakh. Chast' 2. [*Bridges and structures on the roads. Part 2.*] Moscow: Transport, p. 448.
4. Bokarev S.A., Kobelev K.V., Slepets V.A. (2014). Reinforced concrete bridge parts strengthening using the polymer composites without the traffic stop. *Naukovedenie*, [online] 5(6). Available at: <https://naukovedenie.ru/PDF/20KO514.pdf> (in Russian).
5. Kungurova A.V., Permyakova A.Yu. (2017). Features of repair of a bridge reinforced with composite materials. *Transport, transport facilities. Ecology*, 2, pp. 78–87 (in Russian).
6. Ovchinnikov I.G., Likverman A.I., Rasporov O.N. and etc. (2014). Zashchita ot korrozii metallicheskih i zhelezobetonnykh mostovykh konstruktsiy metodom okrashivaniya. [*Corrosion protection of metal and reinforced concrete bridge structures by painting.*] Saratov: Cube.
7. Savchinskiy B.V. (2010). Reinforcement of road reinforced concrete bridges with composite materials. *Science and Transport Progress. Bulletin of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*.
8. Ovchinnikov I.G., Valiev Sh.N., Ovchinnikov I.I. (2012). Use the composites for strengthening reinforced concrete: 1. Experimental studies of the composites strengthening for flexural reinforced concrete structures. *Naukovedenie*, [online] 4(4). Available at: <https://naukovedenie.ru/PDF/7tvn412.pdf> (in Russian).
9. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Chesnokov G.V., Mikhaldykin E.S. (2016). Analysis of experimental studies strengthening of reinforced concrete structures by polymer composite materials. Part 1. Native experiments under static load. *Naukovedenie*, [online] 3(8). Available at: <https://naukovedenie.ru/PDF/24TVN316.pdf> (in Russian).
10. Ovchinnikov I.G., Valiev Sh.N., Ovchinnikov I.I., Zinov'ev V.S., Umirov A.D. (2012). Use the composites for strengthening reinforced concrete: 2. Field investigations of reinforced concrete strengthened composites, problems and solutions. *Naukovedenie*, [online] 4(4). Available at: <https://naukovedenie.ru/PDF/8tvn412.pdf> (in Russian).
11. Omar T., Nehdi M.L. (2018). Condition Assessment of Reinforced Concrete Bridges. *Current Practice and Research Challenges. Infrastructures*, 3, pp. 36–59.
12. Mersikov V.I., Esikova I.N. (2009). Raschet balochnykh razreznykh zhelezobetonnykh proletnykh stroeniy mostov i puteprovodov na avtomobil'nykh dorogakh. [*Calculation of beam split reinforced concrete spans for bridges and overpasses on roads.*] Nizhny Novgorod: Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, p. 144.