

Транспортные сооружения / Russian Journal of Transport Engineering <https://t-s.today>

2026, Том 13, № 2 / 2026, Vol. 13, Iss. 2 <https://t-s.today/issue-2-2026.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/09SATS226.pdf>

DOI: 10.15862/09SATS226 (<https://doi.org/10.15862/09SATS226>)

2.1.8. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Михайлова, О. В. Современные методы усиления железобетонных пролетных строений автодорожных мостов / О. В. Михайлова, В. М. Золотов, Н. В. Козак, А. В. Сырков // Транспортные сооружения. — 2026. — Т. 13. — № 2. — URL: <https://t-s.today/PDF/09SATS226.pdf>. DOI: 10.15862/09SATS226.

For citation:

Mikhailova O.V., Zolotov V.M., Kozak N.V., Syrkov A.V. Modern methods of strengthening of reinforced concrete superstructures of road bridges. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2026;13(2): 09SATS226. Available at: <https://t-s.today/PDF/09SATS226.pdf>. DOI: 10.15862/09SATS226. (In Russ., abstract in Eng.).

УДК 624.21/.8

Михайлова Ольга Вадимовна

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»,
Санкт-Петербург, Россия
E-mail: olya.mikhailovaaa@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-9773-5497>

Золотов Вячеслав Михайлович

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»,
Санкт-Петербург, Россия
E-mail: slavazol@bk.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-9629-7268>

Козак Николай Викторович

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»,
Санкт-Петербург, Россия
Доцент
Кандидат технических наук
E-mail: kozak.spbgasu@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7707-4388>
ИНЦИ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1018546
ResearchGate: <https://www.researchgate.net/profile/Nikolai-Kozak-2>
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57207108767>

Сырков Антон Владимирович

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»,
Санкт-Петербург, Россия
Доцент
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: syrkov-anton@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3178-6805>
ResearchGate: <https://www.researchgate.net/profile/Anton-Syrkov>

**Современные методы усиления
железобетонных пролетных строений
автодорожных мостов**

Аннотация. В настоящее время эксплуатируется большое количество мостов и путепроводов из железобетона и предварительно напряженного железобетона на автомобильных дорогах общего пользования, чьи потребительские характеристики не удовлетворяют требованиям действующей нормативной документации ввиду их морального и физического износа. Ключевым фактором, определяющим безопасную эксплуатацию мостового сооружения, является его грузоподъемность. По этим причинам усиление основных несущих конструкций мостовых сооружений является крайне актуальной проблемой. Полная замена главных балок не всегда рациональна из-за высокой стоимости проведения подобного капитального ремонта, сложности и затратности демонтажа конструкций и длительного закрытия сооружения для движения транспорта.

В данной научно-исследовательской работе авторами рассмотрены основные современные методы усиления железобетонных мостов и путепроводов с главными балками таврового, двутаврового, плитного и коробчатого сечения и существующие тенденции развития в этой области. Приведен обзор отечественной и зарубежной литературы по теме усиления существующих автодорожных железобетонных мостовых сооружений. В дополнение авторами составлена классификация методов усиления пролетных строений мостов и путепроводов из железобетона и предварительно напряженного железобетона в зависимости от применяемых материалов, технологических особенностей проведения капитального ремонта с целью усиления железобетонных главных балок пролетного строения, а также воздействия применяемых методов на целостность основных несущих конструкций. Результатом данной работы является обзор и сравнение различных существующих подходов к усилению железобетонных автодорожных мостов, а также их систематизация, позволяющие упростить и расширить диапазон поиска наиболее эффективного метода усиления, подходящего под заданные условия и задачу.

Ключевые слова: железобетонное пролетное строение; усиление пролётных строений; железобетонная балка; усиление моста; железобетон; мостовые сооружения; ремонт

Введение

Наиболее популярным материалом, используемым при строительстве малых и средних мостов, является железобетон. Значительная часть эксплуатируемых в настоящее время мостовых сооружений была построена в середине и конце XX века. Построенные в этот период сооружения были запроектированы по старым нормам и ввиду увеличения проектных нагрузок не соответствуют современным требованиям по грузоподъемности.

Кроме того, мосты эксплуатируются в условиях агрессивной окружающей среды, которая приводит к деградации бетона, утрате его защитных свойств и, как следствие, коррозии арматуры и уменьшению ее площади сечения.

На сегодняшний день большое количество сооружений с железобетонными пролетными строениями требуют замены или усиления по причине недостаточной несущей способности. Полный демонтаж и замена моста на новый не всегда целесообразна по экономическим соображениям, кроме того, требуется перекрытие движения на длительный срок, что также приводит к значительным косвенным финансовым потерям. По этим причинам вопрос усиления конструкций железобетонных мостов является актуальным на сегодняшний день.

Цель данной работы — систематизация и сравнительный анализ актуальных знаний о методах усиления железобетонных пролетных строений мостов на основе отечественных и зарубежных научных источников для помощи инженерам в выборе наиболее подходящего метода усиления в конкретном случае.

В данной работе рассмотрены основные методы усиления железобетонных пролетных строений, в том числе указанные в ГОСТ Р 59402-2021 и ГОСТ Р 59488-2021, также их достоинства и недостатки. Приведен литературный обзор отечественных и зарубежных источников по этой теме, а также дана классификация методов усиления.

Методы

В ходе написания обзорной статьи был осуществлен поиск, отбор и систематизация источников, проведён их критический анализ, выявлены основные группы методов усиления железобетонных пролетных строений мостов, используемые материалы и произведена структуризация полученной информации.

Поиск подходящих источников осуществлялся в электронных базах данных и научных платформах. Ниже перечислены основные базы данных, при помощи которых осуществлялся поиск публикаций и статей по теме настоящего исследования:

- Научная электронная библиотека «eLibrary».
- Платформа «ResearchGate».
- Платформа «ScienceDirect».

В качестве источников для написания обзорной статьи рассматривались публикации, изданные не позднее 2015 года с целью обеспечения актуальности используемой для обзора информации. Для написания настоящей статьи рассматривались только источники, имеющие цифровой идентификатор объекта (англ. Digital Object Identifier — DOI).

По результатам первичной выборки, в ходе которой анализировались названия, аннотации и ключевые слова найденных публикаций, суммарно было отобрано более пятидесяти статей. Была выполнена проверка того, что издания, в которых опубликованы статьи являются рецензируемыми, а также наличие научной и(или) практической значимости этих статей.

Источники, прошедшие первичный отбор, подвергались более детальному анализу. Все отечественные и зарубежные статьи были сведены в общую таблицу с определением следующих параметров: объект исследования (тип пролетного строения); материал пролетного строения (железобетон, преднапряженный железобетон); предмет исследования — метод усиления, рассмотренный авторами статьи; также было отмечено для какого элемента пролетного строения и на какое воздействие (изгибающий момент, поперечная сила) рассчитан метод усиления.

Дополнительно при изучении найденных источников было оценено наличие четко выраженной структуры публикации; проводились ли численные, лабораторные и натурные эксперименты; насколько описываемый метод соответствует современным требованиям; имеет ли метод усиления доказанную практическую эффективность применения или находится на стадии разработки.

По итогам проведенного анализа был сформирован список из 27 источников, в том числе 3 отечественных.

Результаты

На основании анализа отобранной литературы были выделены следующие основные группы методов усиления:

- Усиление растянутой зоны балки.
- Усиление приопорной зоны балки.
- Увеличение поперечной жёсткости пролётного строения.
- Усиление плиты проезжей части.

Для структуризации и большей наглядности найденной информации была составлена общая классификация, охватывающая все рассмотренные в данной статье методы, материалы и технологии (рис. 1).

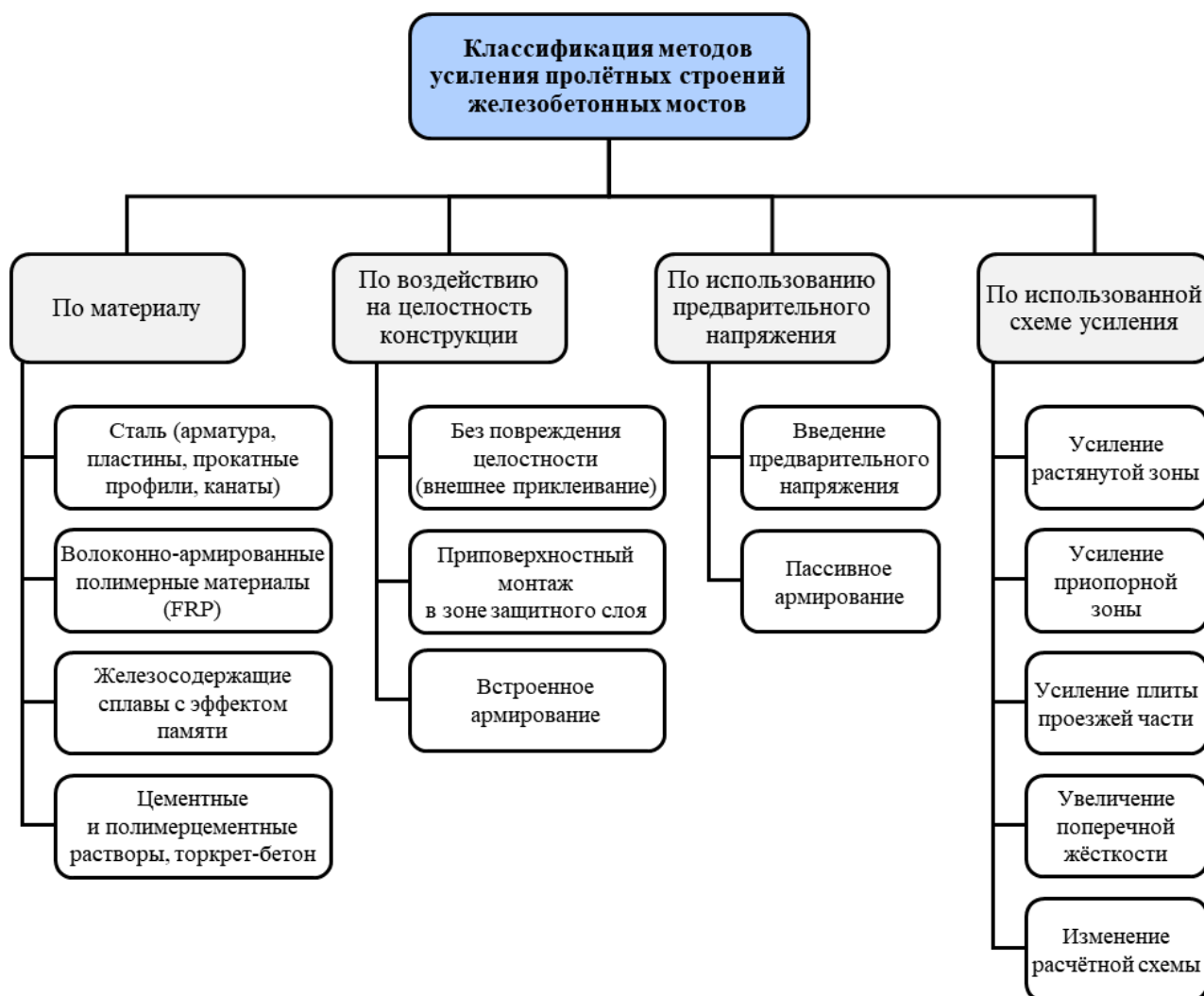


Рисунок 1. Классификация методов усиления железобетонных пролётных строений мостов (составлена авторами статьи)

Обзор существующих методов усиления пролётных строений балочных железобетонных мостов

Усиление растянутой зоны балок

Одним из возможных методов усиления для повышения несущей способности железобетонных балок на изгиб является внешнее армирование стальными стержнями или пластинами без предварительного напряжения.

Арматура или пластины усиления закрепляются в растянутой зоне балки на максимальном удалении от нейтральной оси с помощью клеевых составов или механических анкеров. Для эффективной работы объединенного в результате усиления сечения балки необходимо обеспечить жесткую фиксацию арматуры не только в зоне анкеровки, но и непосредственно по длине балки.

Наиболее щадящим методом, не нарушающим целостность основных несущих конструкций, является способ приклеивания элементов усиления эпоксидными или иными клеевыми составами.

В арматуре внешнего усиления возникают значительные продольные усилия и, как следствие, сдвиговые напряжения в зоне контакта арматура-бетон, что может привести к отрыву ослабленного годами эксплуатации защитного слоя бетона или к нарушению целостности клеевого шва.

При обеспечении контакта элементов усиления только по краям балки в зоне их анкеровки эффективность совместной работы конструкции и усиления значительно снижается — для включения в работу элементов усиления балка должна получить деформации, кроме того, местные деформации и подвижки в зоне анкеровки еще сильнее снижают величину относительной деформации арматуры усиления при загрузке балки. Более подробно вопрос включения элементов усиления в совместную работу с главной балкой при загрузке последней рассмотрен в работах [1; 2].

Дополнительная арматура для повышения несущей способности железобетонной конструкции на изгиб может быть интегрирована в существующий арматурный каркас балки путем приварки, при этом защитный слой предварительно удаляется [3].

После установки дополнительной арматуры и объединения ее с существующей устраивается новый защитный слой. Таким образом, с помощью этого метода усиления наращивается поперечное сечение железобетонной балки, и как следствие, увеличивается его жесткость.

Недостатком этого метода являются различные деформационные характеристики старого и нового бетона, в результате чего в новом бетоне образуются трещины, которые в дальнейшем могут привести к отслоению устроенного в ходе ремонта защитного слоя.

Альтернативной методу классического увеличения поперечного сечения, описанному выше с помощью железобетона, может быть увеличение сечения в растянутой зоне с помощью полиуретан-цементного композита, который обладает отличной адгезией к бетону. Следовательно, не требуется установка дополнительных элементов для обеспечения совместности работы зоны усиления и существующей железобетонной балки.

В исследовании [4] описывается усиление моста с разрезными железобетонными балками при помощи полиуретан-цементного композита (рис. 1). Этот способ усиления показал высокую эффективность, кроме того, данный метод прост в применении: на усиливаемой железобетонной балке удаляется старый защитный слой, поверхности бетона придается необходимая шероховатость и устанавливается опалубка для заливки полиуретан-цементной композитной смеси.

К недостаткам этого метода можно отнести увеличение строительной высоты балки в растянутой зоне, что является серьезной проблемой при усилении путепроводов. Как следствие, происходит также некоторое увеличение собственного веса главных балок.

В работе [5] рассматривается метод усиления железобетонных разрезных балок с помощью U-образных металлических обойм, закрепленных системой вертикальных в пролетах и наклонных в зоне опорных сечений тяг (рис. 2).



Рисунок 2. Усиление растянутой зоны разрезной тавровой балки полиуретан-цементным композитом (источник [4])

Между нижней гранью железобетонной балки и металлической обоймой был оставлен зазор шириной 20 см, в который был уложен промытый и высушенный кварцевый песок, который позже пропитывался полимером на основе метилметакрилата. Получившийся в ходе полимеризации полимербетон обеспечивал надежную адгезию между поверхностью балки и металлической обоймой и, кроме этого, полимербетон проник в существующие трещины и скрепил бетон, предотвращая коррозию арматуры балки и дальнейшее раскрытие трещин. Среднее снижение прогиба главных балок составляло 41 % по результатам проведенных авторами [5] динамических испытаний, что говорит о высокой эффективности этого метода.



Рисунок 3. Усиление растянутой зоны разрезной железобетонной балки с помощью металлических обим и полимербетона (источник [5])

В последние несколько десятилетий все большую популярность набирают полимерные композитные материалы. В зарубежных литературных источниках эти материалы имеют аббревиатуру FRP, которая расшифровывается, как «fiber-reinforced polymers» — армированные волокном полимеры.

Эти материалы состоят из полимерной матрицы (эпоксид, полиэфир, виниловый эфир, полиуретан, фенол) и армирующих волокон из стали, стекловолокна, базальта или углеволокна.

Волокна обеспечивают высокую прочность на растяжение и жесткость, а полимерная матрица защищает волокна от агрессивного воздействия окружающей среды, выступает связующим веществом и обеспечивает передачу нагрузки на армирующие волокна [6]. Такие материалы обладают низким весом и высокой коррозионной стойкостью, что объясняет популярность их применения для усиления существующих мостов.

Одной из основных проблем применения композитных материалов в качестве элементов усиления является обеспечение прочности клеевого соединения между композитом и поверхностью бетона.

Как правило, композитное армирование отклеивается до достижения его предела прочности или происходит отслоение защитного слоя бетона, что в полной мере не позволяет использовать прочностные характеристики и потенциал композитного материала усиления.

В работе [7] в качестве возможного решения вышеописанной проблемы авторы предлагают использование анкеров. Однако результаты проведенных ими испытаний показали, что анкера предотвратили отклеивание ленты усиления по концам, но при загрузке балки и появлении поперечных трещин происходит отслаивание композитного материала в середине пролета балки, которое быстро распространяется дальше и приводит к полному выключению композитной ленты из работы в результате потери адгезии. Полученные результаты подчеркивают важность тщательной подготовки поверхности бетона и (или) постановки механических анкеров с регулярным шагом по длине балки.

В исследовании [8] авторами сравниваются две схемы усиления железобетонных преднапряженных плит с использованием композитных материалов. Согласно первой схеме, используется классический вариант наклейки углепластиковых пластин с помощью эпоксидного клея (рис. 4 а), согласно второй схеме к нижней грани преднапряженной плиты приклеиваются двутавровые балки из стеклопластика и только затем к нижней полке двутавров приклеиваются углепластиковые пластины, такие же как в схеме усиления № 1 (рис. 4 б). Такое решение позволяет максимально отдалить углепластиковые ленты от нейтральной оси усиливаемого элемента. Для предотвращения отслаивания стеклопластиковых двутавров при нагружении балки, их верхние пояса были закреплены механическими анкерами, установленными с регулярным шагом.

Благодаря хорошей подготовке поверхности и анкерам отслаивание от бетонной поверхности не произошло до разрушения элемента. Усиление по обеим схемам показало увеличение грузоподъемности балки и снижение прогиба, особенно эффективно показало себя усиление углепластиковыми лентами по схеме № 2, однако в этом случае также происходит уменьшение подмостового габарита, что нежелательно для пролетных строений путепроводов.

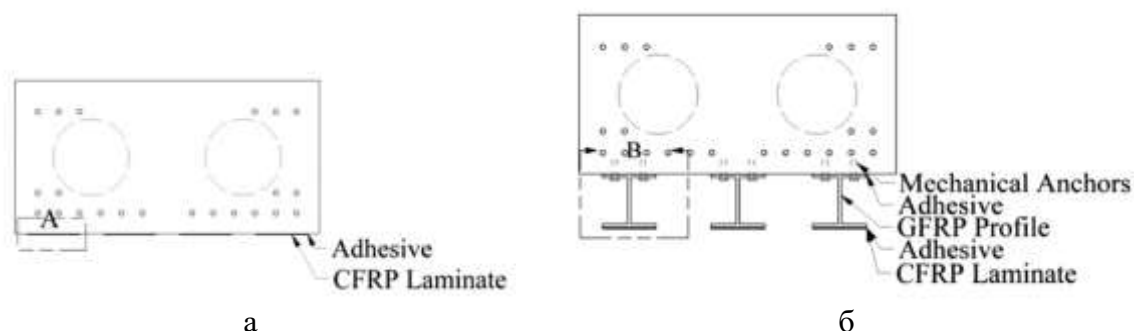


Рисунок 4. Усиление железобетонной преднапряженной плиты углепластиковыми пластинами: а — по схеме № 1; б — по схеме № 2 (источник [8])

Как и в случае внешнего армирования стальными пластинами и стержнями, усиление композитными материалами показывает малую эффективность при работе бетона балки в упругой стадии. Включение элементов усиления в работу происходит при появлении поперечных трещин в железобетонной балке, что говорит о переходе работы бетона в стадию пластических деформаций.

Для повышения эффективности работы усиления можно использовать технологию предварительного напряжения, как для стальной арматуры, так и для композитных материалов. Внешнее преднапряжение, помимо того, что берет на себя часть растягивающих напряжений, также способствует закрытию существующих поперечных трещин и препятствует образованию новых, что, в свою очередь, защищает арматурный каркас балки от коррозии.

Кроме этого, применение преднапряжения позволяет восстановить первоначальную геометрию железобетонной балки и устранить избыточные прогибы, образовавшиеся в ходе эксплуатации сооружения.

При использовании внешнего преднапряжения особую сложность вызывает зона анкеровки, так как здесь происходит передача значительных продольных усилий, возникающих в арматуре усиления, на поверхность ослабленного агрессивным воздействием окружающей среды бетона балки, в результате чего может произойти его хрупкое разрушения.

В работе [5] авторы используют металлические обоймы, состоящие каждая из двух боковых и одной нижней пластины, установленные по краям балки и закрепленные анкерными болтами для распределения сдвиговых напряжений на большую площадь (рис. 5 а). Однако, несмотря на значительное увеличение прочности, достигнутое путем введения преднапряжения, эксперимент для большинства балок закончился не из-за исчерпания прочности бетона на изгиб или разрыва преднапряженных тросов, а из-за хрупкого разрушения зоны анкеровки (рис. 5 б).

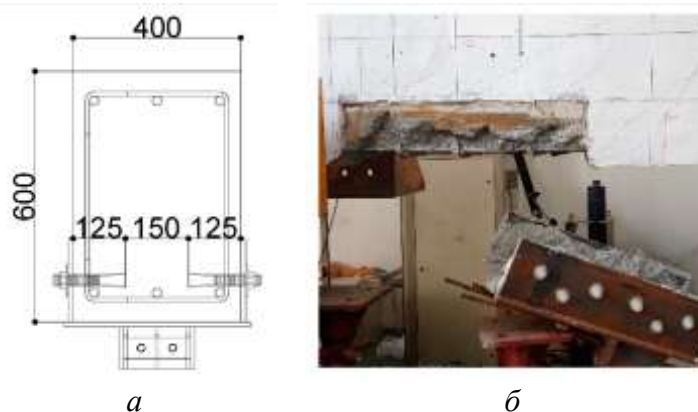


Рисунок 5. а — усиление растянутой зоны балки при помощи металлических обойм и преднапряженных тросов; б — использованная схема усиления (источник [5])

Расчет зоны анкеровки авторами [5] выполнялся только на первичное напряжение, возникающее в арматуре непосредственно при ее преднапряжении, но из-за отсутствия сцепления арматуры с балкой по длине, вся нагрузка воспринималась только зонами анкеровки. Результаты этого исследования подчеркивают необходимость расчета анкера на предельную нагрузку вплоть до разрушения балки или разрыва тросов внешнего усиления.

Также авторами была выявлена проблема монтажа подобной конструкции механических анкеров на реальных объектах: арматурный каркас усиливаемой балки не всегда позволяет установить анкерные болты на требуемую глубину. При проектировании анкеров на полную разрывную нагрузку преднапрягаемых тросов и учете шага и глубины анкеровки болтов крепления, данный метод усиления показывает себя эффективно [9].

При использовании метода усиления железобетонных конструкций внешними преднапряженными стальными тросами, имеющими закрепления только в зонах анкеровки по краям балки без фиксации по длине, необходимо учитывать, что вибрация от обращающейся транспортной нагрузки приводит к релаксации преднапряженной арматуры и потере эффективности усиления [10].

В работе [11] авторами предложен оригинальный способ усиления балок железобетонных мостов путем бурения наклонных участков каналов и последующей укладки в них монострендов в защитных оболочках, после чего выполняется натяжение последних и инъектирование каналов и устройство защитного слоя горизонтальных участков цементно-песчаным раствором по сварной арматурной сетке (рис. 6 а).

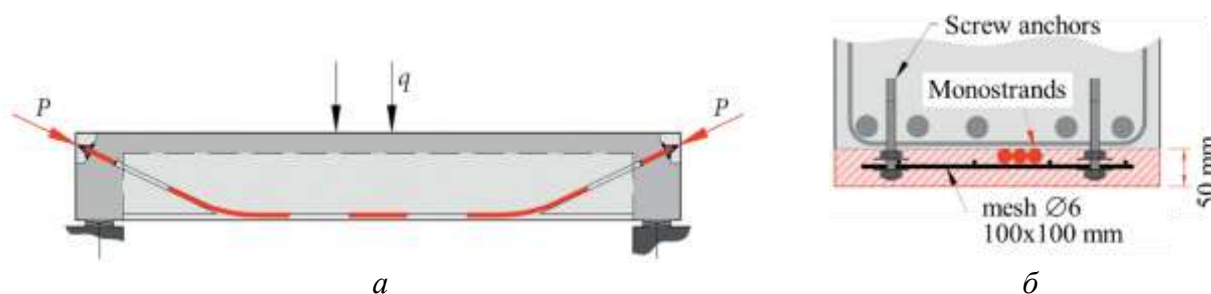


Рисунок 6. а — усиление плитно-ребристых железобетонных балок путем укладки монострендов в пробуренные ранее каналы и последующего их натяжения; б — армирование защитного слоя бетона (источник [11])

Авторами данный метод был предложен для усиления плитно-ребристых пролетных строений мостов. Несмотря на сложное конструктивное исполнение и требование обеспечения достаточного пространства между стержнями существующего арматурного каркаса, метод предлагает ряд преимуществ. Так, достигается рост грузоподъемности на 200–300 %, неизменность внешнего вида моста, что особенно актуально для исторических сооружений. Еще одним преимуществом является то, что в отличие от пассивного армирования, которое включается в работу только при нагружении на второй стадии работы, преднапряжение немедленно уменьшает воздействие от постоянной нагрузки.

Авторами исследования [11] подчеркнуто, что при восстановлении защитного слоя, он должен быть армирован сеткой и закреплен анкерными болтами (рис. 6 б). В противном случае произойдет его отслоение.

Предварительное напряжение также можно применять при усилении композитными материалами [12; 13]. Как было отмечено ранее, принципиальным преимуществом преднапряженных элементов перед обычным армированием является то, что пассивное усиление начинает работать при деформациях на второй стадии, тогда как преднапряжение создает момент обратного знака сразу же и включает материал усиления в работу еще до нагружения конструкции весом от элементов мостового полотна и временных нагрузок. Проблемы применения композитных материалов для усиления мостов были описаны в этой работе ранее.

Инновационной системой для усиления железобетонных балок при изгибе являются системы на основе железосодержащих сплавов с эффектом памяти формы (СПФ). Эффектом памяти формы называют способность материала возвращаться к первоначальной форме при нагреве после предварительной деформации.

Элементы усиления из СПФ поставляют на ремонтируемый объект в предварительно-деформированном состоянии, прикрепляют к растянутой зоне балки за счет анкеровки на концах или путем обеспечения полного сцепления по всей длине, затем нагревают, после чего, остывая в закрепленном состоянии, материал стремится вернуться в первоначальную форму, преднапрягая при этом усиливаемую конструкцию.

Существуют различные схемы усиления железобетонных балок с использованием СПФ (рис. 7) [14]. Принципиальным преимуществом этого материала является способность восстанавливать потери напряжения через повторный нагрев, что делает потери напряжения от усталости при циклической нагрузке полностью обратимыми.

В работе [15] авторами предложена композитная система из бетонных блоков, внутрь которых уложена проволока из металла с эффектом памяти (рис. 8 а), используемая для ремонта поперечных трещин в железобетонной балке (рис. 8 б). До активации проволоки из СПФ композитная система закрепляется на подготовленной поверхности ремонтируемой балки за счет эпоксидного клея, после чего с помощью электрического тока создается необходимое тепло, система самопреднапрягается и происходит обжатие поперечных трещин.

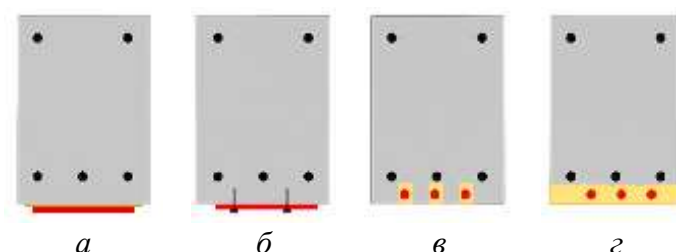


Рисунок 7. Схемы усиления конструкций с использованием пластин/стержней из СПФ: а — обеспечение адгезии за счет клеевых составов; б — обеспечение адгезии за счет постановки механических анкеров; в — помещение стержней в предварительно вырезанные отверстия с последующим закрытием их эпоксидными или цементными растворами; г — замена старого защитного слоя на новый торкретированный бетон армированный стержнями из СПФ (источник [14])

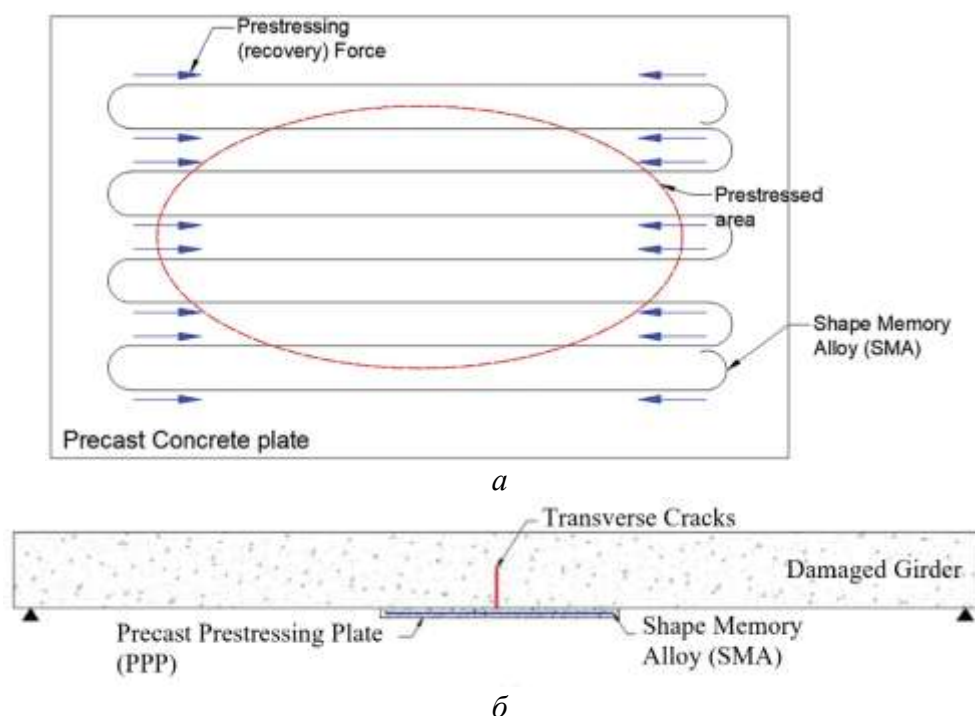


Рисунок 8. а — композитная система из бетонных блоков с уложенной внутрь проволокой из СПФ; б — схема установки композитной системы для ремонта поперечных трещин (источник [15])

Данный материал активно изучается в последние годы и может стать альтернативой наиболее традиционным методам усиления железобетонных мостов.

Усиление приопорной зоны балок

В результате воздействия тяжелых нагрузок на пролетные строения в опорных зонах балок возникают значительные поперечные силы, которые приводят к возникновению наклонных трещин в стенках в случае их недостаточной несущей способности.

В исследовании [16] рассматривается метод усиления преднапряженных железобетонных плит путем цементирования пустот фиброармированным цементным раствором (рис. 9 а). В качестве цементирующих материалов применены портланд цемент, летучая зола и кремниевый порошок, заполнители — кварцевый песок и базальтовый гравий. Для армирования использованы поливинилспиртовые и стальные волокна, покрытые медью (рис. 9 б).

Для обеспечения сцепления раствора с бетоном плит пролетных строений использован ретиспергируемый латексный порошок. Также были применены добавки для снижения усадки и обеспечения самоуплотнения смеси.

Испытания, проведенные авторами [16], до и после усиления показали снижение главных напряжений в стенках более, чем на 50 %, а также уменьшение прогибов центральных плит в середине пролета на 10–20 %, что говорит о высокой эффективности использованного метода усиления. Однако данный метод требует проведения мокрых работ, что значительно увеличивает срок проведения ремонта, кроме того, необходимо производить точный контроль состава и параметров раствора цементирувания для обеспечения его требуемых свойств.

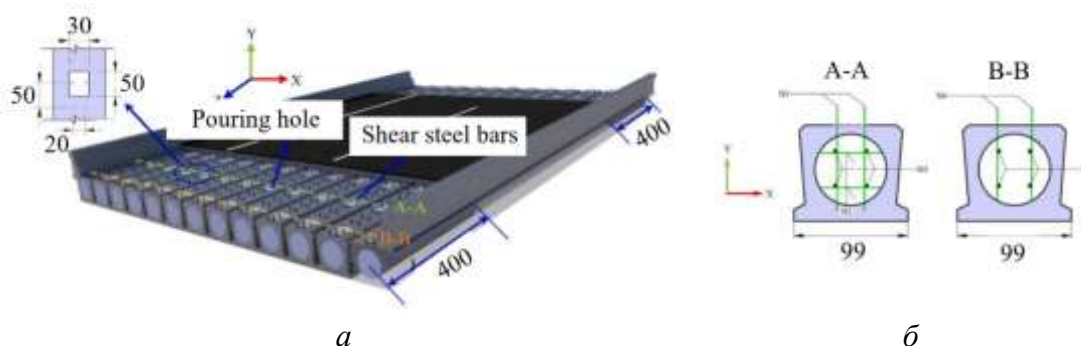


Рисунок 9. а — усиление преднапряженных плит путем заполнения пустот фиброармированным цементным раствором; б — схема использованного армирования (источник [16])

В исследованиях [17] и [18] применяется армирование металлом для усиления приопорных зон на срез. Армирование может выполняться как стержнями, так и полосами. Достиж большей эффективности усиления позволяет предварительное натяжение, для этого могут применяться механические способы натяжения или использоваться сплавы с эффектом памяти [14].

В работе [17] авторы устанавливают стержни периодического профиля в просверленные отверстия в стенках преднапряженных плит, выполняют их анкеровку с помощью эпоксидного раствора. Затем стержни преднапрягают гидравлическим домкратом и цементируют в плите высокопрочным раствором (рис. 10).

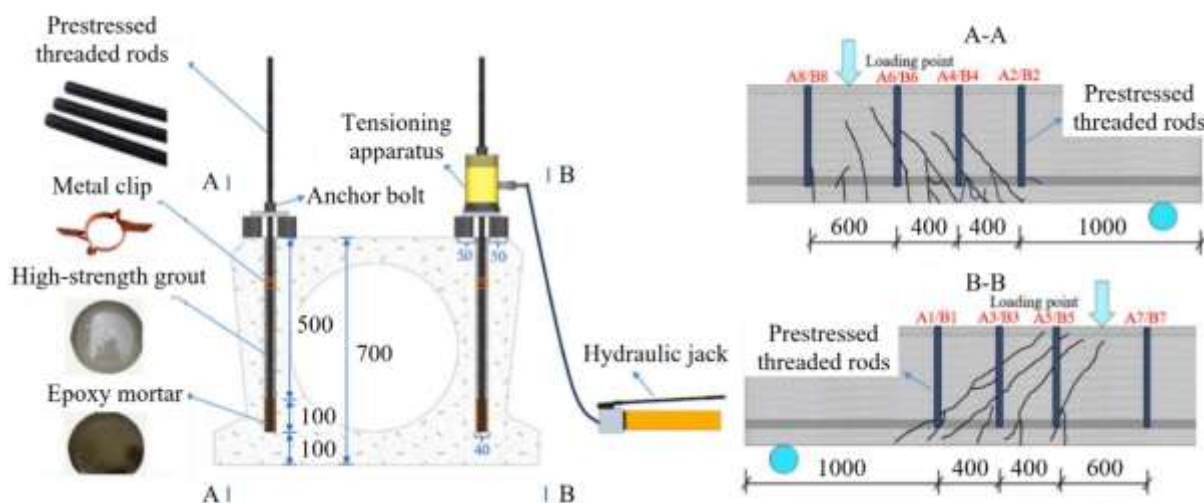


Рисунок 10. Схема усиления плитного пролетного строения на срез путем встраивания преднапряженных стержней арматуры периодического профиля (источник [17])

В результате проведения такого усиления уменьшилась ширина раскрытия наклонных трещин в стенках плит на 13–34 %, однако, несущая способность практически не изменилась — авторы получили 7 % увеличение предельной нагрузки. Исходя из этого можно сделать вывод, что этот метод усиления может быть использован в целях восстановления работоспособности плитного пролетного строения без повышения его грузоподъемности. При этом необходимо учитывать риск повреждения продольного армирования плит и трудоемкость работ по натяжению стержней усиления.

В исследовании [18] авторы рассматривают метод усиления двутавровых балок путем армирования их замкнутыми элементами, изготовленными из сплава с эффектом памяти формы (механизм работы армирования из СПФ рассматривался ранее в данной работе).

Авторы исследования [18] рассматривают армирование полосами, устанавливаемыми снаружи балки (рис. 11 а), и стержнями, устанавливаемыми внутри вблизи поверхности (рис. 11 б).

Проведенные испытания, в которых участвовали 5 образцов — балка без усиления; балка, усиленная полосами с/без преднапряжения; балка, усиленная стержнями с/без преднапряжения, показали, что предельная несущая способность образцов с усилением полосами и стержнями без преднапряжения увеличилась на 40 % и 46 % соответственно. Преднапряжение элементов усиления практически не оказало влияния — предельная нагрузка увеличилась на 1% относительно аналогичных образцов без преднапряжения.

Таким образом, данный метод позволяет значительно увеличить несущую способность пролетного строения, однако на реальных мостах требуется выполнение дополнительных работ для пропуска элементов усиления через плиту проезжей части. Кроме того, обеспечение плотного прилегания элементов усиления к балкам требует высокой культуры строительства.

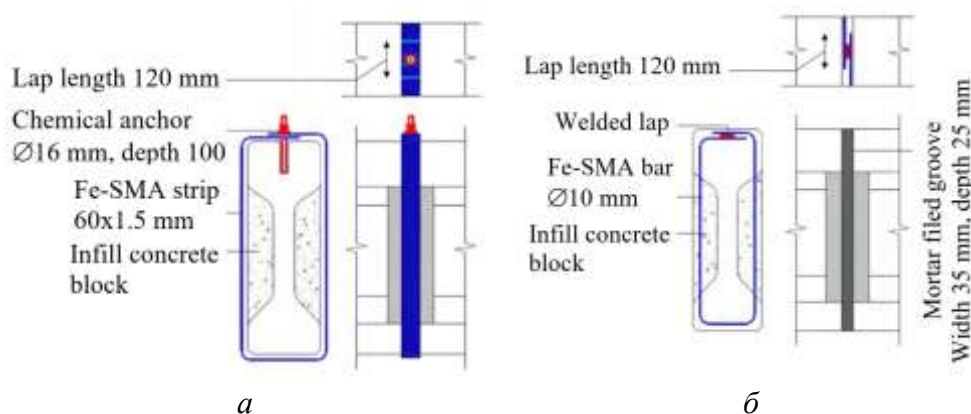


Рисунок 11. Усиление двутавровой балки при помощи: а — наклейки полос из СПФ; б — интеграции внутрь каркаса балки стержней арматуры из СПФ (источник [18])

В исследовании [19] авторы рассматривают усиление с помощью ламелей из высокопрочного фибробетона. Предварительно были определены механические характеристики бетона: кубиковая прочность на сжатие 122,4 МПа; прочность на растяжение 9,2 МПа.

Рассматривается два способа усиления — увеличение поперечного сечения существующей балки путем добавления слоя высокопрочного фибробетона (рис. 12 а) и приклеивание предварительно изготовленных ламелей из высокопрочного фибробетона на поверхность усиливаемой железобетонной конструкции с использованием эпоксидный смолы (рис. 12 б).

Образец с дополнительным слоем из высокопрочного фибробетона расслоился в ходе набора прочности, что указывает на недостаточную адгезию между дополнительным слоем усиления и непосредственно конструкцией.

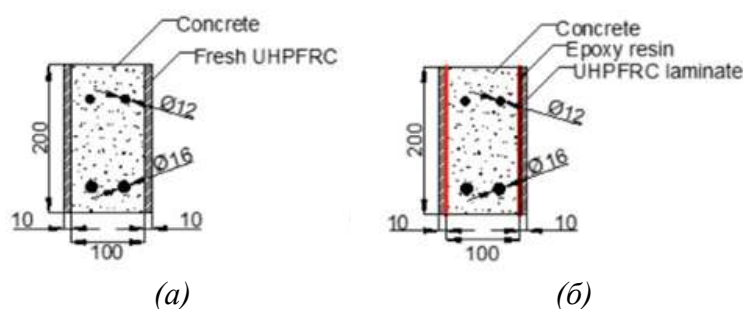


Рисунок 12. Усиление железобетонной балки путем: а — наращивания сечения высокопрочным фибробетоном; б — приклеивания предварительно изготовленных ламелей на эпоксидную смолу (источник [19])

В результате испытаний образец с приклеенными ламелями показал увеличение несущей способности на 117 % относительно контрольного образца. Однако необходимо учитывать, что площадь поперечного сечения ламелей в данном эксперименте составила 20 % площади усиливаемой балки, кроме того балка не имеет поперечного армирования. В реальных пролетных строениях имеется поперечное армирование, а площадь подобных элементов усиления составляет незначительную долю от исходного сечения.

Увеличение поперечной жесткости

Недостаточная поперечная жесткость пролетного строения моста приводит к неравномерному распределению нагрузки между главными балками, повышенным деформациям и снижению общей грузоподъемности. Распространённым методом повышения поперечной жёсткости железобетонных мостов из тавровых и коробчатых балок является установка промежуточных диафрагм.

Авторы исследования [20] экспериментально и на конечно-элементной модели изучили влияние высоты диафрагм в виде стальных поперечных связей (рис. 13) и их количества на прогибы и распределение нагрузки для пролёта из тавровых балок.

Результаты проведенного исследования показывают, что эффект усиления зависит от высоты установки связей, но незначительно: при установке дополнительных диафрагм ближе к нижней грани балки эффект усиления заметнее (рис. 14 б), чем при постановке диафрагм на уровне нейтральной оси (рис. 14 а).

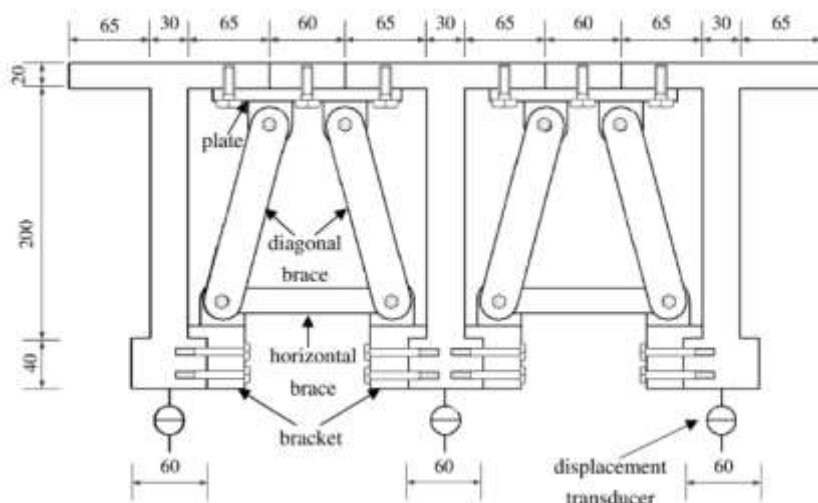


Рисунок 13. Конструкция диафрагм из стальных элементов для увеличения поперечной жесткости пролетного строения, образованного двутавровыми балками (источник [20])

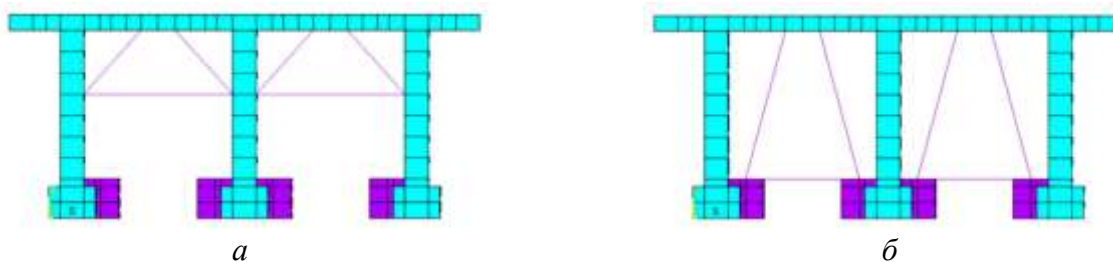


Рисунок 14. Увеличение поперечной жесткости пролетного строения путем постановки дополнительных диафрагм: а — по схеме № 1; б — по схеме № 2 (источник [20])

Как было сказано ранее, авторами исследования [20] также было изучено влияние количества диафрагм: рассматривалась схема постановки диафрагм в каждой трети и в каждой четверти пролета. По критериям уменьшения прогибов и, соответственно, улучшения распределения нагрузки наиболее эффективно показал себя вариант с постановкой диафрагм в каждой четверти пролета (прогибы в центре пролёта уменьшились на 27,6 %), однако авторами отмечено, что при должном обосновании возможно применение варианта с установкой диафрагм в каждой трети пролета, при котором прогибы уменьшились на 11,1 %.

В исследовании [21] авторами предложены К-образные композитные фермы (рис. 15) как способ не только улучшить распределение нагрузки и снизить прогибы, но и в целом повлиять на картину пластических деформаций пролетного строения — более равномерное распределение поперечных трещин по длине пролетного строения с меньшей шириной раскрытия. Результаты проведенного эксперимента и численного моделирования показали снижение максимальных прогибов на 38,6 % при расположении диафрагм в каждой четверти пролёта и уменьшение ширины раскрытия трещин относительно контрольных образцов.

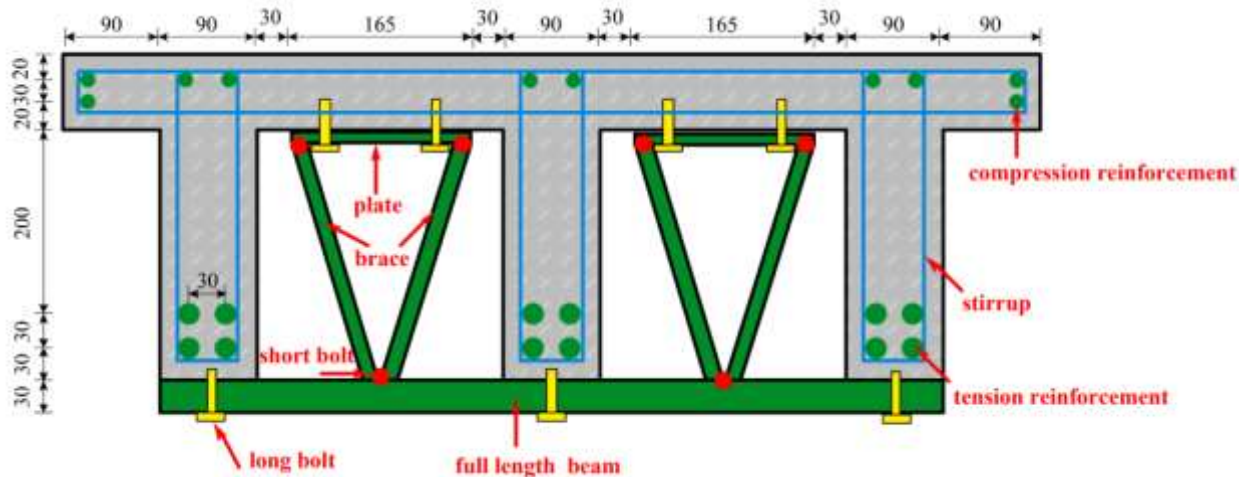


Рисунок 15. Увеличение поперечной жесткости пролетного строения путем постановки дополнительных диафрагм в виде К-образных ферм (источник [21])

В статье [22] авторами исследуется аналогичная рассмотренной выше система К-образных ферм для увеличения поперечной жесткости пролетного строения. Согласно полученным на основе проведенного эксперимента результатам, ширина раскрытия трещин уменьшилась на 74,1 %, а максимальный прогиб на 39,7 %. Также авторами был получен оптимальный шаг постановки поперечных ферм, который составляет от 1/10 до 1/5 длины пролета.

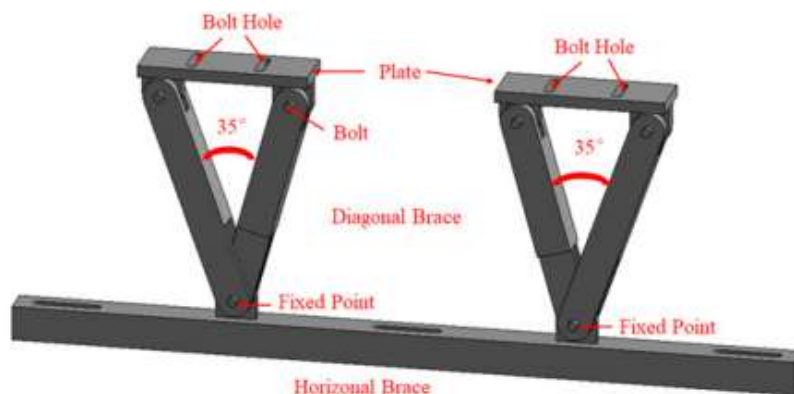


Рисунок 16. Конструктивная схема диафрагм для увеличения поперечной жесткости пролетного строения в виде К-образных ферм (источник [22])

Авторы исследования [23] сравнивают диафрагмы из стали и бетона различной толщины (рис. 17 а) с диафрагмами в виде К-образных фермы, выполненных из стальных труб, заполненных бетоном (рис. 17 б), на модели 30-метрового пролёта из железобетонных коробчатых балок.

Проведенное исследование показало, что оба варианта улучшают распределение нагрузок и снижают прогибы, однако применение композитных ферм дает более выраженный эффект.

При использовании стальных труб с пределом текучести 235 МПа и 420 МПа, заполненных бетоном с пределом прочности на сжатие 50 МПа, максимальный прогиб снижается на 15,32 % и 24,55 % соответственно.

Использование сплошностенчатых диафрагм вызывает уменьшение прогиба, пропорциональное толщине диафрагмы. При этом железобетонные диафрагмы толщиной 100 и 500 мм снизили прогиб на 8,72 % и 18,82 %, а стальные толщиной 10 и 30 мм — на 12,73 % и 21,8 % соответственно.

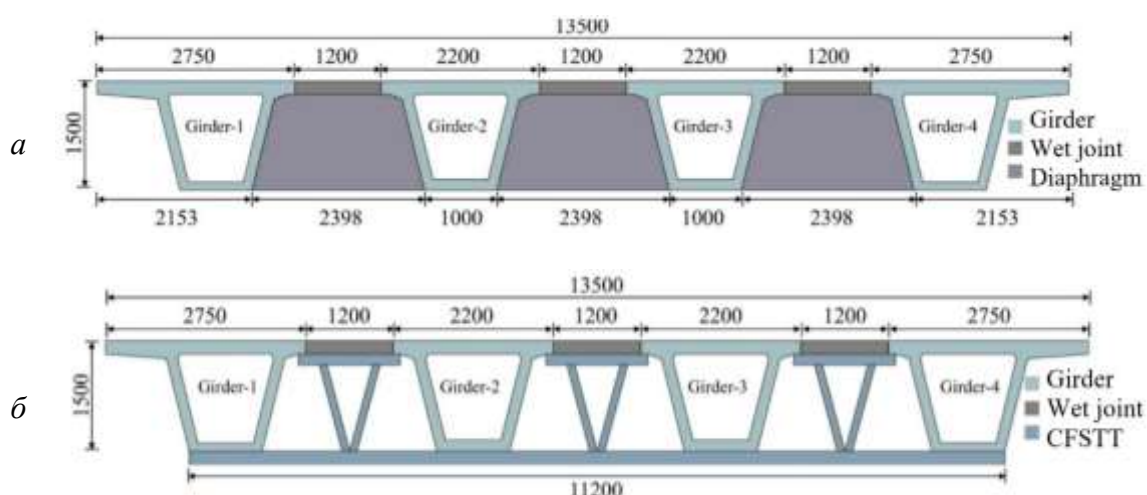


Рисунок 17. Увеличение поперечной жесткости пролетного строения путем постановки (а) сплошностенчатый диафрагм; (б) диафрагм в виде К-образных фермы из стальных труб, заполненных бетоном (источник [23])

Авторы [24] на основе численного эксперимента анализируют метод усиления существующих автодорожных мостов стальными поперечными связями (рис. 18) и как геометрические характеристики этих связей влияют на эффективность усиления.



Рисунок 18. Стальные треугольные связи для увеличения поперечной жесткости пролетного строения (источник [24])

Основные характеристики, рассмотренные в исследовании: количество связей, высота и толщина стальных элементов. Результаты показали, что разница между одной диафрагмой, установленной в середине разрезного пролёта, или двумя в каждой трети пролёта незначительна: установка связей только по центру пролёта снижает прогиб на 8,18 %. Увеличение высоты связей и толщины нижней распорки значительно сказывается на эффективности усиления в то время, как толщина диагональных связей оказывает минимальное влияние.

В статье [16] сопоставляются две практические технологии усиления приопорных зон мостов из пустотелых железобетонных плит: усиление швеллерами (рис. 19) и инъекционное заполнение полостей плит фиброармированными композитами с цементной матрицей (рис. 9). Авторами выполнены испытания на реальном мосту. По результатам, оба метода увеличивают поперечную жёсткость пролёта и снижают прогибы на 10–25 %, но метод усиления с использованием швеллеров продемонстрировал более значительный эффект, способствуя более равномерному распределению нагрузки.

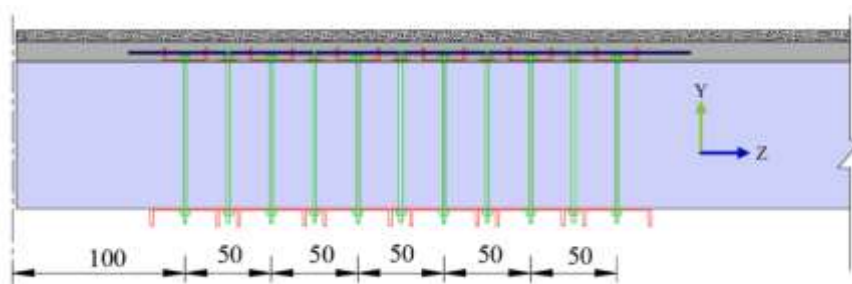


Рисунок 19. Усиление приопорных зон пустотелых преднапряженных плит за счет введения внешнего армирования в виде швеллеров (источник [16])

Усиление плиты проезжей части

Наряду с классическими методами усиления плиты проезжей части моста за счет устройства дополнительного слоя железобетона и включения его в совместную работу с пролетным строением путем постановки упоров, существуют более современные методы, предусматривающие применение различных полимерных материалов, за счет чего достигается меньший собственный вес усиленной конструкции.

Одним из эффективных способов усиления плиты проезжей части без значительного увеличения собственного веса является применение тонкого слоя текстильно-армированного бетона с волокном из углепластика.

В статье [25] описывается использование различных методов усиления, включая современные материалы, такие, как сверхпрочный бетон и текстильно-армированный бетон, позволяющие снизить расход материалов за счет высокой прочности. В частности, авторами разрабатывается проект, имеющий название «smart-deck». «Smart-deck» — это тонкий слой текстильно-армированного бетона, который усиливает несущие конструкции и одновременно защищает их от коррозии.

Текстильные волокна собираются в пучки, а пустоты между ними заполняются вяжущим (органическим, минеральным или цементным). Принцип действия технологии «smart-deck» заключается в том, что текстильные сетки укладываются поверх существующей железобетонной плиты секциями поперёк пролёта на некотором расстоянии друг от друга в два слоя и заливаются раствором, поверх которого после набора прочности укладывается дорожная одежда (рис. 20).

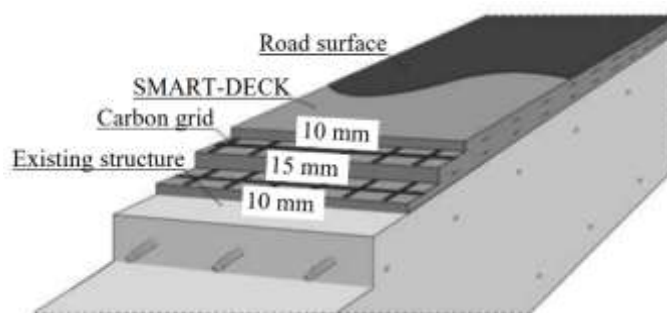


Рисунок 20. Плита проезжей части, усиленная с использованием текстильно-армированного бетона (источник [25])

В результате экспериментов, включающих и статические, и циклические испытания, установлено, что использование метода усиления слоем текстильно-армированного бетона увеличивает прочность плиты на сдвиг на 30–50 %, а прочность на изгиб в 2,3–2,9 раз. Данный метод может быть использован как при усилении существующих мостов, так и при проектировании новых.

Увеличение несущей способности плиты проезжей части на изгиб также возможно за счет наклеивания пластин из волоконно-армированных композитных материалов (FRP) в растянутой зоне плиты проезжей части. Достоинства и недостатки применения подобной технологии рассмотрены ранее в этой работе в разделе «усиление растянутой зоны балок» и являются аналогичными в случае применения для плиты проезжей части.

В исследовании [26] авторами предложен метод усиления растянутой зоны плиты, объединяющий применение стержней из углепластика, «рубашки» из сверхвысокопрочного фибробетона и системы механических анкеров для предотвращения отслаивания слоя усиления от поверхности бетона плиты (рис. 21 а).

Метод усиления показывает значительное увеличение несущей способности плиты (на 82 % больше в сравнении с контрольным образцом), предотвращает отслаивания слоя усиления вплоть до разрушения плиты, что является основным ограничивающим фактором применения композитных материалов в качестве элементов усиления растянутой зоны конструкции и благотворно влияет на картину трещинообразования, снижая общее количество трещин и уменьшая их ширину раскрытия.

Применение углепластиковых стержней для армирования слоя сверхвысокопрочного фибробетона является необязательным, но способствуют еще большему повышению несущей способности усиливаемой плиты.

Ключевую роль играет система механического крепления слоя фибробетона к поверхности плиты. Каждый анкер состоит из непосредственно анкерного болта и пластины из углеродистой стали, перераспределяющей нагрузку от крепежа на большую площадь и препятствующей таким образом возникновению локальных точек концентрации напряжений (рис. 21 б). Кроме того, сверхвысокопрочный фибробетон обладает высокой плотностью, благодаря чему меньше подвержен деградации и морозному разрушению под воздействием циклов попеременного замораживания-оттаивания, что является крайне актуальной проблемой для мостовых сооружений.

К недостаткам применения такой технологии можно отнести сложный процесс монтажа и чувствительность системы усиления к параметрам анкеров — использование недостаточного диаметра анкерных болтов, недостаточная глубина анкеровки или редкий шаг постановки крайне негативно влияют на надежность и долговечность системы усиления. Также необходимо учитывать, что существующий арматурный каркас плиты может препятствовать постановке анкерных болтов.

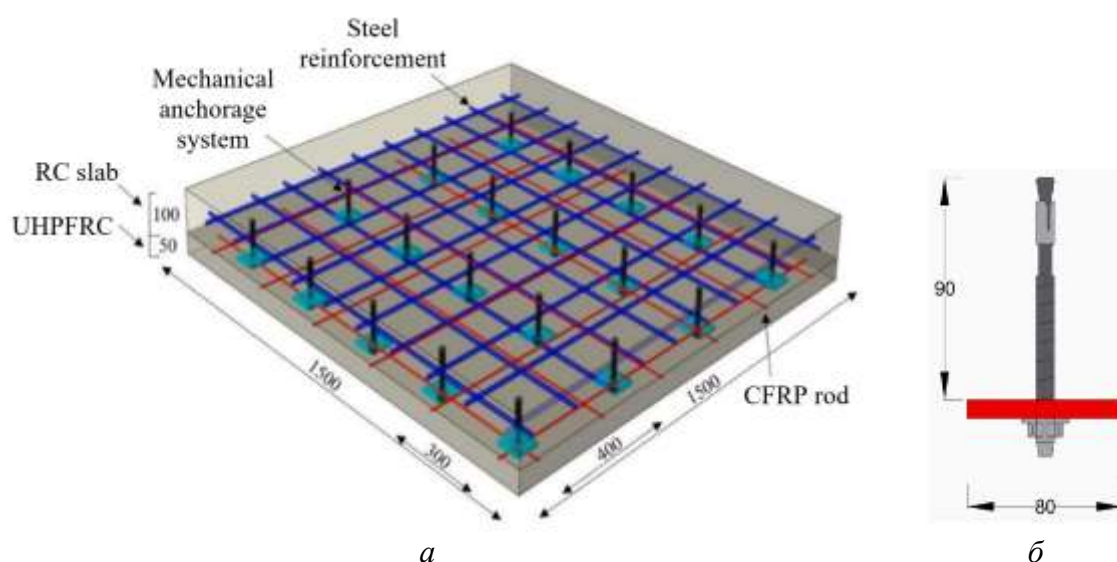


Рисунок 21. а — усиление растянутой зоны плиты; б — механический анкер (источник [26])

Выводы

Усиление пролетных строений на изгиб обеспечивается путем установки дополнительного армирования растянутой зоны. Армирующие элементы могут быть выполнены из различных материалов: сталь, волокно-армированные полимеры, железосодержащие сплавы с эффектом памяти. Полимерные материалы имеют ряд преимуществ, таких как стойкость к коррозионным процессам и большая удельная прочность.

В настоящее время исследуются и другие перспективные для усиления железобетонных конструкций материалы — сплавы с эффектом памяти, которые позволяют выполнять повторное преднапряжение (активацию) путем их нагрева после потери введенного преднапряжения по причине усталости материала.

Одна из главных задач усиления растянутой зоны — обеспечить достаточное сцепление между усиливаемой конструкцией и армирующими элементами для достижения их совместной работы. Возможными вариантами могут быть: поверхностное приклеивание, приварка или установка анкеров. Каждая из перечисленных технологий имеет свои достоинства и недостатки, рассмотренные в рамках настоящего исследования.

Усиление приопорных зон железобетонных конструкций на срез также, как и в случае усиления растянутой зоны, возможно путем установки дополнительного армирования. Успешно применена технология цементации полостей в плитных пролетных строениях, значительно улучшающая восприятие поперечной силы приопорной зоной. Ведутся исследования по применению высокопрочного фибробетона.

Повышение поперечной жесткости пролетного строения обеспечивает равномерное распределение нагрузки между главными балками, что приводит к повышению грузоподъемности пролетного строения в целом. С этой целью применяются поперечные связи в виде ферм или сплошные диафрагмы из различных материалов. Для плитных мостов может быть использован метод объединения плит обоймой из стальных швеллеров.

Усиление плиты проезжей части может быть осуществлено как увеличением поперечного сечения и, соответственно, его жесткости, так и более современными методами усиления, например, за счет применения композитных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Томилов С. Н. Оценка стадийности включения в работу элементов усиления эксплуатируемых пролетных строений автодорожных мостов / С. Н. Томилов // Вестник Инженерной Школы Дальневосточного Федерального Университета. — 2020. — № 1(42). — С. 147–154. — DOI: [10.24866/2227-6858/2020-1-15](https://doi.org/10.24866/2227-6858/2020-1-15). — EDN: [MNYRST](https://www.edn.net/MNYRST). (дата обращения: 13.02.2026).
2. Томилов С. Н. Особенности деформаций главных балок железобетонных пролетных строений автодорожных мостов при их усилении внешней арматурой / С. Н. Томилов // Вестник Инженерной Школы Дальневосточного Федерального Университета. — 2020. — № 3(44). — С. 151–158. — DOI: [10.24866/2227-6858/2020-3-15](https://doi.org/10.24866/2227-6858/2020-3-15). — EDN: [WTJJRW](https://www.edn.net/WTJJRW). (дата обращения: 13.02.2026).
3. Балдин Д. Ю. Сравнительный анализ способов усиления железобетонных тавровых балок / Д. Ю. Балдин, А. Н. Краев, Е. А. Жайсамбаев // Транспортные сооружения. — 2020. — Т. 7, № 2. — DOI: [10.15862/05SATS220](https://doi.org/10.15862/05SATS220). — EDN: [VYYBSD](https://www.edn.net/VYYBSD). (дата обращения: 13.02.2026).
4. Kexin Z. Strengthening of a Reinforced Concrete Bridge with Polyurethane-cement Composite (PUC) / Z. Kexin, S. Quansheng // TOCIEJ. — 2016. — Т. 10, № 1. — С. 768–781. — DOI: [10.2174/1874149501610010768](https://doi.org/10.2174/1874149501610010768). (дата обращения: 13.02.2026).
5. Kim S.-H. Strengthening Effect of the External Prestressing Method That Simulated a Deterioration Bridge / S.-H. Kim, J.-S. Park, W.-T. Jung, J.-Y. Kang // Applied Sciences. — 2021. — Т. 11. — С. 2553. — DOI: [10.3390/app11062553](https://doi.org/10.3390/app11062553). — EDN: [CMWRKY](https://www.edn.net/CMWRKY). (дата обращения: 13.02.2026).
6. Ghaffary A. Synthesis of Repair Materials and Methods for Reinforced Concrete and Prestressed Bridge Girders / A. Ghaffary, M.A. Mehrabi // Materials. — 2020. — Т. 13. — С. 4079. — DOI: [10.3390/ma13184079](https://doi.org/10.3390/ma13184079). — EDN: [PBDHRB](https://www.edn.net/PBDHRB). (дата обращения: 13.02.2026).
7. Argyle T. Flexural strengthening of a bridge deck slab using near surface mounted CFRP rods / T. Argyle [et al.] // Procedia Structural Integrity. — 2024. — Т. 64. — С. 1376–1385. — DOI: [10.1016/j.prostr.2024.09.375](https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.09.375). — EDN: [ZRHKDV](https://www.edn.net/ZRHKDV). (дата обращения: 13.02.2026).
8. Waal L. de. FRP strengthening of 60 year old pre-stressed concrete bridge deck units / L. de Waal [et al.] // Engineering Structures. — 2017. — Т. 143. — С. 346–357. — DOI: [10.14264/uql.2016.405](https://doi.org/10.14264/uql.2016.405). (дата обращения: 13.02.2026).

9. Kim S.-H. Experimental Study on Strengthening Effect Analysis of a Deteriorated Bridge Using External Prestressing Method / S.-H. Kim, J.-S. Park, W.-T. Jung [et al.] // Applied Sciences. — 2021. — Т. 11. — С. 2478. — DOI: [10.3390/app11062478](https://doi.org/10.3390/app11062478). — EDN: [OXTWOE](https://www.edn.net/OXTWOE). (дата обращения: 13.02.2026).
10. Zhang X. Second Remediation of Long-Term Deflection and Cracking of PT Box-Girder Bridge Using External Post-Tensioning / X. Zhang [et al.] // Journal of Performance of Constructed Facilities. — 2020. — Т. 34. — DOI: [10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0001491](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001491). (дата обращения: 13.02.2026).
11. Svoboda A. Strengthening and Rehabilitation of U-Shaped RC Bridges Using Substitute Cable Ducts / A. Svoboda, L. Klusáček, M. Olšák // Advances in Materials Science and Engineering. — 2019. — Т. 2019. — С. 1–21. — DOI: [10.1155/2019/8920718](https://doi.org/10.1155/2019/8920718). (дата обращения: 13.02.2026).
12. Aslam M. Strengthening of RC beams using prestressed fiber reinforced polymers — A review / M. Aslam, P. Shafigh, M.Z. Jumaat, S.N.R. Shah // Construction and Building Materials. — 2015. — Т. 82. — С. 235–256. — DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2015.02.051](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.051). (дата обращения: 13.02.2026).
13. Siwowski T. Development and implementation of CFRP post-tensioning system for bridge strengthening / T. Siwowski [et al.] // Engineering Structures. — 2020. — Т. 207. — С. 110266. — DOI: [10.1016/j.engstruct.2020.110266](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110266). — EDN: [YBCQIB](https://www.edn.net/YBCQIB). (дата обращения: 13.02.2026).
14. Forrest B.T. Research developments of a novel self-prestressing system for flexural strengthening reinforced concrete structures / B.T. Forrest, R. El-Hacha // Engineering Structures. — 2025. — Т. 342. — DOI: [10.1016/j.engstruct.2025.120866](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2025.120866). — EDN: [GILJXB](https://www.edn.net/GILJXB). (дата обращения: 13.02.2026).
15. Gunasekaran D. Innovative Repair of Transversely Cracked PPC Bridge Deck Girder using Precast Prestressing Plates with Shape Memory Alloys / D. Gunasekaran, A. Khan, B. Andrawes // International Journal of Bridge Engineering, Management and Research. — 2025. — Т. 2, № 3. — DOI: [10.70465/ber.v2i3.39](https://doi.org/10.70465/ber.v2i3.39). — EDN: [EHFUWI](https://www.edn.net/EHFUWI). (дата обращения: 13.02.2026).
16. Yang J. Experimental investigation and evaluation of shear performance of hollow slab beams strengthened by cavity grouting method / J. Yang, H. Guo, C. Yang [et al.] // Case Studies in Construction Materials. — 2024. — Т. 20. — DOI: [10.1016/j.cscm.2024.e03184](https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03184). — EDN: [ZLVZTF](https://www.edn.net/ZLVZTF). (дата обращения: 13.02.2026).
17. Lu J. Effectiveness of implanting prestressed threaded rods to strengthen shear-damaged full-scale prestressed hollow-core slabs / J. Lu, Y. Wei, K. Zhao [et al.] // Alexandria Engineering Journal. — 2025. — Т. 126. — С. 247–261. — DOI: [10.1016/j.aej.2025.04.088](https://doi.org/10.1016/j.aej.2025.04.088). — EDN: [TJBKHD](https://www.edn.net/TJBKHD). (дата обращения: 13.02.2026).
18. Yaqub M.A. Shear strengthening of precast prestressed bridge I-girders using shape memory reinforcement / M.A. Yaqub, C. Czaderski, S. Matthys // Engineering Structures. — 2024. — Т. 305. — DOI: [10.1016/j.engstruct.2024.117743](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.117743). — EDN: [RMZFFC](https://www.edn.net/RMZFFC). (дата обращения: 13.02.2026).
19. Huang Y. Strengthening of Reinforced Concrete Beams with Ultra-high Performance Fiber-Reinforced Concrete in Shear / Y. Huang, E. Schlangen, M. Luković // Building for the Future: Durable, Sustainable, Resilient. — 2023. — С. 695–705. — DOI: [10.1007/978-3-031-32511-3_72](https://doi.org/10.1007/978-3-031-32511-3_72). (дата обращения: 13.02.2026).

20. Chen C. Experimental and Simulation Studies on the Mechanical Performance of T-Girder Bridge Strengthened with Transverse Connection / C. Chen, C. Yang // Journal of Performance of Constructed Facilities. — 2019. — DOI: [10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0001318](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001318). (дата обращения: 13.02.2026).
21. Hou P. Experimental and simulation studies on the mechanical performance of concrete T-Girder bridge strengthened with K-Brace composite trusses / P. Hou [et al.] // Structures. — 2022. — Т. 43. — С. 479–492. — DOI: [10.1016/j.istruc.2022.06.069](https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.06.069). — EDN: [YHHILL](https://www.edn.net/YHHILL). (дата обращения: 13.02.2026).
22. Yang C. Adding composite truss to improve mechanical properties of reinforced concrete T-girder bridge / C. Yang [et al.] // Advances in Structural Engineering. — 2022. — Т. 25. — DOI: [10.1177/13694332221086705](https://doi.org/10.1177/13694332221086705). — EDN: [TDMPMH](https://www.edn.net/TDMPMH). (дата обращения: 13.02.2026).
23. Li P. Reinforcement of Insufficient Transverse Connectivity in Prestressed Concrete Box Girder Bridges Using Concrete-Filled Steel Tube Trusses and Diaphragms: A Comparative Study / P. Li, C. Yang, F. Xu [et al.] // Buildings. — 2024. — Т. 14. — С. 2466. — DOI: [10.3390/buildings14082466](https://doi.org/10.3390/buildings14082466). — EDN: [FMOVBS](https://www.edn.net/FMOVBS). (дата обращения: 13.02.2026).
24. Ke Y. Parameters analysis and structural optimization of aging highway bridges strengthened with transverse steel connections / Y. Ke, Y. Shen, Q. Peng, W. Peng // Life-Cycle Performance of Structures and Infrastructure Systems in Diverse Environments. — 2025. — С. 788–794. — DOI: [10.1201/9781003595120-95](https://doi.org/10.1201/9781003595120-95). (дата обращения: 13.02.2026).
25. Adam V. Flexural and Shear Tests on Reinforced Concrete Bridge Deck Slab Segments with a Textile-Reinforced Concrete Strengthening Layer / V. Adam [et al.] // Materials. — 2020. — Т. 13. — DOI: [10.3390/ma13184210](https://doi.org/10.3390/ma13184210). — EDN: [NBABAR](https://www.edn.net/NBABAR). (дата обращения: 13.02.2026).
26. Saeed F. Strengthening of reinforced concrete slabs using carbon fiber reinforced polymers rods and concrete jacket with a mechanical anchorage system / F. Saeed, F. Hejazi, R. Rashid // Construction and Building Materials. — 2024. — Т. 440. — С. 137464. — DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2024.137464](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137464). — EDN: [WRLCUG](https://www.edn.net/WRLCUG). (дата обращения: 13.02.2026).

Mikhailova Olga Vadimovna

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russia
E-mail: olya.mikhailovaaa@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-9773-5497>

Zolotov Vyacheslav Mikhaylovich

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russia
E-mail: slavazol@bk.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-9629-7268>

Kozak Nikolai Viktorovich

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russia
E-mail: kozak.spbgasu@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7707-4388>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1018546
ResearchGate: <https://www.researchgate.net/profile/Nikolai-Kozak-2>
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57207108767>

Syrkov Anton Vladimirovich

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russia
E-mail: syrkov-anton@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3178-6805>
ResearchGate: <https://www.researchgate.net/profile/Anton-Syrkov>

Modern methods of strengthening of reinforced concrete superstructures of road bridges

Abstract. Currently, a large number of bridges and overpasses made of reinforced concrete and prestressed reinforced concrete are in operation on public roads, whose consumer characteristics do not meet the requirements of current regulatory documentation due to their moral and physical deterioration. The key factor determining the safe operation of a bridge structure is its load capacity. For these reasons, strengthening the main load-bearing structures of bridge structures is an extremely urgent problem. Complete replacement of the main beams is not always rational due to the high cost of carrying out such major repairs, the complexity and cost of dismantling structures and the prolonged closure of the structure for traffic.

In this research paper, the authors consider the main modern methods of reinforcing reinforced concrete bridges and overpasses with main beams of T-shaped, I-beam, plate and box sections and the existing development trends in this area. An overview of domestic and foreign literature on the topic of strengthening existing road reinforced concrete bridge structures is given. In addition, the authors have compiled a classification of methods for strengthening superstructures of bridges and overpasses made of reinforced concrete and prestressed reinforced concrete, depending on the materials used, the technological features of major repairs to strengthen the reinforced concrete main beams of the superstructure, as well as the impact of the methods used on the integrity of the main load-bearing structures. The result of this work is a review and comparison of various existing approaches to reinforcing reinforced concrete road bridges, as well as their systematization, which makes it possible to simplify and expand the range of searching for the most effective reinforcement method suitable for the given conditions and task.

Keywords: reinforced concrete superstructure; reinforcement of superstructures; reinforced concrete girder; bridge reinforcement; reinforced concrete; bridge structures; repair